



Michael Zottler

Life-Cycle Analyse von Leichtbaukonzepten für den Automobilbau

Diplomarbeit zur Erlangung des Akademischen Grades eines
Diplom Ingenieur

Studienrichtung
Maschinenbau

Technische Universität Graz
Institut für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Ramsauer

Graz, April 2014

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 wörtlich 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

Ich danke meiner Mutter und meinem Vater, dass sie mir mein Studium ermöglicht und mich all die Jahre unterstützt haben.

Ich danke meiner Freundin Barbara dafür, dass sie mich in den letzten Jahren meines Studiums (und nicht nur dort) durch alle Höhen und tiefsten Tiefen begleitet hat.

Alexander möchte ich für seine Hilfsbereitschaft, Unterstützung und den regen Austausch danken.

Ich danke meinen Betreuern Hans Schnöll und Helmut Brunner für die Betreuung während dieser Arbeit.

Zu guter Letzt,

danke ich Anna dafür dass sie da ist.

Kurzfassung

Energieeffizienz und die Reduktion der CO₂-Emission sind aufgrund des Klimawandels und der Begrenztheit von Ressourcen, Themen mit denen man sich im Automobilbau schon seit einigen Jahren auseinandersetzt. Der Druck Fahrzeuge umweltschonender herzustellen und zu betreiben wird auch vonseiten der Gesetzgebung immer höher.

Diese Arbeit analysiert verschiedene Karosserieleichtbaukonzepte von Personenkraftwagen hinsichtlich ihres Energieaufwandes und der CO₂-Emission, sowohl in der Herstellung als auch während des Betriebes. Leichtbauvarianten aus Aluminium und Kohlenstofffaser verstärkten Kunststoffen werden mit einer Referenzvariante aus Stahl verglichen. Die Analyse orientiert sich in ihrer Struktur an der Methode der Ökobilanz nach den Normen ISO 14040 und ISO 14044.

Die Herstellungsprozesse der einzelnen Karosserievarianten werden, hinsichtlich ihres CO₂-Ausstoß und Energieverbrauch analysiert. Weiters wird untersucht wie sich der Strom-Mix unterschiedlicher Länder auf CO₂-Ausstoß und Energieverbrauch in der Herstellung auswirkt.

Es wird der Einfluss der Leichtbauvarianten auf den CO₂-Ausstoß und Energieverbrauch im Fahrbetrieb untersucht. Darüber hinaus werden über die Nutzungsdauer die Einflüsse von Antriebskonzepten und Nutzungsverhalten untersucht.

Die Ergebnisse aus der Analyse des Herstellungsprozesses und der Analyse der Nutzungsdauer werden miteinander verknüpft. Aus den möglichen Szenarien werden aussagekräftige Varianten ausgewählt und analysiert.

Die Analyse zeigt dass die Verwendung der betrachteten Leichtbaukonzepte per se nicht immer zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus führt.

Abstract

Energy efficiency and the reduction of CO₂ emission due to climate change and the limited nature of resources are topics that the automotive industry has been facing for years now. The pressure to produce and operate more environmentally friendly vehicles is getting higher even on the part of the legislation.

This thesis analyzes various lightweight body concepts of passenger cars in terms of their energy demand and CO₂ emissions, both in production as well as during operation. Lightweight concepts made of aluminum and carbon fiber-reinforced plastics are compared with a reference variant of steel. The structure of the analysis is based on the method of life cycle assessment according to the standards of ISO 14040 and ISO 14044.

The production processes of the different body concepts will be analyzed for their CO₂-emissions and energy consumption. Furthermore, it is investigated how the electricity mix of different countries impact on CO₂-emissions and energy consumption in manufacturing.

The influence of the lightweight concepts is examined over the use phase. In addition, the influences of drive train concepts and trip types are examined over the lifespan.

The results from the analysis of the production process and the analysis of the use phase are linked. Of the possible scenarios meaningful variants are selected and analyzed.

The analysis shows that the use of the considered lightweight concepts per se does not always lead to a reduction in CO₂-emissions over the entire life cycle.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.2	Vorgehensweise.....	1
2	Die Ökobilanz	3
2.1	Geschichte der Ökobilanz	3
2.1.1	Begriffsdefinitionen in der Ökobilanz nach ISO 14040	5
2.2	Beschreibung des Ablaufs der Ökobilanz nach ISO 14044.....	8
2.2.1	Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen	8
2.2.2	Sachbilanz.....	12
2.2.3	Wirkungsabschätzung.....	14
2.2.4	Auswertung	16
3	Leichtbau.....	19
3.1	Spannungsfelder	19
3.1.1	Kosten.....	20
3.1.2	Sicherheit	20
3.2	Leichtbauökonomie	22
3.2.1	Spar Leichtbau	23
3.2.2	Öko-Leichtbau.....	23
3.2.3	Zweckleichtbau	23
3.2.4	Ultraleichtbau	24
3.3	Leichtbauwerkstoffe	24
3.3.1	Stahl.....	25
3.3.2	Aluminium	30
3.3.3	Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff (CFK)	35
3.4	Leichtbauweisen.....	47
3.4.1	Differentialleichtbau.....	47
3.4.2	Integralleichtbau.....	48
3.4.3	Integrierender Leichtbau	48

3.4.4	Verbundleichtbau	48
3.5	Fertigungsleichtbau	49
4	Lebenszyklus-Analyse der Leichtbaukonzepte	50
4.1	Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen	50
4.1.1	Beschreibung der Stahlkarosserie	51
4.1.2	Beschreibung der Aluminiumkarosserie	52
4.1.3	Beschreibung der CFK-Karosserie.....	53
4.2	Sachbilanz der Produktion	54
4.2.1	CO ₂ -Ausstoß und Energieverbrauch der Stahlkarosserieherstellung...	58
4.2.2	CO ₂ -Ausstoß und Energieverbrauch der Aluminiumkarosserieherstellung.....	62
4.2.3	CO ₂ -Ausstoß und Energieverbrauch der Herstellung einer Karosserie aus Kohlenstofffaser verstärktem Kunststoff	68
4.3	Sachbilanz über die Nutzungsdauer.....	75
4.3.1	Auswahl der Antriebskonzepte.....	75
4.3.2	Auswahl und Beschreibung der Fahrzyklen	76
4.3.3	Simulation und Berechnung des Energieverbrauchs im NEDC.....	80
4.3.4	Simulation und Berechnung des Energieverbrauchs im ARTEMIS.....	84
4.3.5	Berechnung des Energieverbrauchs über die Nutzungsdauer.....	85
4.3.6	Berechnung des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer	86
4.4	Gesamter Energieverbrauch und CO ₂ -Ausstoß	87
5	Auswertung und Interpretation	88
5.1	Karosserieherstellung und Nutzungsdaueranalyse	89
5.1.1	Karosserieproduktion	89
5.1.2	Nutzungsdauer.....	94
5.2	Lebenszyklusanalyse bei unterschiedlichem Nutzungsverhalten	96
5.3	Lebenszyklusanalyse verschiedener Antriebskonzepte	104
5.4	Lebenszyklusanalyse verschiedener Produktionsstandorte	108
5.4.1	Aluminiumkarosserie.....	108
5.4.2	Karosserie aus Kohlenstofffaser verstärktem Kunststoff	111

6	Schlussfolgerung.....	114
7	Literaturverzeichnis	116
8	Internetquellenverzeichnis.....	120
9	Abbildungsverzeichnis.....	122
10	Tabellenverzeichnis.....	127
11	Abkürzungsverzeichnis.....	130
12	Formelverzeichnis	131
	Anhang A.....	i
	Anhang B.....	ix
	Anhang C.....	xi
	Anhang D.....	xv
	Anhang E.....	xxiii
	Anhang F	xxx
	Anhang G	xxxi
	Anhang H.....	xxxiii

1 Einleitung

Diese Arbeit entstand in Zusammenarbeit des Institutes für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung mit dem Institut für Fahrzeugtechnik an der technischen Universität Graz

Wenn von Leichtbaukonzepten die Rede ist, beinhaltet dies, in der Regel alle Massebehafteten Teilsysteme eines Fahrzeuges. In dieser Arbeit wird darunter jedoch nur das Teilsystem der Karosserie verstanden da es mit 35-40% Massenanteil den größten Anteil an der Gesamtmasse einnimmt, und das Einsparungspotenzial im Vergleich mit anderen Baugruppen am größten erachtet wird.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung von Energie- und CO₂-Bilanzen ausgewählter Karosserieleichtbaukonzepte. Die Bilanzen umfassen die Herstellung der Karosserie von der Rohstoffgewinnung bis zur fertigen Karosserie sowie deren Einfluss auf die gesamte Nutzungsdauer. Die Leichtbaukonzepte sollen unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus mit einer Referenz verglichen und diskutiert werden.

Die Herstellungsprozesse müssen analysiert und die zur Erstellung der Bilanzen nötigen Daten erhoben werden. Es soll das Gewichtseinsparungspotenzial der Leichtbaukonzepte ermittelt werden und welche Auswirkungen die Gewichtseinsparung auf Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß über die Nutzungsdauer hat.

Neben dem Gewichtseinsparungspotenzial werden der Einfluss weiterer Faktoren wie Nutzungsverhalten und Art des Antriebsstrangs auf Energie- und CO₂-Bilanz untersucht.

1.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise in dieser Arbeit orientiert sich an den Vorgaben der Normen ISO 14040 und ISO 14044. Erstere behandelt die Grundsätze und Rahmenbedingungen einer Ökobilanz, wohingegen die ISO 14044 eine Anleitung zur Erstellung einer Ökobilanz ist und die Anforderungen an sie beschreibt.

Bevor auf die Lebenszyklusanalyse eingegangen wird, wird ein Überblick über das Thema Leichtbau gegeben. Es werden grundsätzliche Herangehensweisen,

Konstruktionsprinzipien, Werkstoffe und Fertigungsverfahren in Bezug auf den Leichtbau beschrieben.

Am Beginn der Lebenszyklusanalyse werden die zu untersuchenden Leichtbaukonzepte und das Referenzkonzept ausgewählt. Um den Untersuchungsrahmen einzuschränken, wird aus den am Markt angebotenen Fahrzeugsegmenten ein Segment ausgewählt. Für dieses werden die Fahrzeugdaten für die Referenzfahrzeuge erhoben. Diese unterscheiden sich durch das Antriebsstrangkonzept. Auf Basis von Einschätzungen aus der Literatur werden potenzielle Leichtbaukonzepte ausgewählt und die Leichtbaupotenziale im Vergleich zum Referenzkonzept ermittelt. Diese Daten und Rahmenbedingungen bilden einen Teil der Grundlage für die Energie- und CO₂-Bilanz in der Herstellung und der Nutzungsdauer.

Die Produktionsabläufe der zu untersuchenden Konzepte werden recherchiert und die nötigen Daten zur Berechnung der Energie- und CO₂-Bilanz der Herstellung erhoben. Als Quellen dienen Datenbanken, Statistiken, Literatur und persönliche Kontakte zu Industrieunternehmen sowie deren Umweltbilanzen.

Um die Energie- und CO₂-Bilanz in der Nutzungsdauer ermitteln zu können, wird zuerst mithilfe einer Verbrauchssimulation der Energieverbrauch des Referenzkonzeptes und der Leichtbaukonzepte ermittelt. Der Energieverbrauch wird in unterschiedlichen standardisierten Fahrzyklen für unterschiedliche Antriebskonzepte ermittelt. Für die im Fahrbetrieb nötigen Kraftstoffe werden die CO₂-Faktoren ermittelt. Mit diesen Faktoren und dem in der Simulation ermittelten Energieverbrauch wird der CO₂-Ausstoß über die Nutzungsdauer berechnet.

In der Auswertung wird auf die Energie- und CO₂-Bilanzen der Produktion und der Nutzungsdauer einzeln eingegangen. Anschließend werden die beiden Bilanzen zusammengefasst und der gesamte Lebenszyklus betrachtet.

Zum Abschluss wird noch ein Ausblick über zukünftige Leichtbaupotenziale und ihre Einflüsse auf den CO₂-Ausstoß gegeben

2 Die Ökobilanz

Die zunehmende Bedeutung des Umweltschutzes sowie der möglichen Auswirkungen auf die Umwelt, welche mit der Herstellung und Nutzung von Produkten im Kontext stehen, führte zur Notwendigkeit, eine Methode zu entwickeln, mit der diese Wirkungen besser verstanden und berücksichtigt werden. Die Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment, LCA) ist ein hierfür entwickeltes Werkzeug.¹

Der Begriff Ökobilanz ist nach ISO 14040 wie folgt definiert:

„Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebens“²

Eine Ökobilanz kann dazu dienen,³

- Möglichkeiten aufzuzeigen, in welcher Weise ein Produkt in den unterschiedlichen Lebensphasen die Umwelteigenschaften verbessern kann.
- Industrie, Regierungs- und Nichtregierungsorganisationen zu informieren, z.B. in der Prozess- oder Produktentwicklung, sowie in der Prioritätensetzung und strategischen Planung.
- relevante Indikatoren von Umwelteigenschaften und deren Messverfahren auszuwählen.
- ein Produkt besser zu vermarkten.

Es wird im Folgenden auf die Anleitung zur Erstellung einer Ökobilanz und ihre Grundsätze eingegangen. Ein kurzer historischer Überblick zum Thema findet sich gleich im Anschluss.

2.1 Geschichte der Ökobilanz

Die Ökobilanz, als definierte Methode, existiert erst seit ungefähr 45 Jahren. Jedoch finden sich in der Literatur die ersten Ansätze eines Denkens in Lebenszyklen schon um 1880. Der schottische Biologe und Ökonom Patrick Geddes entwickelte eine Methode, die als Vorgänger der Sachbilanz gelten kann (Definition Sachbilanz, siehe S.5). Er legte seinen Focus dabei auf die Energieversorgung durch Steinkohle.⁴

Am Midwest Reserch Institute in den USA wurde die erste moderne Ökobilanz durchgeführt. Sie wurde um 1970 unter dem Namen „Resource and Environmental

¹ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 4

² Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 6

³ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 4

⁴ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 7

Profile Analysis“ (REPA) publiziert. Die ersten Ökobilanzen untersuchten den Ressourcenverbrauch und die Emissionen von Produktsystemen. Nach heutigen Gesichtspunkten werden solche Untersuchungen als Sachbilanz bezeichnet.⁵

Begründet wurde die Entwicklung der ersten Ökobilanzen 1970 mit zunehmenden Abfallproblemen und dem begrenzten Vorkommen von Rohstoffen.⁶

Von 1990 bis 1993 waren die SETAC (Society for Environmental Technology and Chemistry) und SETAC-Europe die Vorreiter in der Weiterentwicklung und der Standardisierung der Ökobilanz. In dieser Zeit entstand das SETAC-Dreieck, welches der erste Versuch war, die Ökobilanz zu strukturieren.⁷

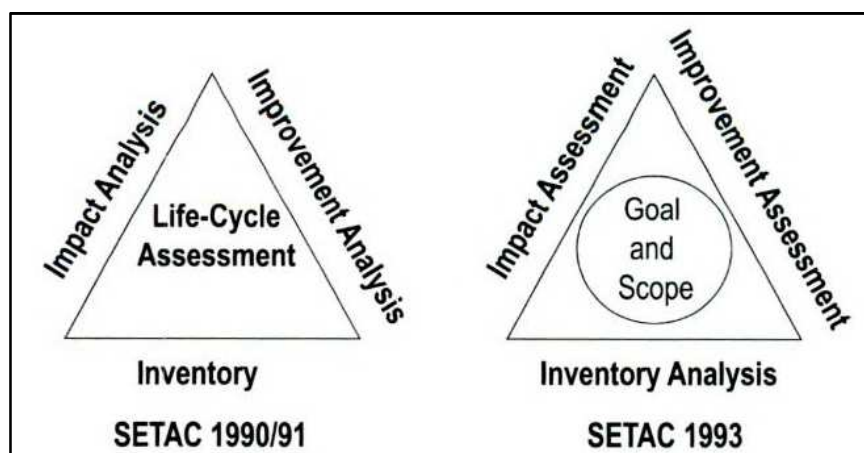


Abbildung 1: Das SETAC-Dreieck von 1990 und die Erweiterung von 1993⁸

Diese Struktur hat sich im Wesentlichen bis heute nicht verändert. In der ISO 14040 wurde nur der Teil des „Improvement Assessment“ durch „Interpretation“ bzw. im Deutschen durch „Auswertung“ ersetzt.⁹

In der Zeit von 2001 bis 2006 wurden die ISO Normen zur Ökobilanz neu strukturiert. Dabei wurden nur geringe inhaltliche Änderungen vorgenommen.¹⁰

Die ISO 14040 beschreibt die Grundstruktur der Ökobilanz und bildet eine Leitlinie, welche für Entscheidungen dienen soll, die in der Planung und Erstellung getroffen

⁵ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 7

⁶ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 8

⁷ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 10

⁸ Klöpffer/Grahl (2009), S. 11

⁹ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 12

¹⁰ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 17

werden. Die ISO 14044 hingegen geht genauer auf die Durchführung der Ökobilanz ein und beschreibt die technischen Anforderungen und Richtlinien.¹¹

Im folgenden Kapitel werden einige für diese Arbeit relevante Begriffe nach ISO 14040 definiert.

2.1.1 Begriffsdefinitionen in der Ökobilanz nach ISO 14040

Sachbilanz: „Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“¹²

Wirkungsabschätzung: „Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Größe und Bedeutung von potentiellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient“¹³

Produkt: „Jede Ware und Dienstleistung“¹⁴

Koppelprodukt: „eines von zwei oder mehreren Produkten aus dem selben Prozessmodul oder Produktsystem“¹⁵

Allokation: „Zuordnung der Input- oder Outputflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen.“¹⁶

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

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“¹⁷

Produktsystem: „Zusammenfassung von Prozessmodulen mit Elementar- und Produktflüssen, die den Lebensweg eines Produktes modelliert und eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllt.“¹⁸

Abbildung 2 zeigt ein Produktsystem in allgemeiner Darstellung.

¹¹ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 11; Vgl. Finkbeiner et. al. (2006), S. 81

¹² Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 7

¹³ ibidem

¹⁴ ibidem

¹⁵ Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 8

¹⁶ ibidem

¹⁷ Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 9

¹⁸ ibidem

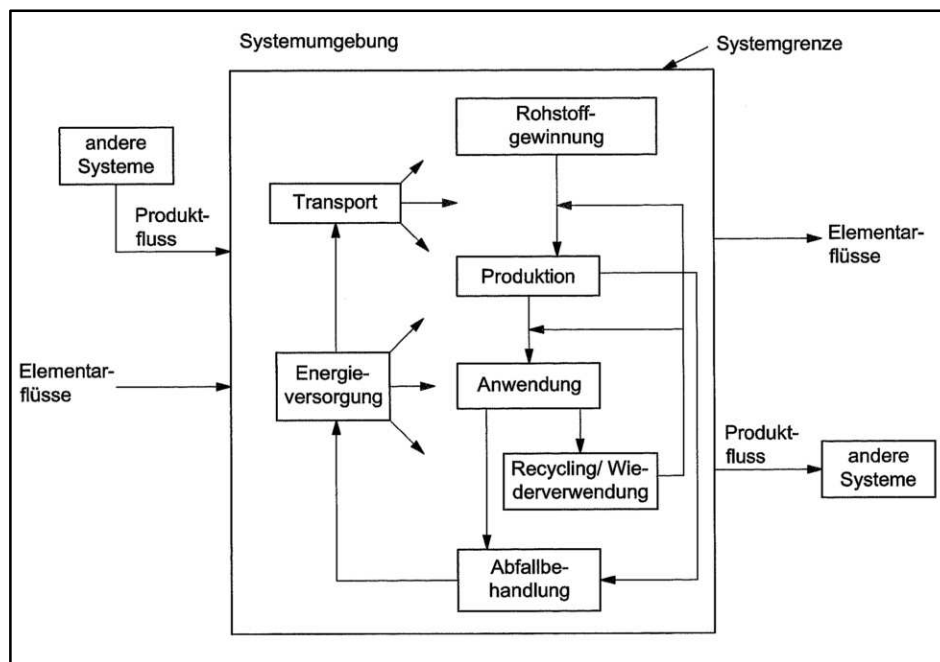


Abbildung 2: Allgemeine Darstellung eines Produktsystems einer Ökobilanz¹⁹

Systemgrenzen: „ein Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind.“²⁰ (siehe Abbildung 2)

Prozessmodul: „kleinster in der Sachbilanz berücksichtigter Bestandteil, für den Input- und Outputdaten quantifiziert wurden.“²¹

Abbildung 3 zeigt einen Satz von Prozessmodulen in allgemeiner Darstellung.

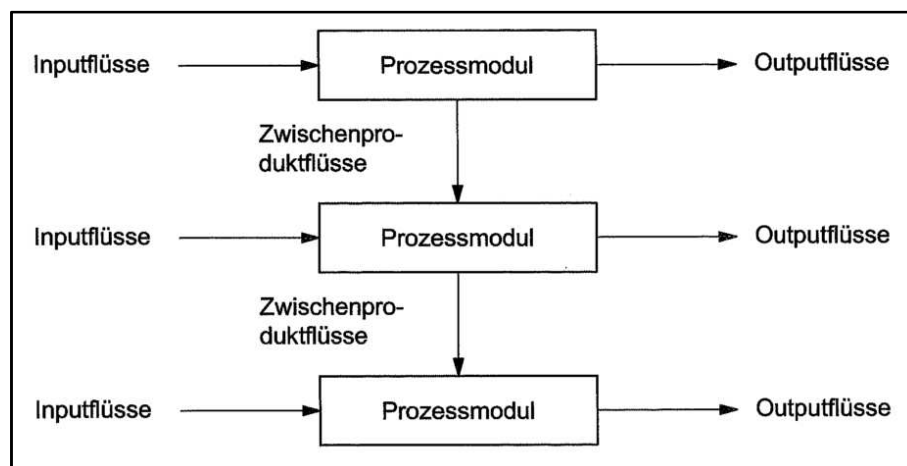


Abbildung 3: Satz von Prozessmodulen in einem Produktsystem in allgemeiner Darstellung²²

¹⁹ Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 16

²⁰ Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 10

²¹ ibidem

²² Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 16

Charakterisierungsfaktor: „Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird“²³

Wirkungskategorie: „Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können“²⁴

Wirkungsindikator: „quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie“²⁵

²³ Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 10

²⁴ ibidem

²⁵ ibidem

2.2 Beschreibung des Ablaufs der Ökobilanz nach ISO 14044

Eine Ökobilanz besteht aus den folgenden vier Phasen.²⁶

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

Abbildung 4 zeigt die Phasen der Ökobilanz und deren Wechselwirkungen.

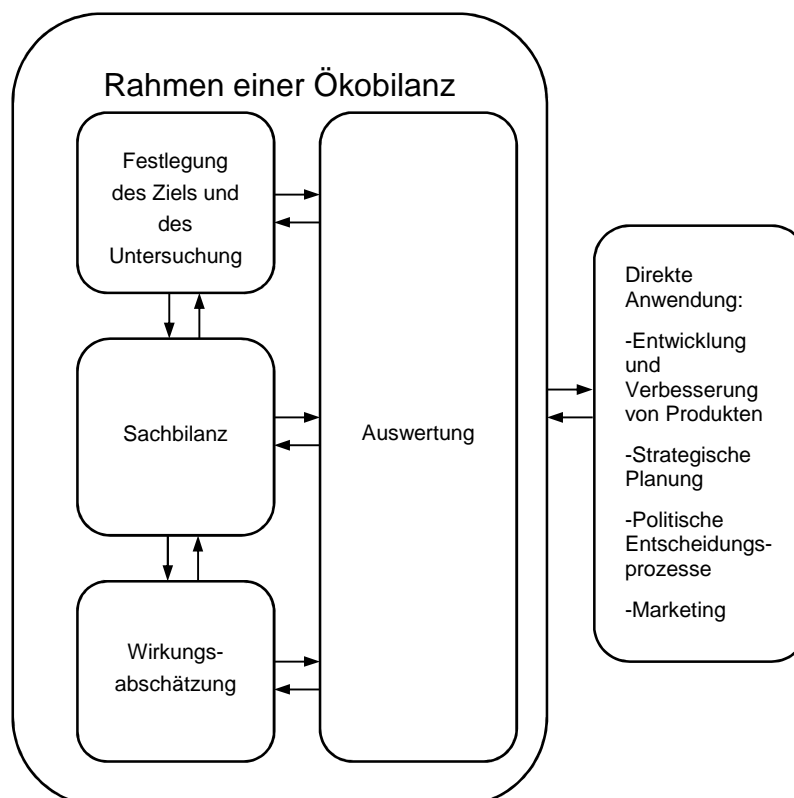


Abbildung 4: Komponenten einer Ökobilanz nach ISO 14040²⁷

In den Folgenden Kapiteln werden die vier Phasen der Ökobilanz beschrieben.

2.2.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen

Die ISO 14044 stellt zur Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen folgende Forderung:

²⁶ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 12

²⁷ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 13

„Ziel und Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz müssen eindeutig festgelegt und auf die beabsichtigte Anwendung abgestimmt sein. Aufgrund der iterativen Eigenschaft der Ökobilanz ist der Untersuchungsrahmen während der Studie möglicherweise zu konkretisieren.“²⁸

Nach ISO 14044 müssen folgende Ziele für eine Ökobilanz eindeutig festgelegt werden:²⁹

- Die beabsichtigte Anwendung
- Die Gründe für die Durchführung der Studie
- Die angesprochene Zielgruppe
- Ob die Ergebnisse für die Verwendung in, zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen bestimmt sind

Folgende Punkte müssen bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens nach ISO 14044 beachtet werden:³⁰

- Das zu untersuchende Produktsystem (siehe 2.1.1)
- Die Funktion des Produktsystems
- Die funktionelle Einheit
- Die Systemgrenzen
- Die Allokationsverfahren
- Die Methode der Wirkungsabschätzung und die Wirkungskategorien (siehe 2.2.3)
- Die Auswertemethode (siehe 2.2.4)
- Die Anforderung an die Daten
- Die Annahmen
- Die Werthaltungen und optionalen Bestandteile
- Die Einschränkungen
- Die Anforderung an die Datenqualität
- Die Art der Kritischen Prüfung, sofern vorgesehen
- Die Art und der Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts

Die oben angeführten Punkte werden in den folgenden Absätzen beschrieben:

²⁸ Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 13

²⁹ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S.13

³⁰ Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 13

Funktion und funktionelle Einheit

Das Leistungsmerkmal oder die Funktion muss durch den Untersuchungsrahmen eindeutig festgelegt sein. Die Input und Output-Daten müssen auf eine Bezugsgröße hin angegeben sein, welche als funktionelle Einheit bezeichnet wird. Beim Vergleichen von Systemen muss dieselbe Funktion mit derselben funktionellen Einheit verglichen werden.³¹

Es kann zum Beispiel gesamte Energieverbrauch auf die Masse des Endproduktes bezogen werden (kWh/kg oder MJ/kg).

Systemgrenze

Durch das Ziehen von Systemgrenzen wird festgelegt, welche Prozessmodule in der Ökobilanz enthalten sind. Sollten Inputs, Outputs oder gar ganze Prozessmodule nicht berücksichtigt werden, so muss dies dokumentiert werden. Bei einem idealen Produktsystem bilden die Inputs und Outputs an der Systemgrenze Elementar- und Produktflüsse.³²

Klöpffer/Grahl unterscheiden drei Arten von Systemgrenzen:³³

- technische Systemgrenzen
- geographische Systemgrenzen
- zeitliche Systemgrenzen

Bei den technischen Systemgrenzen werden Abschneideregeln festgelegt, durch die vernachlässigbare Flüsse in und aus dem System nicht betrachtet werden. Klöpffer/Grahl führt als Beispiel Infrastruktur oder Fertigungsanlagen an.³⁴

Die ISO 14044 unterscheidet folgende drei Kriterien zur Festlegung von Abschneideregeln, die zur Erfassung von Inputs und Outputs über die Systemgrenzen dienen:

- Masse
- Energie
- Umweltrelevanz

Bei diesen drei Kriterien wird für jedes einzelne Kriterium festgelegt, ab welchem prozentuellen Anteil des jeweiligen Flusses, ein Input oder Output betrachtet wird.³⁵

³¹ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 14

³² Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 18

³³ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 30

³⁴ ibidem

³⁵ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 15

Produktdefinitionen und Zusammenhänge auf wirtschaftlicher Ebene beeinflussen das Ziehen von geographischen Systemgrenzen. Es können aufeinanderfolgende Produktionsschritte an verschiedenen Orten untersucht werden, oder sehr ähnliche Produkte, die an unterschiedlichen Orten produziert werden. Unter unterschiedlichen Orten werden hier Orte verstanden, die über ein großes Gebiet (z.B. einen Kontinent) verteilt sind. Im Rahmen der Wirkungsabschätzung gibt es Wirkungskategorien, die global betrachtet werden, wie z.B. der Treibhauseffekt, andere wiederum lokal z.B. Feinstaub.³⁶

Die zeitlichen Systemgrenzen sind schwieriger zu ziehen als die geografischen. Bei langlebigen Produkten wie Gebäuden treten Probleme auf, da ihre Verwertung weit in der Zukunft liegt und es Recyclingmethoden geben kann, die zur Zeit der Bilanzierung noch nicht entwickelt waren. Bei den Wirkungsabschätzungen ist es ebenso schwierig einen zeitlichen Horizont zu setzen, da bei einigen Schadstoffen die Auswirkungen auf die Umwelt über Jahrzehnte oder Jahrhunderte nicht bekannt sind.³⁷

Allokationsverfahren

Bei Untersuchungen von Systemen, die mehrere Produkte erzeugen ist es nötig, Allokationen festzulegen. Jene Prozesse, welche mit anderen Produktsystemen gemeinsam benutzt werden sind zu kennzeichnen. Grundsätzlich sollten Allokationen vermieden werden. Dies kann durch Teilung des betroffenen Prozessmoduls geschehen. Die Inputs und Outputs werden dann auf die Teilprozesse bezogen. Können Allokationen nicht vermieden werden, so sollen die Inputs und Outputs so den unterschiedlichen Produkten und Funktionen zugeordnet werden, dass die zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge zwischen ihnen wiedererkennbar sind.³⁸

Datentypen und –Quellen

Diese sind abhängig vom Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz und können direkt an den Produktionsstandorten ermittelt oder aus anderen Quellen bezogen oder errechnet werden.³⁹

³⁶ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 35f

³⁷ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 36f

³⁸ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 20; Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 21

³⁹ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 16

Anforderung an die Datenqualität

Zur Beurteilung der Datenqualität können Anforderungen an Alter oder geografischer Herkunft definiert werden. Auch Daten, die mit bestimmten Technologien und Quellen in Zusammenhang stehen, können gefordert werden. Weitere Eigenschaften wie Schwankungsbreite, Vollständigkeit, Repräsentativität und Unsicherheit der Zusatzinformationen wie Modelle oder Annahmen sind ebenfalls zu prüfen und festzulegen. Sollten für ein Prozessmodul keine Daten vorhanden sein, so muss dies dokumentiert werden. Wird kein Wert oder ein geschätzter Wert verwendet, ist dies zu begründen bzw. zu erläutern. Es gibt auch die Möglichkeit, Daten ähnlicher Technologien zu verwenden.⁴⁰

Vergleiche zwischen Systemen

Bei diesen Untersuchungen ist die Vergleichbarkeit der Systeme zu beurteilen. Systemgrenzen, Datenqualität, Wirkungsabschätzung und funktionelle Einheit sind auf den Vergleich hin abzustimmen.⁴¹

Durchführung einer Kritischen Prüfung

Im Untersuchungsrahmen ist festzulegen, ob und wie die Ökobilanz durch externe Stellen zusätzlich geprüft werden soll.⁴²

2.2.2 Sachbilanz

In der Sachbilanz werden die Daten der Zu- und Abflüsse über die Systemgrenzen des betrachteten Produktsystems gesammelt und bilanziert. Die Erstellung einer Sachbilanz ist ein iterativer Prozess, da es möglich ist, dass es bei der Untersuchung des Systems und dem Sammeln von Daten zu neuen Datenanforderungen oder Einschränkungen kommt. Dies kann wiederum eine Änderung des Datenerhebungsprozesses erfordern, um die Ziele der Studie noch zu erfüllen. Ebenso können Sachverhalte auftreten, die eine Änderung des Untersuchungsrahmen oder des Ziels zur Folge haben.⁴³

Der vereinfachte Ablauf einer Sachbilanz ist in Abbildung 5 dargestellt.

⁴⁰ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 16f

⁴¹ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 17

⁴² Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 18

⁴³ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 19

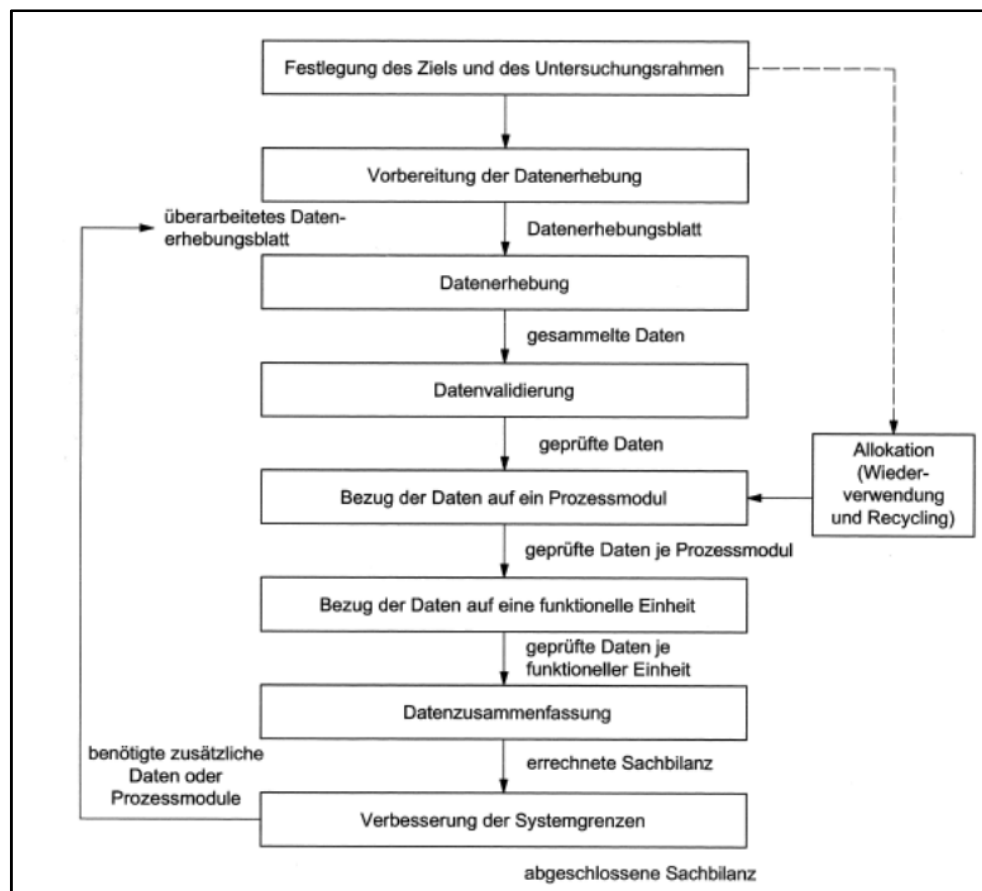


Abbildung 5: Vereinfachtes Verfahren zur Erstellung einer Sachbilanz nach ISO 14044⁴⁴

Die Norm geht dabei auf die folgenden Schritte aus Abbildung 5 näher ein.

Datenerhebung

Für jedes Prozessmodul, das innerhalb der Systemgrenzen liegt, sind Daten zu sammeln. Diese Daten können in Qualität und Quantität variieren, und durch Messung, Berechnung oder Schätzung ermittelt werden. Auf dieser Datenbasis werden die Inputs und Outputs der Prozessmodule berechnet. Die Quellen und Berechnungsmethoden müssen dokumentiert werden.⁴⁵

Nach ISO 14044 werden folgende Datengruppen unterschieden:⁴⁶

- Energieinputs, Rohstoffinputs, Betriebsstoff-Inputs, andere physikalische Inputs
- Produkte, Koppelprodukte, Abfall
- Emissionen in Luft, Wasser und Boden
- weitere Umweltaspekte

⁴⁴ Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 19

⁴⁵ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 18

⁴⁶ Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 19

Eine große Herausforderung bei der Datenerhebung bildet die Erfüllung der Anforderung an die Datenqualität. Vor allem von akademischer Seite aus wird an Datensätze der Anspruch höchster Transparenz gestellt. Industriepartner jedoch stellen Daten oft nur dann zur Verfügung, wenn dadurch Mitbewerber keinen Einblick in innerbetriebliche Prozesse erhalten können. Auch nach intensiver Recherche von Datenbanken und Literatur ist das Vorhandensein von Datenlücken nach wie vor möglich. Diese Datenlücken können sowohl die Sachbilanz als auch die nächste Phase der Ökobilanz, die Wirkungsabschätzung betreffen. In solchen Fällen wird auf statistische oder allgemein verfügbare Daten zurückgegriffen.⁴⁷

Datenvalidierung

Die erhobenen Daten müssen durch Erstellung von Massenbilanz, Energiebilanz und/oder vergleichender Untersuchung von Emissionsfaktoren überprüft werden.⁴⁸

Bezug der Daten auf ein Prozessmodul und eine funktionelle Einheit

Jedem Prozessmodul wird ein passender Prozessfluss zugeordnet, welcher die Struktur zur Berechnung der Input- und Output-Daten bildet. In der Berechnung sollen alle Input und Outputs auf die Funktionelle Einheit bezogen werden.⁴⁹

Anpassung der Systemgrenzen

Anfänglich aufgestellte Systemgrenzen müssen eventuell neu gezogen werden, da nach der Daten- oder Sensitivitätsanalyse die Berücksichtigung bestimmter Inputs und Outputs nicht mehr notwendig ist. Die Auswertung kann auch zur Folge, dass das neue Prozessmodule, Inputs und Outputs in die Betrachtung aufgenommen werden müssen.⁵⁰

2.2.3 Wirkungsabschätzung

Mit den Ergebnissen der Sachbilanz wird in der Wirkungsabschätzung die Bedeutung der Umweltauswirkungen beurteilt. Nach ISO 14044 wird verlangt, dass die Wirkungsabschätzung mit den anderen Phasen der Ökobilanz abgestimmt wird, um Fehlerquellen und Auslassungen zu beurteilen. So kann sie auch eine Prüfung von Ziel und Untersuchungsrahmen enthalten um die Zielsetzung der Studie zu verifizieren.⁵¹

⁴⁷ Vgl. Feifel/Walk/Wursthorn (2010), S. 50

⁴⁸ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 20

⁴⁹ ibidem

⁵⁰ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 20f

⁵¹ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 20; Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 23

Verbindliche Bestandteile der Wirkungsabschätzung nach ISO 14044 sind:⁵²

- die Auswahl der Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle
- die Zuweisung der Sachbilanzergebnisse zu den selektierten Wirkungskategorien (Klassifizierung)
- die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte

In den Normen werden keine Wirkungskategorien vorgegeben. Es ist die Aufgabe des Verfassers, der Ökobilanz die Wirkungskategorien auszuwählen.⁵³

In Tabelle 1 wird eine Liste von möglichen Wirkungskategorien angegeben. Der Begriff Schadenskategorie gibt dabei jenen Bereich der Umwelt an, auf den die Wirkungskategorien Einfluss hat.⁵⁴

Wirkungskategorien	Schadenskategorie
Humantoxizität	Menschliche Gesundheit
Effekte auf die Atmung	
ionisierende Strahlung	
photochemische Oxidation	
Ozonschichtzerstörung	Qualität von Ökosystemen
aquatische Ökotoxizität	
terrestrische Ökotoxizität	
aquatische Versauerung	
aquatische Eutrophierung	
terrestrische Versauerung und Eutrophierung	
Landnutzung	Klimaerwärmung
globale Erwärmung	
nicht erneuerbare Energie	Ressourcen
Abbau von Mineralien	

Tabelle 1: Wirkungskategorien und die übergeordneten Schadenskategorien⁵⁵

Der zweite Schritt der Wirkungsabschätzung ist die Klassifizierung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien. Mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren werden die Sachbilanzergebnisse zu einem gemeinsamen Wirkungsindikator zusammengefasst.⁵⁶ Abbildung 6 zeigt diesen Vorgang für Emissionen, die Auswirkungen auf das globale Klima haben.

⁵² Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 24

⁵³ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 205

⁵⁴ Vgl. Jolliet et. al. (2003), S. 325

⁵⁵ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Jolliet et. al. (2003), S. 325

⁵⁶ Vgl. Schmitz/Paulini (1999), S. 10

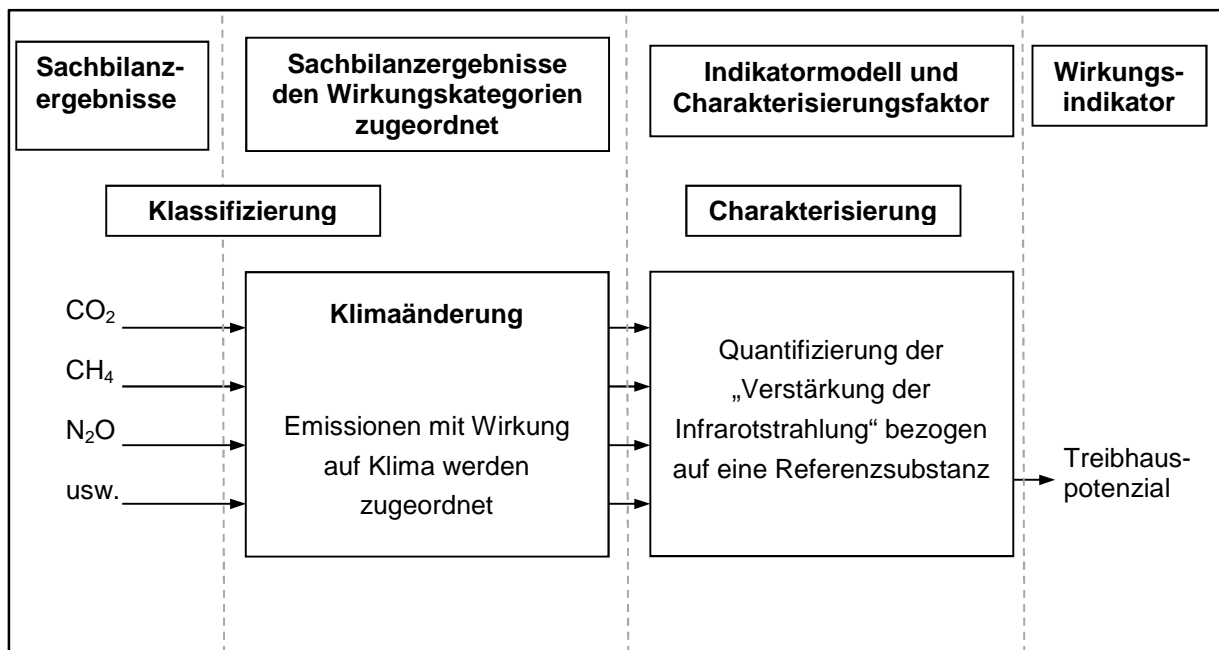


Abbildung 6: Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung am Beispiel der Klimaänderung⁵⁷

Alle Sachbilanzergebnisse, die der Wirkungskategorie Klimaänderung zugeordnet werden, werden auf das Treibhausgaspotenzial oder auch Global Warming Potential (GWP) umgerechnet. Dies wird für jedes Sachbilanzergebnis mit individuellen Charakterisierungsfaktoren berechnet.

Weitere Beispiele zur Klassifizierung von Emissionen sind:

- SO₂, NO_x und HCl als Emissionen mit versauernder Wirkung
- NO_x, P und NH₃ als Emissionen mit eutrophirender Wirkung

2.2.4 Auswertung

Die Auswertung muss mit dem festgelegten Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Studie übereinstimmen. Es sollen daraus Schlussfolgerungen abgeleitet werden können. Ebenso soll sie zum Erläutern von Einschränkungen und zum Aussprechen von Empfehlungen dienen.⁵⁸

⁵⁷ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Klöpffer/Grahl (2009), S. 206

⁵⁸ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2009), S. 22

Die Auswertung nach ISO 14044 umfasst folgende Bestandteile:⁵⁹

- Identifizierung signifikanter Parameter, basierend auf den Daten, die aus der Sachbilanz- und Wirkungsabschätzungsphase ermittelt werden.
- Eine Beurteilung durch eine Vollständigkeits-, Sensitivitäts-, und Konsistenzprüfung
- Schlussfolgerung, Einschränkungen und Empfehlungen

Abbildung 7 zeigt, die Beziehung der Bestandteile der Auswertungsphase den anderen Phasen der Ökobilanz.

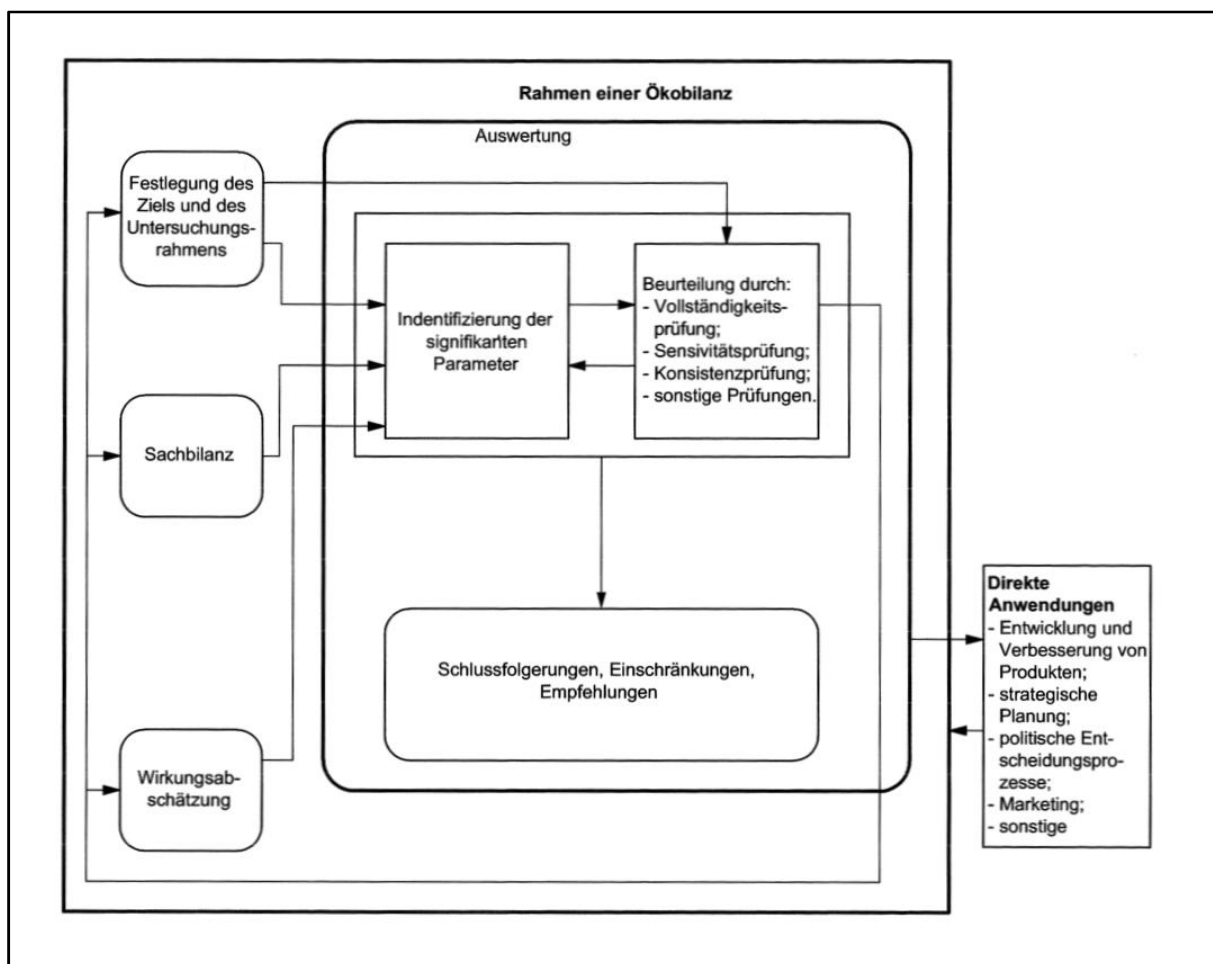


Abbildung 7: Bestandteile der Auswertung und ihre Beziehung zu anderen Bereichen der Ökobilanz⁶⁰

Die Normen machen keine verbindlichen Vorgaben, welche Parameter als signifikant einzustufen sind. Dies ist in der Studie selbstständig anzugeben und zu begründen.⁶¹

⁵⁹ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 31

⁶⁰ Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 32

⁶¹ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 359

Folgende Beispiele können nach ISO 14044 als signifikante Parameter gesehen werden.⁶²

- Daten der Sachbilanz (Energie, Emissionen, Abfall)
- Wirkungskategorien (Klimaänderung, Ressourcenverbrauch)
- Beiträge von Lebenswegabschnitten (Prozessmodule oder Modulgruppen wie Transport oder Energieerzeugung)

Die Vollständigkeitsprüfung dient der Sicherstellung, dass alle nötigen Informationen und die zur Auswertung benötigten Daten verfügbar sind. Sollten Informationen oder Daten fehlen, so ist ihre Notwendigkeit für die Ökobilanz im Hinblick auf Ziel und Untersuchungsrahmen zu überprüfen. Wenn Daten nicht vorhanden sind, die im Rahmen der Studie als relevant errachtet werden, so ist entweder die Sachbilanz und/oder die Wirkungsabschätzung zu überarbeiten oder Ziel und Untersuchungsrahmen sind anzupassen.⁶³

Die Sensitivitätsprüfung dient zur Einschätzung der Unsicherheit in der Ökobilanz. Ursache der Unsicherheiten können in der Qualität der Daten, oder in der Auswahl der Abschneide- und Wirkungskriterien, sowie der Allokation liegen. Diese Art der Prüfung zeigt den Einfluss geänderter Punkte auf das Endergebnis.⁶⁴ Aus ihr können sich folgende Ergebnisse ergeben:⁶⁵

- Die veränderten Daten haben wenig bis gar keine Auswirkung auf das Ergebnis
- Weitere genauere Sensitivitätsprüfungen sind nötig
- Die Gültigkeit der Endergebnisse sind nur innerhalb einer bestimmten Schwankungsbreite gegeben

In der Konsistenzprüfung wird bestimmt ob sich die Annahmen, Methoden und Daten in Einklang mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen befinden. Es sollen dabei die Unterschiede in der Datenqualität entlang des Produktlebens untersucht werden. Sollten Unterschiede feststellbar sein, so ist zu überprüfen ob eventuelle regionale und/oder zeitliche Unterschiede der Daten, einheitlich angewendet worden sind. Auch die Allokationsregeln und Systemgrenzen sind auf ihre konsequente Anwendung auf das Produktsystem hin zu überprüfen. Weiters ist festzustellen, ob die Bestandteile der Wirkungsabschätzung auch einheitlich angewendet wurden.⁶⁶

⁶² Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 33

⁶³ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 34

⁶⁴ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 34; Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 360

⁶⁵ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 360

⁶⁶ Vgl. Österreichisches Normungsinstitut (2006), S. 35

3 Leichtbau

Im vorliegenden Kapitel werden Definitionen, Grundsätzen, konstruktiven Grundkonzepten, Methoden und Werkstoffen die mit dem Thema Leichtbau in Kontext stehen behandelt.

Als Leichtbau werden Konstruktionen und Konzepte bezeichnet, die bei gleichbleibendem Gewicht die Tragfunktion verbessern, oder bei denen auf Grund von funktionellen oder ökonomischen Anforderungen Gewicht reduziert wird, ohne Festigkeit und/oder Steifigkeit, oder andere wesentliche Eigenschaften zu verändern, die die Funktion beeinträchtigen.⁶⁷

Weiters ist festzuhalten, dass der Leichtbau eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft ist, welche sich der Festigkeitslehre, Rechentechnik, Werkstoffkunde und Fertigungstechnik bedient. Jedoch ist die theoretische Beherrschung dieser aufgezählten Gebiete alleine zu wenig. In den letzten Jahren haben sich bestimmte Prinzipien durchgesetzt die nur durch ausreichend Erfahrung in der Konstruktion erworben werden können.⁶⁸

3.1 Spannungsfelder

Das primäre Ziel bei der Dimensionierung von elastomechanisch, thermisch und dynamisch beanspruchten Konstruktionen ist es, in allen Querschnitten die zulässigen Spannungen nicht zu überschreiten. Diese Anforderung gilt ebenso für den Leichtbau, wobei aber ein minimales Bauteilgewicht unter maximaler Ausnutzung angestrebt wird. In der Regel stehen dieser zusätzlichen Anforderung Restriktionen, wie die Grenzwerte für Festigkeit und Verformung im Wege. Deshalb ist in der Praxis oft eine Extremlösung nicht verwirklichtbar, da auf Grund von Werkstoff, Fertigung und/oder Konzept Kompromisse eingegangen werden müssen.⁶⁹

⁶⁷ Vgl. Wiedemann (2007), S. 1f

⁶⁸ Vgl. Klein (2009), S. 1

⁶⁹ ibidem

3.1.1 Kosten

Leichtbaukonzepte müssen sich ökonomisch rechtfertigen. Mehrausgaben für Werkstoff und Fertigung, stehen einer Verringerung der Kosten im Betrieb und/oder einer Erhöhung der Einnahmen durch höhere Nutzlast gegenüber.⁷⁰

Die zusätzlichen Kosten des Leichtbaus ergeben sich durch Mehraufwand in der Ingenieursleistung, der Erprobung und den Mitteln zur Herstellung. Diese, nach Klein als Leichtbauzusatzkosten bezeichneten Kosten, können durch besseres Ausdimensionieren reduziert werden. Andererseits werden sie durch den Einsatz aufwändiger Bauweisen und hochwertiger Werkstoffe gesteigert.⁷¹

Gegenüber konventionellem Stahl (z.B. Baustähle) können hochfeste Stähle bis zu 20% an Masse einsparen, jedoch verursachen sie 15% an zusätzlichen Kosten pro Bauteil. Bei Aluminium steht eine Gewichtseinsparung von 40%, Mehrkosten von 30% gegenüber. Bei einer Gewichtseinsparung durch CFK-Bauteile vom 50% gibt Heuss et. al. zusätzliche Kosten von 470% an. Der Preis von Bauteilen aus CFK soll sich auf Grund von Optimierung in der Herstellung bis 2030 stark reduzieren. Je nach Szenario kann, ausgehend vom gegenwärtigen Preisniveau von einer Reduktion von 45-67% ausgegangen werden.⁷²

Der beschränkende Faktor bei der Massenfertigung von Leichtbaukonzepten, waren bis dato die damit verbundenen Kosten. Seit der Einführung von Zielen zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes und den miteinhergehenden Strafen für die Überschreitung dieser Zeile, machen sich Mehrkosten bezahlt. Die europäische Gesetzgebung schreibt zum Beispiel vor, dass bis 2020 die durchschnittliche Emission aller in der EU produzierten und zugelassenen Fahrzeuge unter 95 g/km liegen muss. Die Strafe auf eine durchschnittliche Flottenemission von 140 g/km würden sich zu diesem Zeitpunkt auf 4.035 €/Fahrzeug belaufen.⁷³

3.1.2 Sicherheit

Da Leichtbauteile den gleichen Sicherheitsanforderungen genügen müssen wie Bauteile bei denen Gewichtsoptimierung nicht im Vordergrund steht, ist bei einer Auslegung auf Steifigkeit, Bruchfestigkeit sowie Zuverlässigkeit und Nutzungsdauer von Leichtbauteilen größere Sorgfalt geboten. Zum Beispiel wird in der

⁷⁰ Vgl. Wiedemann (2007), S. 442

⁷¹ Vgl. Klein (2009), S. 5f

⁷² Vgl. Heuss et. al. (2012), S. 8f

⁷³ Vgl. Heuss et. al. (2012), S. 10f

Luftfahrtindustrie durch festgeschriebene Regeln für Nachweisführung und Prüfung (Luftfahrttechnischen Handbuch) diesen Anforderungen nachgekommen.⁷⁴

Grundsätzlich sind Nachweise bezüglich Tragfähigkeit, Größe der Verformungen, Fließ- und Bruchverhalten sowie des Instabilitätsverhalten zu erbringen. Dazu sind aufwändige Berechnungen und Simulationen erforderlich. Gegenüber statischen Beanspruchungen wird bei dynamischen Belastungen ein Zuverlässigkeitsnachweis gefordert, welcher die Erfüllung einer festgelegten Überlebenswahrscheinlichkeit aller Komponenten vorsieht. Auch ein Nutzungsnachweis in Form eines Betriebs- oder Dauerfestigkeitsnachweises ist durchzuführen. Hierzu wird bei Stahl vielfach eine Mindestanzahl von $2 \cdot 10^6$ Belastungszyklen mit konstanter Amplitude in Höhe der Dauerschwingfestigkeit gefordert. Bei Aluminium ist eine Anzahl von $1 \cdot 10^7$ Zyklen gefordert. Je nach Anwendung haben sich zwei Grundsätze durchgesetzt: Dabei fordert das Prinzip der „safe-life-quality“ eine absolute Schadensfreiheit über die gesamte Nutzungsdauer. Hingegen erlaubt die „fail-safe-quality“ eine Schadenstoleranz die eine ausreichende Resttragfähigkeit verlangt.⁷⁵

⁷⁴ Vgl. Klein (2009), S. 7f

⁷⁵ Vgl. Klein (2009), S. 7f

3.2 Leichtbauökonomie

Der Grad der Gewichtsreduzierung besitzt in Zusammenhang mit Ökonomischen Gesichtspunkten in unterschiedlichen Konzepten unterschiedliche Priorität. Nach Wiedemann lassen sich drei grundlegende Leichtbauklassen definieren, die auf die Kosten und Bauteilfunktionen unterschiedlichen Einfluss nehmen. Diese sind der Spar-, Öko- und Zweckleichtbau. Ergänzend wird nach Friedrich den 3 bestehenden Leichtbauklassen noch der Ultraleichtbau hinzugefügt (siehe Abbildung 8).⁷⁶

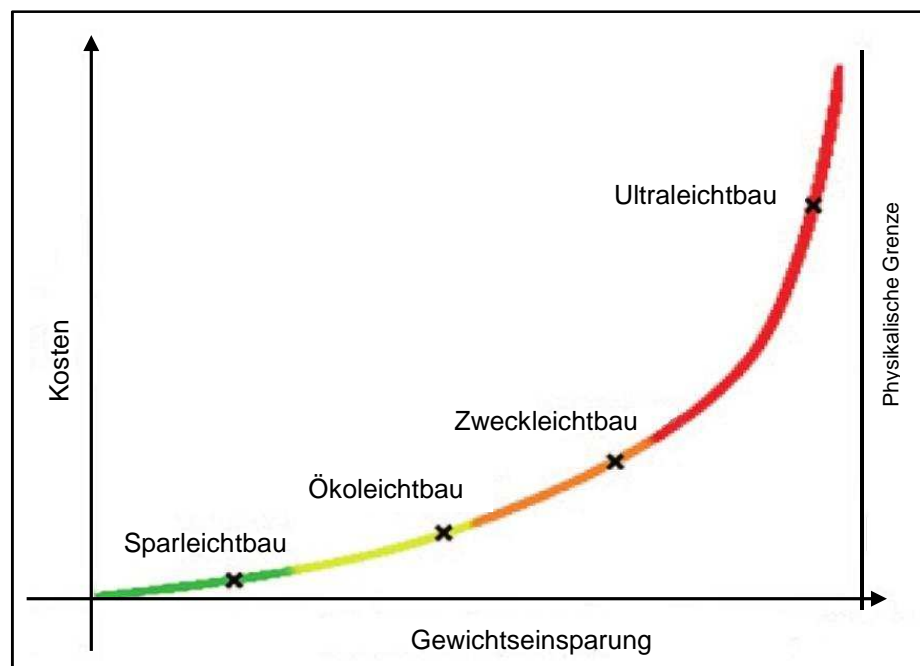


Abbildung 8: Kosten der Gewichtseinsparung⁷⁷

Nach Friedrich gibt die Industrie pauschale Richtlinien vor, an denen potenzielle Optimierungen bewertet werden können. Im Falle des Leichtbaus sind dies die akzeptablen Mehrkosten pro Kilogramm. Diese Werte variieren je nach Industrieunternehmen und Produktbranche (siehe Tabelle 2).⁷⁸

⁷⁶ Vgl. Wiedemann (2007), S. 2; Vgl. Friedrich (2013), S. 48

⁷⁷ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Friedrich (2013), S. 48

⁷⁸ Vgl. Friedrich (2013), S. 48

Branche	Mehrkosten [€/kg]
Raumfahrt	5000
Luffahrt	500
Automobilindustrie	5
Schienegebunden	1-3

Tabelle 2: Akzeptable Mehrkosten pro eingesparter Masse⁷⁹

3.2.1 Spar Leichtbau

Bei diesem Konzept steht nicht der Leichtbau im Vordergrund, sondern die Einsparung von Material- und Herstellungskosten. Erreicht wird dies durch die gezielte Einsparung von Material durch Abmagerung und funktionsgerechteres Gestalten.⁸⁰

Als Beispiel kann in der Automobilindustrie der Einsatz von hochfesten Stählen an Stelle von konventionellen Stählen angeführt werden. Der Einsatz von Aluminium und CFK-Bauteilen schließt sich auf Grund der hohen Kosten aus.⁸¹

Auch durch Verwendung alternativer Werkstoffe, welche einen reduzierten Fertigungsaufwand zur Folge haben, können Kosten und Gewicht eingespart werden.⁸²

3.2.2 Öko-Leichtbau

Diese Methode des Leichtbaus bezieht sich indirekt auf das ökonomische Prinzip. Indirekt da sich die gewichtsreduzierenden Maßnahmen in der Herstellung und im Materialaufwand als kostenintensiver darstellen, aber über Umwege, zum Beispiel während der Nutzung, Energie und somit Kosten eingespart werden.⁸³

3.2.3 Zweckleichtbau

Leichtbau ist hier ein Mittel zur Erfüllung einer klar definierten Anforderung. Vor allem wenn es um das Beherrschen hoher Beschleunigungskräfte geht, ist diese Methode der Gewichtsreduktion unabdingbar. Gleiches gilt bei der Realisierung von Bauteilen

⁷⁹ Vgl. Friedrich (2013), S. 48, eigene Darstellung

⁸⁰ Vgl. Wiedemann (2007), S. 2

⁸¹ Vgl. Heuss et. al. (2012), S. 14

⁸² Vgl. Wiedemann (2007), S. 2

⁸³ ibidem

und Bauwerken mit großen Abmessungen. Als Beispiele sind die Avionik, Brücken- und Kranbau sowie dynamisch hochbelastete Bauteile in der Robotik und in der Fahrzeugtechnik zu nennen. Die Herstellungskosten spielen dabei eine untergeordnete Rolle.⁸⁴

3.2.4 Ultraleichtbau

Im Ultraleichtbau wird stets die leichtest mögliche Variante gewählt. Kosten spielen hierbei keine Rolle. Bereiche in denen der Ultraleichtbau Anwendung findet, sind zum Beispiel die Raumfahrt, die Medizin und der Motorsport. Aber auch in andern Sportarten wie zum Beispiel in olympischen Disziplinen findet sich diese Methode des Leichtbaus wieder.⁸⁵

3.3 Leichtbauwerkstoffe

Die Entwicklungen der Werkstoffwissenschaften in den letzten Jahrzehnten haben das Leichtbaupotential enorm gesteigert und Grundkonzepte in der Konstruktion verändert. Nicht nur leichtere Bauteile die eine immer höhere Steifigkeit besitzen bezeichnen den Fortschritt, sondern auch der Grad der funktionalen Integration steigt weiter an. So werden aktive Elemente in die Werkstoffsysteme implementiert und öffnen dadurch neue Gebiete für aktiv reagierende mechanische Struktursysteme (Adaptronik).⁸⁶

Dem gegenüber steht das Ziel, Werkstoffe in einem Kreislauf zu führen, sowie zunehmende Restriktion von Recyclingverordnungen, wie zum Beispiel die Richtlinie des europäischen Parlaments für Altfahrzeuge (Richtlinie 2000/53/EG)⁸⁷.

Da Energie und Rohstoffe nicht unbegrenzt vorhanden sind, und auch der Raum für Deponien limitiert ist, ist es unumstößlich, in die Wiederverwertung zu intensivieren. Dies hat positive Einflüsse auf wirtschaftlicher Ebene, da sowohl Energie- und Materialkosten, als auch die Kosten der Deponierung gesenkt werden können.⁸⁸

Die Vielfalt der Leichtbauwerkstoffe ist mittlerweile beachtlich und reicht von Metallen wie Aluminium und hochfesten Stählen, welche schon seit längerem zum Einsatz kommen, bis hin zu Legierungen aus Titan und Magnesium für höhere Anforderungen. Aber nicht nur Metalle, sondern auch Verbundwerkstoffe in Form von Glasfaser und Kohlenstofffaser Verstärkte Kunststoffe gewinnen schon seit längerem

⁸⁴ Vgl. Funke (2001), S. 3; Vgl. Heuss et. al. (2012), S. 15; Vgl. Wiedemann (2007), S. 2

⁸⁵ Vgl. Friedrich (2013), S. 48ff

⁸⁶ Vgl. Klein (2009), S. 2

⁸⁷ Vgl. Meyer (2007), S. 8

⁸⁸ Vgl. Ostermann (2007), S. 743

in der Luftfahrt und in letzter Zeit auch in der Automobilindustrie an Bedeutung. Die Entscheidung bezüglich des Materialeinsatzes muss schon zu Beginn des Entwicklungsprozesses getroffen werden. Dazu dienen Kenn- und Vergleichswerte, die dabei helfen, die Werkstoffwahl qualifiziert und den Anforderungen gerecht zu treffen.⁸⁹

Im Folgenden wird auf die Werkstoffe Stahl und Aluminium sowie auf CFK (Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff) eingegangen, da diese Werkstoffe in der Lebenszyklusanalyse der Karosseriekonzepte dieser Arbeit untersucht werden.

3.3.1 Stahl

Stahl gehört zur Gruppe der Eisenwerkstoffe. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass ihr Eisengehalt höher ist als der jedes anderen Legierungselementes. Weitere Vertreter der Eisenwerkstoffe sind Gusseisenlegierungen. Die beiden Eisenwerkstoffe unterscheiden sich durch ihren Kohlenstoffgehalt und besitzen sehr unterschiedliche Eigenschaften. Der Kohlenstoffgehalt der Stähle liegt in etwa unter 2%, jener der Gusseisenwerkstoffen darüber. Während Stähle sich zur Umformung eignen, geschieht die Formgebung der Gusseisenwerkstoffe durch Urformen z.B. Gießen.⁹⁰

In den folgenden Kapiteln werden die Herstellung, die Eigenschaften und das Recycling von Stahl beschrieben

3.3.1.1 Stahlherstellung

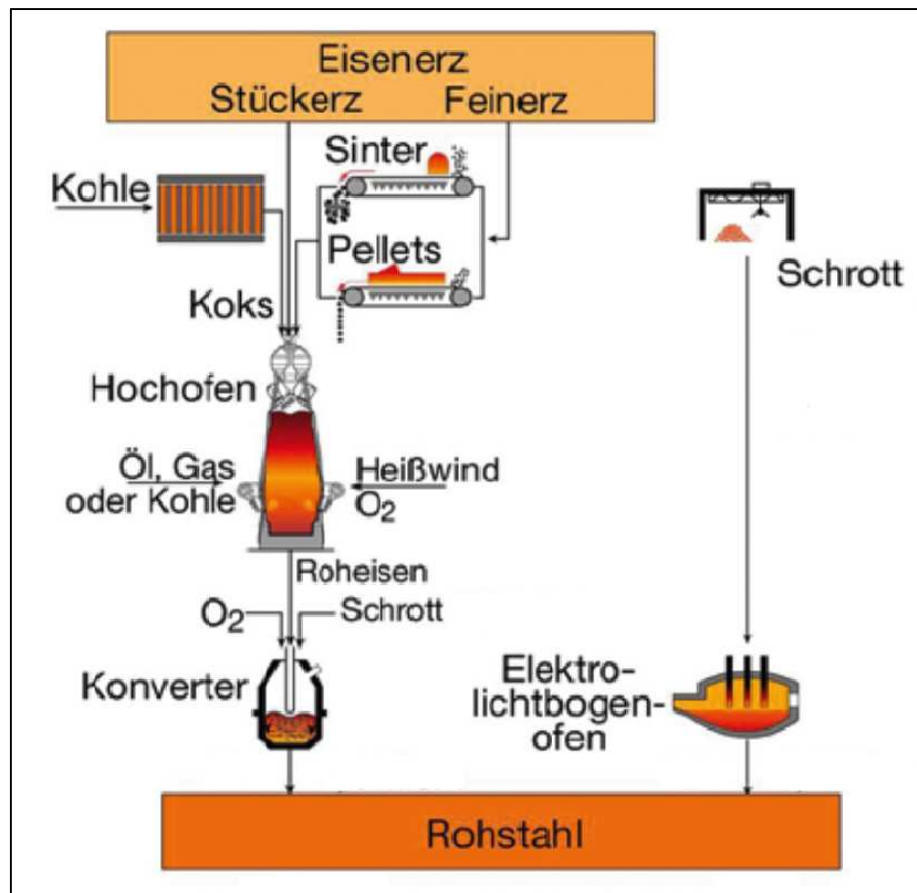
Global betrachtet kommen heute im Wesentlichen zwei Verfahren zur Stahlerzeugung zum Einsatz. Dies ist die Herstellung aus Eisenerz und aus Stahlschrott. Im weiteren Verlauf werden diese beiden Verfahren näher beschrieben. Der Vollständigkeit halber werden die Sonderverfahren Vakuum-Vergießen, Elektroschlackenumschmelzverfahren und Kernzonenumschmelzverfahren erwähnt. Dabei handelt es sich um zusätzliche Behandlungsschritte im Herstellungsprozess die zur Verbesserung der Stahleigenschaften und des Reinheitsgrades dienen. Auf diese Verfahren wird jedoch nicht näher eingegangen wird.⁹¹

Abbildung 9 zeigt den Ablauf der beiden am häufigsten verwendeten Verfahren zur Rohstahlherstellung.

⁸⁹ Vgl. Klein (2009), S. 23

⁹⁰ Vgl. Berger/Kloos (2012), S. E32

⁹¹ Vgl. Berger/Kloos (2012), S. E33f

Abbildung 9: Zwei Wege zur Rohstahlherstellung⁹²

Rohstahlerzeugung mit Eisenerz als Ausgangsprodukt

Die Erzgewinnung steht am Beginn dieses Prozesses. Das Erz kann Untertage oder im Tagebau gewonnen werden.⁹³

Tabelle 3 führt die fünf größten Erzproduzierenden Länder der Welt sowie die weltweite Produktion und Reserven an.

Land	Erzprod. 2011 [mil. t/Jahr]	Reserven [mil. t]
China	1.300	23.000
Australien	525	35.000
Brasilien	375	29.000
Indien	245	7.000
Russland	100	25.000
Weltweit	3.000	170.000

Tabelle 3: Eisenerzproduktion und Reserven⁹⁴

⁹² Dahlmann et. al. (2010), S. 2

⁹³ Vgl. Roos/Maile (2008), S. 139

⁹⁴ Vgl. Tuck (2013), S. 85, eigene Darstellung

Der nächste Schritt nach dem Abbau ist das Brechen (zerkleinern) des Erzes zum Stückerz, um das eisenhaltige Gestein von der sogenannten Gangart, dem nicht eisenhaltigen Gestein zu trennen. Danach wird es der Eisenherstellung im Hochofen zugeführt (siehe Abbildung 9).⁹⁵

Neben dem Eisenerz werden sogenannter Sinter oder Pellets benötigt. Zur Sinterherstellung wird feinkörniges Eisenerz agglomeriert d.h. stückig gemacht. Dem Sinter werden Schlackebinder beigemischt damit eine Verschlackung der restlichen Gangart im Hochofen erfolgen kann.⁹⁶

Dritter Ausgangsstoff ist aus schwefelarmer Kohle hergestellter Koks, der als Reduktionsmittel, Brennstoff und Aufkohlungsmittel im Hochofenprozess dient.⁹⁷

Der Hochofen wird von oben durch Öffnen einer Glockenschleuse, welche als Gicht bezeichnet wird, abwechselnd mit Koks und Möller beschickt. Als Möller wird ein Gemisch aus Eisenerz, Sinter und noch vorhandener Gangart bezeichnet. Bei Temperaturen bis zu 2000°C wird das Erz im Hochofen zu Roheisen reduziert. Es wird dabei mit Sauerstoff und Kohlenstoff, Kohlenmonoxid erzeugt, welches als Reduktionsgas dient und dem oxidischen Eisenerz den Sauerstoff entzieht. In diesen bis zu 40m hohen Öfen können täglich an die 12000t Roheisen hergestellt werden.⁹⁸

Da das Roheisen neben anderen schädlichen Elementen wie Schwefel, Phosphor oder Silicium auch noch zu viel Kohlenstoff enthält, muss der Anteil dieser Stoffe im Sauerstoffblaskonverter reduziert werden. Hierbei wird auf die Schmelze Sauerstoff aufgeblasen, welcher mit dem im Roheisen gelösten Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid reagiert. Auch die anderen angeführten Elemente reagieren mit dem Sauerstoff und lösen sich in der Schlacke, welche an der Oberfläche der Schmelze schwimmt. Dieser Prozess aus Verschlackung und Oxidation wird auch Frischen genannt. Durch die Oxydation entsteht Wärme, welche die Schmelze flüssig hält. Zur Kühlung wird gegebenenfalls Eisenschrott zugeführt. Bei der Zuführung größerer Schrottmengen muss beheizt werden. Um aus dem Roheisen Rohstahl mit hoher Qualität herstellen zu können, werden im vorher beschriebenen Prozess Analyseverfahren und rechnergestützte Prozesskontrollen durchgeführt.⁹⁹

⁹⁵ Vgl. Roos/Maile (2008), S. 139

⁹⁶ Vgl. Dahlmann et. al. (2010), S. 3ff

⁹⁷ Vgl. Dahlmann et. al. (2010), S. 3; Vgl. Roos/Maile (2008), S. 140

⁹⁸ Vgl. Dahlmann et. al. (2010), S. 5; Vgl. Roos/Maile (2008), S. 140

⁹⁹ Vgl. Vgl. Berger/Kloos (2012), S. E33; Vgl. Roos/Maile (2008), S. 142

Rohstahlerzeugung mit Eisenschrott als Ausgangsprodukt

Beim zweiten Verfahren wird mit Hilfe von elektrischer Energie, über einen Lichtbogen, Stahlschrott eingeschmolzen. Der Lichtbogen geht von einer Graphitelektrode auf den Eisenschrott bzw. die Schmelze über und bringt so die erforderliche Wärme ein. Der benötigte Sauerstoff für das Frischen wird entweder zusätzlich in die Schmelze eingeblasen oder er stammt aus dem im Schrott enthaltenen Eisenoxid.¹⁰⁰

Tabelle 4 führt die fünf größten Rohstahlproduzierenden Länder der Welt sowie die weltweite Produktion an.

Land/Region	Stahlproduktion [10 ³ t/Jahr]
China	779.040
EU (27)	165.601
Japan	110.570
USA	86.955
Indien	81.213
Weltweit	1.582.493

Tabelle 4: Rohstahlerzeugung nach Ländern bzw. Regionen 2013¹⁰¹

Weiterverarbeitung des Rohstahls zu Stahl

Um nach dem Frischen die Qualität des Stahls weiter zu heben, wird mittels der sogenannten Pfannenmetallurgie die Stahlschmelze von Gasen und Verunreinigungen befreit. Entkohlung und die Entfernung von Wasserstoff geschehen unter Vakuum, bei anderen Verfahren wie der Entschwefelung oder der Entphosphorung werden Stoffe zugeführt, die die Elemente binden bzw. mit ihnen reagieren.¹⁰²

¹⁰⁰ Vgl. Dahmann et. al. (2010), S. 2f; Vgl. Roos/Maile (2008), S. 144

¹⁰¹ Vgl. o.V. (2013a), S. 1, eigene Darstellung

¹⁰² Vgl. Roos/Maile (2008), S. 145

3.3.1.1 Eigenschaften von Stahl

Welche Eigenschaften ein Stahl besitzt hängt von seiner chemischen Zusammensetzung und somit von Stahlbegleitern, Spurenelementen und Legierungselementen ab (siehe Tabelle 5). Als Stahlbegleiter (z.B. Si, Mn, S, P...) und Spurenelemente (z.B. Sn, Cu, Nb...) werden Elemente bezeichnet, die bereits im Stahl enthalten sind. Sie gelangen durch Erze oder den Eisenschrott in den Stahl. Ihr Anteil wird soweit es technisch und wirtschaftlich möglich ist in Grenzen gehalten, um ihren negativen Einfluss auf die gewünschten Stahleigenschaften zu begrenzen. Legierungselemente hingegen sind Elemente die bewusst und in definierten Mengen dem Stahl hinzugegeben werden, um gewisse Eigenschaften zu erzielen.¹⁰³

Nach DIN EN 10020 werden Stähle in unlegierte, legierte und nichtrostende Stähle eingeteilt. Bei unlegierten Stähle unterliegen die Legierungselementen bestimmten Grenzwerten (z.B. Cr < 0,30% oder Mo < 0,08%)¹⁰⁴

Physikalische Eigenschaft	
Dichte	7,35-7,86 * 10 ³ kg/m ³
Elastizitätsmodul	180-207 GPa
Wärmeleitfähigkeit	25-80 W/mK
Zugfestigkeit	200-2120 MPa
Härte	100-830 HVC

Tabelle 5: Spektrum ausgewählter physikalischer Eigenschaften von Stahl¹⁰⁵

Für diese Arbeit sind besonders Stahlwerkstoffe für den Automobilbau von Bedeutung.

Von Mitte der neunziger Jahre bis heute hat sich die durchschnittliche Mindestdehngrenze der eingesetzten Stähle im Karosseriebau verdoppelt, da der Werkstoff Stahl mit anderen Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium, Magnesium und Kunststoff im Wettbewerb steht. Das eingesetzte Spektrum reicht von kaltgewalzten Stählen mit Zugfestigkeiten von 120-420 MPa bis zu warmgewalzten Stählen mit

¹⁰³ Vgl. Roos/Maile (2008), S. 153

¹⁰⁴ Vgl. Roos/Maile (2008), S. 160

¹⁰⁵ Vgl. Friedrich (2013), S. 207, eigene Darstellung

Zugfestigkeit von bis zu 1200 MPa. Kaltgewalzte Stähle mit ähnlicher Festigkeit sind in Entwicklung.¹⁰⁶

3.3.1.2 Stahlrecycling

In der Stahlindustrie werden 3 verschiedene Recyclingformen unterschieden:¹⁰⁷

- Die Verwendung bereits eingesetzter Produkte aus Stahl (Stahlschrott)
- Die Verwendung oder Mehrfachverwendung von Hilfsstoffen und Abraum aus der Herstellung bzw. deren Verwendung in derselben oder einer anderen Produktionsebene.
- Sonstige stoffliche und thermische Verwendung von Abfall und Nebenprodukten

Stahlschrott wird in der Regel nicht als Abfall, sondern als Rohstoff gesehen. Dabei unterscheidet man drei verschiedene Arten des Stahlschrotts: den Eigenschrott, den Neuschrott und den Altschrott. Eigenschrott und Neuschrott sind beides Abfallprodukte in der Stahl- bzw. Produktherstellung. Sie können meist sortenrein wieder der Stahlerzeugung zugeführt werden. Auf Grund immer besserer Herstellungsverfahren ist der Anteil dieser beiden Schrottsorten rückläufig. Dadurch wird die Gewinnung von Stahl aus Abfallprodukten mit hohem Eisenanteil immer wichtiger.¹⁰⁸

Bei der Gewinnung von Altschrott aus Gütern die das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht haben, steht neben dem Sortieren, Schneiden, Brechen und Pressen das Schreddern im Vordergrund. Nach dem Zerkleinern im Schredder werden die eisenhaltigen Anteile magnetisch vom restlichen Schreddermaterial getrennt. Global betrachtet werden heute in etwa 25 Millionen Tonnen Stahl pro Jahr auf diesem Wege wieder dem Produktionskreislauf zugeführt. So belief sich zum Beispiel in Deutschland der gesamte Einsatz von Schrott im Jahr 2006 auf 19,6 Mio. Tonnen. Dadurch mussten 635 Mio. Tonnen Erz nicht gefördert werden und 60% der Primärenergie zur Stahlerzeugung konnten ebenfalls eingespart werden. Weltweit steigt der Bedarf an Stahlschrott.¹⁰⁹

3.3.2 Aluminium

Erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde Aluminium als technischer Werkstoff bekannt. Ein Grund dafür ist, dass die notwendigen Prozesse zur

¹⁰⁶ Vgl. Braess/Seiffert (2012), S. 420f

¹⁰⁷ Vgl. Roos/Maile (2008), S. 375

¹⁰⁸ Vgl. Roos/Maile (2008), S. 375f

¹⁰⁹ Vgl. Roos/Maile (2008), S. 376f

Aluminiumoxidreduzierung erst zu jener Zeit entwickelt wurden. Aluminiumoxid (Al_2O_3) ist eine äußerst stabile chemische Verbindung und seine Reduktion zu Aluminium sehr energieaufwendig.¹¹⁰

In den folgenden Kapiteln werden die Herstellung, die Eigenschaften und das Recycling von Aluminium beschrieben.

3.3.2.1 Aluminiumherstellung

Der Ausgangsstoff zur Aluminiumherstellung ist Bauxit. Mehrheitlich besteht das Erz aus verschiedenen Aluminiumoxiden. Weiters setzt es sich aus Bestandteilen wie Eisen-, Silizium- und Titanoxiden zusammen. Hauptabbaugebiete für Bauxit sind Australien und China (siehe Tabelle 6).¹¹¹

Länder	Bauxitprod. 2012 [mil. t/Jahr]	Reserven [mil. t]
Australien	73	6.000
China	48	830
Brasilien	34	2.600
Indonesien	30	1.000
Indien	20	900
Weltweit	263	28.000

Tabelle 6: Bauxitproduktion und Reserven¹¹²

Aus Bauxit wird Aluminiumoxid, welches auch als Tonerde bezeichnet wird, gewonnen (Abbildung 10). In einem Steinbrecher wird das Bauxit von den Fremdstoffen getrennt und anschließend in einem Drehofen getrocknet und fein gemahlen. Danach wird es, unter Zusatz von Dampf, mit heißer 50%iger Natronlauge vermischt. In einem Autoklaven wird diese Mischung zwei bis drei Stunden, bei sechs bis acht bar und 150-180°C aufgeschlossen. Das hierbei entstandene Natriumaluminat (NaAlO_2) wird gefiltert, um es von den übrigen Bestandteilen zu trennen, welche als Rotschlamm bezeichnet werden. Während der Abkühlung setzt sich Aluminiumhydroxid von der Natronlauge ab, und wird gewaschen und getrocknet. Die Natronlauge wird anschließend wiederverwendet und dem Prozess zugeführt. Das Aluminiumhydroxid wird dann in einem Wirbelschichtofen bei 1100°C entwässert. Das Endprodukt dieses Prozesses ist Aluminiumoxid, welches als feines

¹¹⁰ Vgl. Roos/Maile (2008), S. 234

¹¹¹ Vgl. Ostermann (2007), S. 739

¹¹² Vgl. Bray (2013), S. 27, eigene Darstellung

weißes Granulat vorliegt. Zur Herstellung von einer Tonne Aluminiumoxid werden ungefähr 2,3 Tonnen Bauxit benötigt.¹¹³

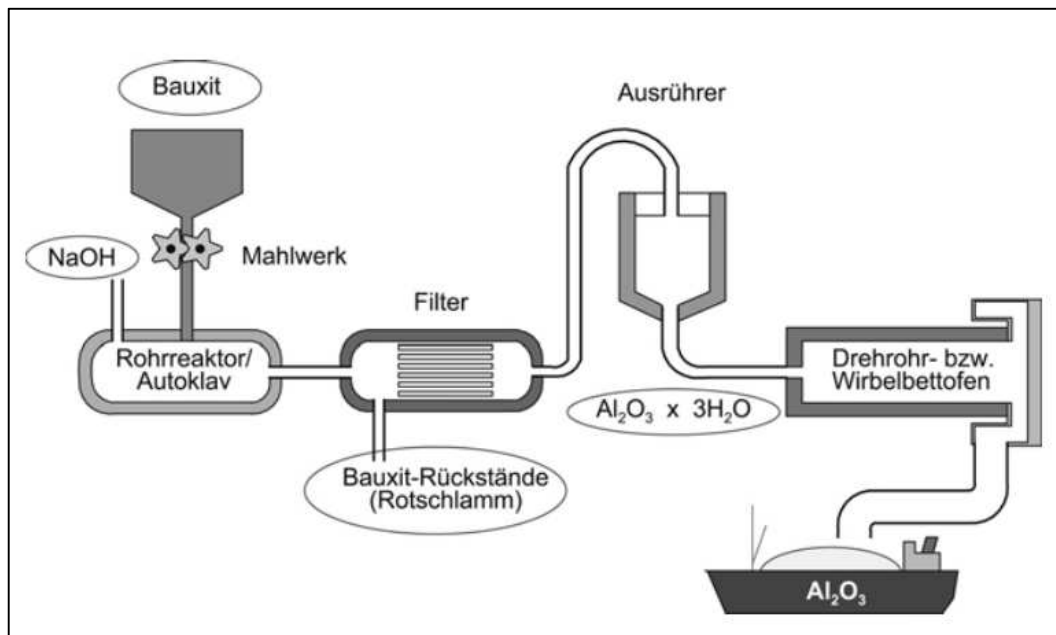


Abbildung 10: Prozessschema der Aluminiumoxidgewinnung¹¹⁴

Der nächste Schritt in der Aluminiumherstellung besteht in der Reduktion des Aluminiumoxids mittels Schmelzflusselektrolyse (Abbildung 11). Dies ist ein kontinuierlicher Prozess der bei Temperaturen von 950-970°C abläuft. Als Elektrolyt fungiert geschmolzenes Kryolith ($\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$), in welchem das Aluminiumoxid gelöst ist. Dadurch kann die Schmelztemperatur von Al_2O_3 von 2050°C auf 950-1000°C gesenkt werden. Das flüssige Aluminium scheidet sich ab und fungiert als Kathode. Blöcke aus Pech, Graphit oder Petrolkoks werden als Anode verwendet. Beim Verzehr der Anode werden Kohlenmonoxid und Kohlendioxid freigesetzt. Durch Mittenbeschickung wird der an Aluminiumoxid verarmenden Kryolithschmelze frisches Al_2O_3 zugeführt. Das flüssige Metall wird abgesaugt und in fester oder flüssiger Form den nächsten Stationen im Produktionsprozess zugeführt.¹¹⁵

¹¹³ Vgl. European Aluminium Association (2013), S. 19f; Vgl. Roos/Maile (2008), S. 234

¹¹⁴ Ostermann (2007), S. 740

¹¹⁵ Vgl. Ostermann (2007), S. 740; Vgl. Roos/Maile (2008), S. 234f

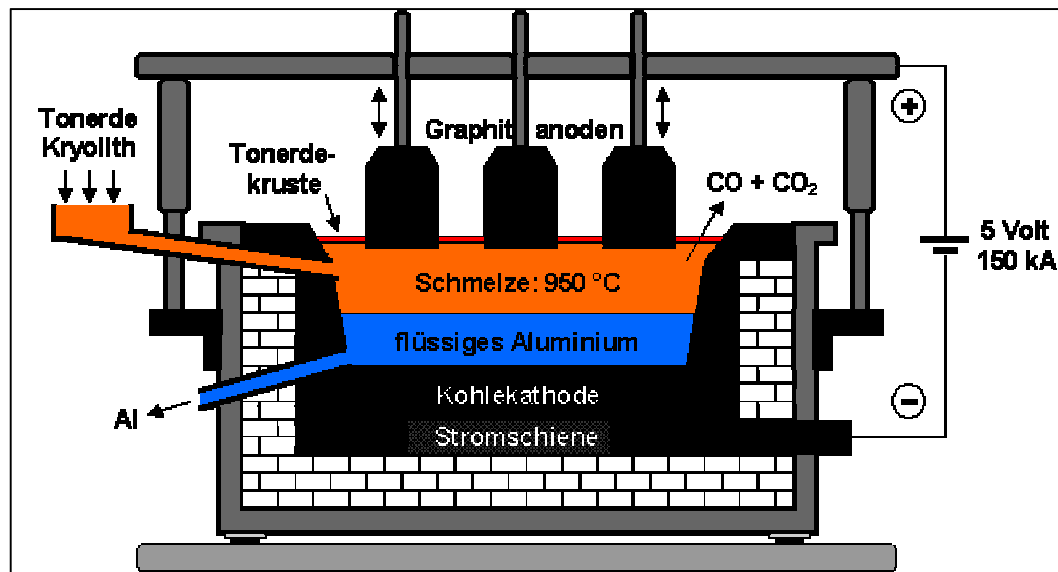


Abbildung 11: Elektrolyseofen zur Aluminiumherstellung¹¹⁶

China ist bei der Menge des produzierten Primäraluminiums weltweit Vorreiter (siehe Tabelle 7). Dies ist jedoch nicht nur auf das Vorkommen von natürlichen Ressourcen zurückzuführen, sondern auch auf staatliche Förderung und die Handelspolitik des Landes. Weitere wichtige Produzenten sind energiereiche Regionen wie Russland, Kanada und der Nahe Osten.¹¹⁷

Land/Region	Aluminiumproduktion [10^3 t/Jahr]
China	16.029
Russland	3.699
Canada	2.877
Mittlerer Osten	2.466
Australien	2.055
Weltweit	41.100

Tabelle 7: Aluminiumproduktion nach Ländern bzw. Regionen 2010¹¹⁸

¹¹⁶ o.V. (2013b), Zugriffsdatum 21.02.2014

¹¹⁷ Vgl. Nappi (2013), S. 20

¹¹⁸ Vgl. Nappi (2013), S. 19, eigene Darstellung

3.3.2.1 Eigenschaften von Aluminium

Ausgeprägte Unterschiede von Aluminium gegenüber Stahl sind:¹¹⁹

- geringes spezifisches Gewicht
- geringerer Elastizitätsmodul
- höheres Verhältnis von Festigkeit zu E-Modul
- höhere Wärmeausdehnung
- Festigkeitsverlust in der Wärmeeinflußzone von Schweißverbindungen
- Gestaltungsvielfalt bei Strangpreßprofilen und Fließpreßteilen
- Günstigeres Korrosionsverhalten
- spezifisch höhere Materialkosten

Aluminiumlegierungen bestehen neben dem Basismetall Al aus einem oder mehreren Legierungselementen. Die sechs wichtigsten sind Cu, Si, Mg, Zn, Mn sowie Li. Durch die Zugabe dieser Legierungselemente werden Eigenschaften wie Gießbarkeit oder Festigkeit verbessert bzw. erhöht. Aluminiumlegierungen werden nach Roos/Maile und Berger/Kloos in Knetlegierungen und Gusslegierungen eingeteilt.¹²⁰

Bei Knetlegierungen unterscheidet man zwischen aushärtbaren und nicht-aushärtbaren bzw. naturharten Legierungen. Bei aushärtbaren Legierungen wird die Festigkeit durch Wärmebehandlung gesteigert, bei naturharten durch Mischkristallhärten und Kaltverfestigen. Warmaushärtbare Legierungen werden zum Beispiel im Automobilbau in der Außenhautfertigung eingesetzt. Die Aushärtung der Bauteile erfolgt im Anschluss an den Lackierprozess in Trockenkammern.¹²¹

Aluminium-Gusslegierungen unterscheiden sich von Knetlegierungen in ihrer chemischen Zusammensetzung z.T. deutlich, da bei ihnen der Verbesserung der Gießeigenschaften eine enorme Bedeutung zukommt. Al-Si- und Al-Si-Mg-Legierungen besitzen neben hervorragenden Gießeigenschaften auch sehr gute Warmrissbeständigkeit und werden bevorzugt im Automobilbau zur Herstellung von Felgen und Fahrwerksteilen verwendet. Zur Herstellung von Kolben für Verbrennungskraftmotoren werden Al-Si-Cu-Ni-Mg-Legierungen eingesetzt, da diese hohe Warmfestigkeit besitzen.¹²²

¹¹⁹ Vgl. Ostermann (2007), S. 677

¹²⁰ Vgl. Berger/Kloos (2012), S. E56; Vgl. Roos/Maile (2008), S. 237

¹²¹ Vgl. Friedrich (2013), S. 268; Vgl. Braess/Seiffert (2012), S. 394f

¹²² Vgl. Roos/Maile (2008), S. 242; Vgl. Berger/Kloos (2012), S. E56

Physikalische Eigenschaft	
Dichte	2,6-2,8 * 10 ³ kg/m ³
Elastizitätsmodul	66-70 GPa
Wärmeleitfähigkeit	235 W/m K
Zugfestigkeit	60-530 MPa
Dehngrenze	44-450 MPa

Tabelle 8: Spektrum ausgewählter physikalischer Eigenschaften von Aluminiumlegierungen¹²³

3.3.2.2 Aluminiumrecycling

Der hohe Aluminiumpreis führt dazu, dass der Aufwand zur Wiederaufbereitung nicht nur energetisch sondern auch wirtschaftlich sinnvoll ist. Genauso wie bei Stahlschrott unterscheidet man auch bei Aluminium zwischen Altschrott, der aus Abfallprodukten stammt und Neuschrott welcher bei der Fertigung anfällt. Ebenso wird sogenannte Krätze, ein Abfallprodukt aus dem Gießprozess, wiederverwertet. Alle diese Rohstoffe sind in der Regel Aluminiumlegierungen. Die Herstellung des rezyklierten Aluminiums (Sekundäraluminium) benötigt 95% weniger Energie als jene des Aluminiums welches aus Bauxit gewonnen wird (Primäraluminium), da die Elektrolyse entfällt. Der Neuschrott wird meist dem ursprünglichen Verwendungszweck zugeführt (z.B. Halbzeugherstellung). Altschrott und die Krätze finden in der Herstellung von Gusslegierungen oder für die Desoxidation in der Stahlherstellung Verwendung.¹²⁴

3.3.3 Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff (CFK)

CFK bestehen aus einem Materialverbund. Deshalb werden Faser- und Matrixwerkstoff in Eigenschaft und Herstellung in den nächsten Kapiteln zunächst getrennt behandelt. In weiterer Folge wird auf die Herstellung und Eigenschaft von Kohlenstofffaser, Matrixmaterial und CFK eingegangen.

¹²³ Vgl. Ostermann (2007), S. 221ff; Vgl. Roos/Maile (2008), S. 235ff, eigene Darstellung

¹²⁴ Vgl. Ostermann (2007), S. 742f

3.3.3.1 CFK-Herstellung

Kohlenstofffaserherstellung

Im 19. Jahrhundert wurden zum ersten Mal Kohlenstofffasern durch Verkokung von Kunstseide hergestellt. Auf den Markt kamen Kohlenstofffasern um 1970. Sie wurden nur in geringen Mengen und zu sehr hohen Preisen gehandelt (1500[€]/kg). Erste Einsatzgebiete waren die Luft- und Raumfahrt.¹²⁵

90% der Ausgangsstoffe (engl. Precursor) zur Kohlenstofffaserherstellung bestehen aus PAN (Polyacrylnitril). PAN-Fasern sind in der Textilindustrie ein Standardprodukt, jedoch muss der Herstellungsprozess von PAN-Fasern, welche zur Kohlenstofffaserherstellung verwendet werden, speziell abgestimmt sein. Die Faser muss nach dem Spinnen stärker verstreckt werden, um eine Vororientierung der Moleküle für die spätere Graphitebenen zu erreichen (siehe Abbildung 12). Ein weiteres Ausgangsprodukt zur Herstellung von Kohlenstofffasern ist Petroleum- oder Steinkohlenpech, welches durch thermische Behandlung in eine Flüssigkristallphase übergeführt wird. Im Anschluss daran wird in einem Schmelz-Spinnprozess daraus die Pechfaser gewonnen. Die weitere Verarbeitung der Pechfaser zur Kohlenstofffaser unterscheidet sich kaum von jener der PAN-Faser.¹²⁶

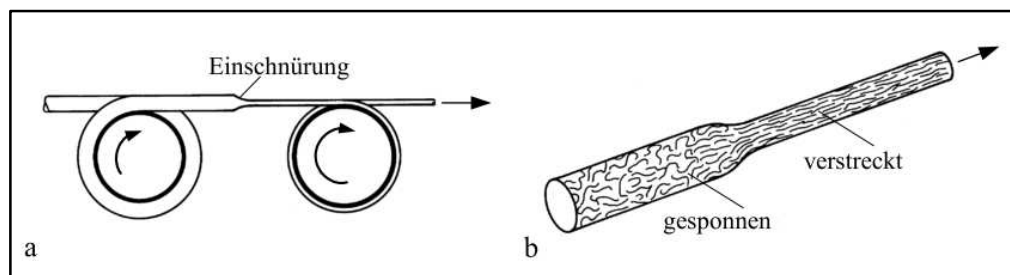


Abbildung 12: a) verstrecken von Fasern b) Molekülkettenorientierung in nur gesponnenem und gestreckten Zustand¹²⁷

PAN-Faserherstellung

Ausgangsprodukt für die PAN-Faserherstellung ist Rohöl. Hergestellt wird die PAN-Faser in einem Lösungsmittelspinnprozess (siehe Abbildung 13). Das PAN muss in einem geeigneten Lösungsmittel (z.B.: Dimethylformamid, Natriumthiocyanat) gelöst werden, da es nicht schmelzbar ist. Durch eine Spinndüse mit bis zu 500.000 Kapillaren wird die Spinnlösung in ein Koagulationsbad (Gerinnungsbad) gesponnen, in dem sich die PAN-Fasern bilden. Anschließend wird das Lösungsmittel

¹²⁵ Vgl. o.V. (2003), S. 8.24

¹²⁶ Vgl. Schürmann (2007), S. 36

¹²⁷ Schürmann (2007), S. 23

ausgewaschen und die Faser verstreckt. Dabei werden die Moleküle in Faserrichtung ausgerichtet.¹²⁸

Ein detailliertes Prozessschema der PAN-Faserherstellung findet sich in Anhang F.

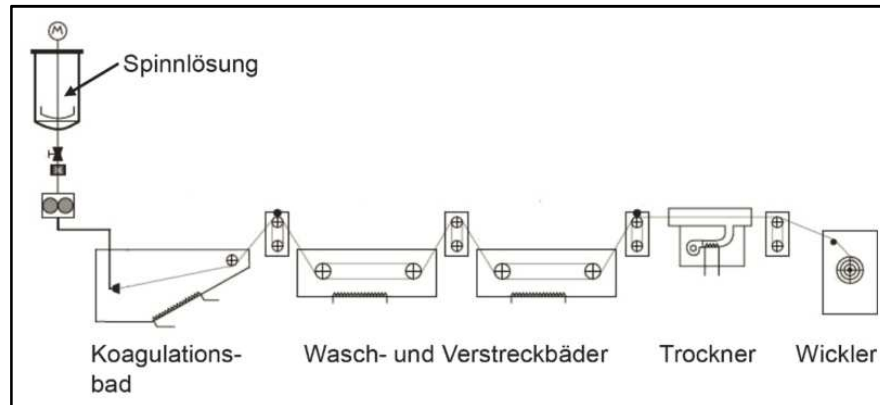


Abbildung 13: PAN-Faserherstellungsprozess¹²⁹

Stabilisierung

Die PAN-Faser ist thermisch nicht stabil. Sie wird bei 200°C-300°C in einer oxidativen Atmosphäre (Luft) in eine unschmelzbare Struktur übergeführt (siehe Abbildung 15). Bei diesem Prozess wird die Faser einer definierten Zugspannung ausgesetzt, da sie ansonst schrumpfen würde. Der Stabilisierungsprozess dauert zwischen 60 und 120 Minuten.¹³⁰

Carbonisierung

In einer Stickstoffatmosphäre und ohne Vorspannung wird die Faser bei Temperaturen von 1.200 bis zu 1800°C carbonisiert. Die Faser verliert 50% ihrer Masse. Es findet ein thermischer Abbau statt, das bedeutet, dass die Nicht-Kohlenstoffatome abgespalten werden. Die Kohlenstoffatome bilden Kohlenstoffringmoleküle.¹³¹

Graphitierung

Im Graphitierungsprozess wird je nach gewünschtem Elastizitätsmodul die Faser in Schutzgasatmosphäre (Stickstoff oder Argon) Temperaturen von 2.000-3.000°C ausgesetzt. Je stärker die Moleküle des Precursors in Faserrichtung ausgerichtet sind d. h. je stärker die Fasern verstreckt wurden, umso höher ist der

¹²⁸ Vgl. o.V. (2003), S. 146f

¹²⁹ o.V. (2013c), S. 147

¹³⁰ Vgl. Schürmann (2007), S. 36; Vgl. o.V. (2013c), S. 146

¹³¹ Vgl. Schürmann (2007), S. 36; Vgl. o.V. (2013c), S. 147

Orientierungsgrad der Graphiteben parallel zur Faserrichtung. Dadurch lässt sich der Elastizitätsmodul der Faser steigern.¹³²

Je nach Prozesstemperatur wird zwischen hochfesten Fasern (1.200-1.500°C), Zwischenmodulfasern (1.500-1.800°C) und Hochmodul- bzw. Ultrahochmodulfasern (bis 3.000°C) unterschieden (siehe Abbildung 14).¹³³

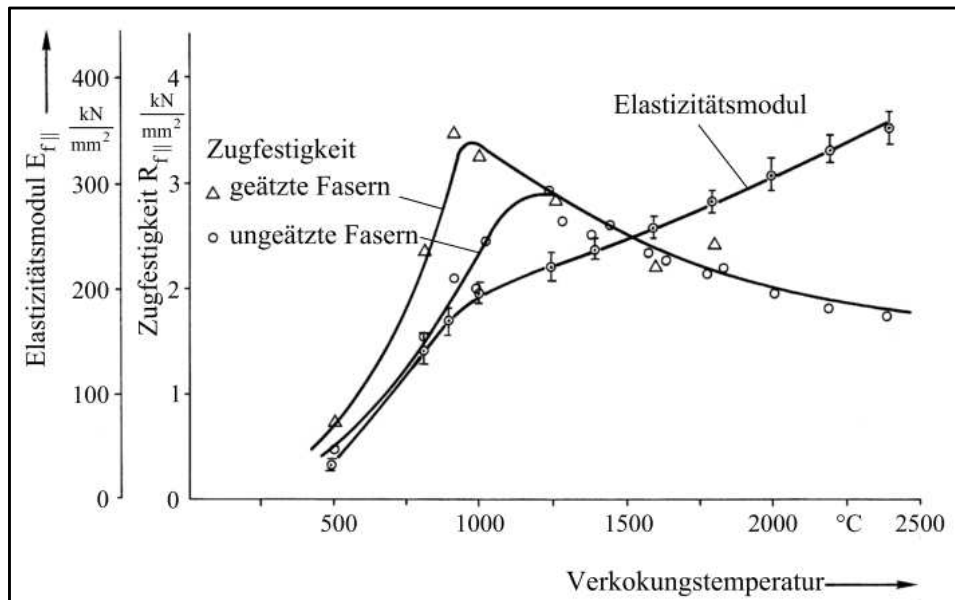


Abbildung 14: Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von Kohlenstofffasern als Funktion der Behandlungstemperatur, sowie Auswirkung der Oberflächenbehandlung auf die Zugfestigkeit¹³⁴

Oberflächenbehandlung

Um eine verbesserte Haftung zwischen dem formgebendem Material (Matrix) und Kohlenstofffaser zu erreichen, werden auf der Faseroberfläche, stabile Oxide erzeugt. Dieser Oxidationsprozess kann nasschemisch mit Salpetersäure oder thermisch an Luft bei Temperaturen >400°C geschehen. Zum Schutz der Faser und ebenso zur besseren Haftung werden zum Abschluss modifizierte Epoxidharze als Schichte aufgebracht.¹³⁵

¹³² Vgl. Schürmann (2007), S. 36f; Vgl. o.V. (2013c), S. 147

¹³³ Vgl. Schürmann (2007), S. 36; Vgl. o.V. (2013c), S. 147

¹³⁴ Schürmann (2007), S. 37

¹³⁵ Vgl. Schürmann (2007), S. 36f

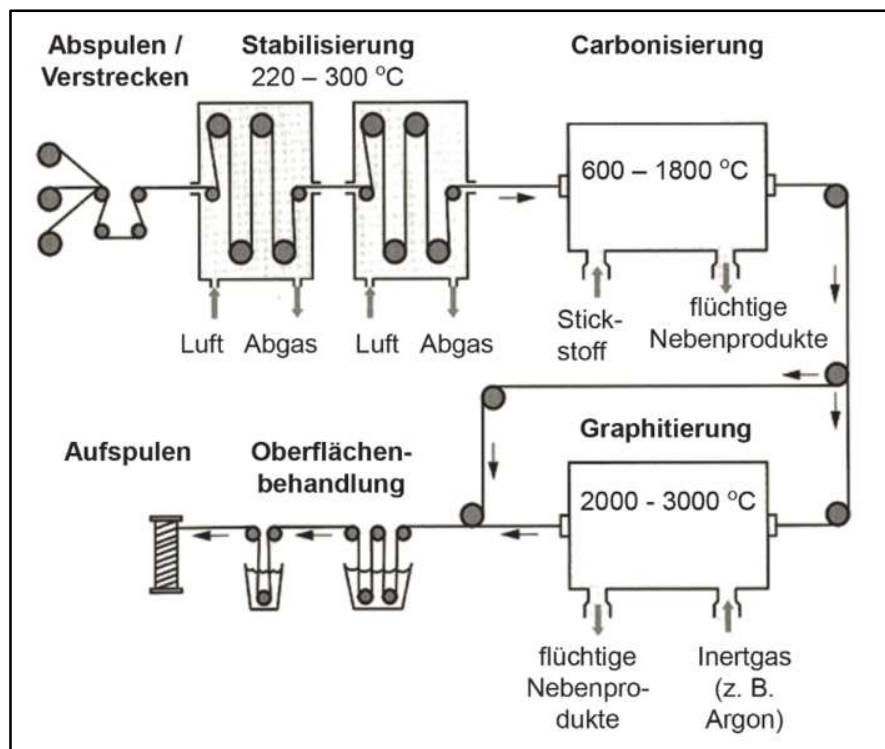


Abbildung 15: Herstellungsprozess der Kohlenstofffaser¹³⁶

Die Weltmarktführer im Bereich der Herstellung von Kohlenstofffasern sind Konzerne in Japan (Toray, Toho und Mitsubishi Rayon [MRC]) und den USA (Zoltek, Hexcel) (siehe Abbildung 16). Die weltweit gesamte mögliche Produktionskapazität lag 2011 bei 90.000 Tonnen pro Jahr. Nach Eickenbusch/Krauss kann davon ausgegangen werden, dass diese in den nächsten Jahren deutlich zunehmen wird.¹³⁷

¹³⁶ o.V. (2013c), S. 148

¹³⁷ Vgl. Eickenbusch/Krauss (2013), S. 9

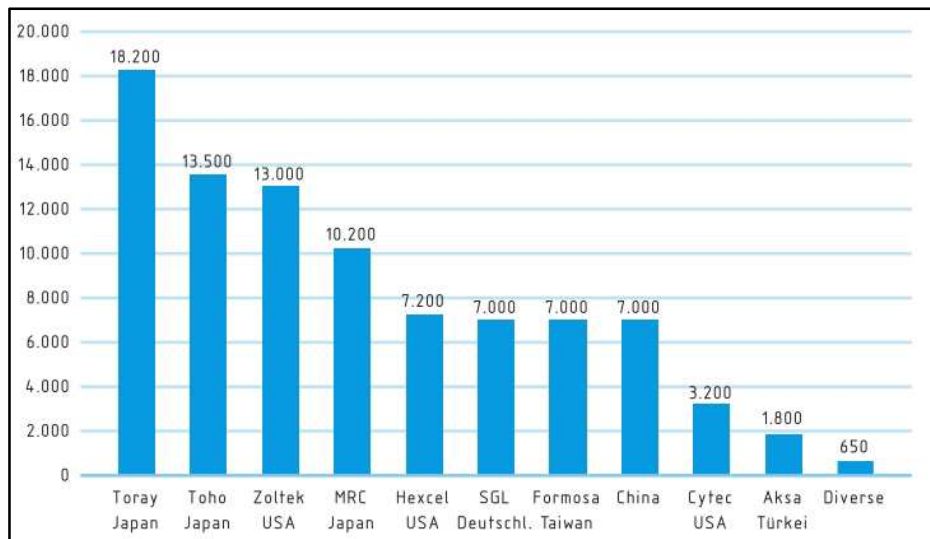


Abbildung 16: Produktionskapazität für Kohlenstofffaser nach Hersteller in Tonnen (2011)¹³⁸

Eickenbusch/Krauss prognostizieren, dass die heutigen Kapazitäten der Kohlenstofffaserherstellung bis 2015 vollkommen ausgelastet sein werden (siehe Abbildung 17). Neben Industrie, Sport und Raumfahrt, die als Hauptabnehmer gelten, werden Zuwachsraten von mindestens 13%, aufgrund der steigenden Nachfrage im Windenergie-, Luftfahrt- und Automobilbereich, erwartet.¹³⁹

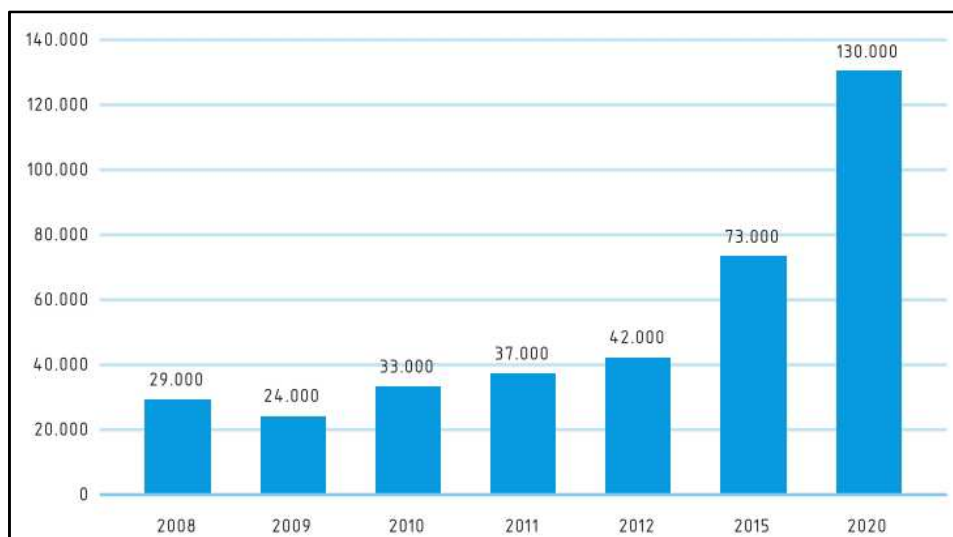


Abbildung 17: Globaler Bedarf an Kohlenstofffaser in Tonnen¹⁴⁰

¹³⁸ Jahn/Karl/Witten (2012), S. 6

¹³⁹ Vgl. Eickenbusch/Krauss (2013), S. 8

¹⁴⁰ Jahn/Karl/Witten (2012), S. 4

Matrixherstellung

Als Matrixmaterial für Kohlenstofffaser verstärkte Kunststoffe können sowohl Duroplaste (z.B. Epoxid-, Polyester-, Vinylesterharze) als auch Thermoplaste (z.B. Polyamid, Polypropylen, Polyetheretherketon) eingesetzt werden. Thermoplastische Matrix ist nach der Herstellung sofort verarbeitungsfähig, und kann nachträglich geschweißt und umgeformt werden. Duroplaste und unter ihnen Epoxidharze werden am häufigsten als Matrixwerkstoff eingesetzt. Ihr Nachteil gegenüber Thermoplasten besteht darin, dass sie sich nach dem Aushärten nicht schweiß- und umformbar sind und in ihrer längeren Aushärzeit. Ihr Vorteil besteht in einer vergleichsweise höheren Zähigkeit und Festigkeit.¹⁴¹

Für die vorliegende Arbeit ist Epoxidharz als Matrixwerkstoff von besonderer Bedeutung, da die aktuell beginnende automobiler Serienfertigung von CFK-Bauteilen im überwiegenden Maße duromere Matrixwerkstoffe und hier vor allem Epoxidharze einsetzt.¹⁴²

Ausgangsstoffe für handelsübliches Epoxidharz sind die Molekülketten Bisphenol A und/oder Bisphenol F zusammen mit Epichlorhydrin. Als Rohstoffe zur Epoxidharzherstellung werden Steinsalz, Rohöl und Erdgas benötigt. Rohöl und Erdgas werden zu den Zwischenprodukten Phenol und Aceton weiter verarbeitet. Bisphenol A und Bisphenol F werden durch Umsetzung von Phenol mit Aceton hergestellt. Aus Steinsalz wird durch Elektrolyse Salzsäure gewonnen. Diese wird mit Ethylenoxid zu Epichlorhydrin umgesetzt. Die Reaktion von Bisphenolen mit dem Epichlorhydrin führt in mehrfachen Stufen und unter Bildung von Wasser und Natriumchlorid zu Diglycidylethern, welches als Epoxidharz bezeichnet wird.¹⁴³

Ein detailliertes Prozessschema der Epoxidharzherstellung kann Anhang G entnommen werden.

Herstellung des CFK-Werkstoffes

Um CFK-Bauteile wirtschaftlich, prozesssicher und ressourcenschonend produzieren zu können wird die Verarbeitung zunehmend automatisiert. Für die Herstellung stehen in Abhängigkeit der geforderten Stückzahl und Bauteilgeometrie unterschiedliche Technologien zur Verfügung (siehe Abbildung 18).¹⁴⁴

¹⁴¹ Vgl. Eickenbusch/Krauss (2013), S. 18

¹⁴² Vgl. Friedrich (2013), S. 401

¹⁴³ Vgl. o.V. (2013c), S. 67; Vgl. Boustead (2005), S. 7

¹⁴⁴ Vgl. Eickenbusch/Krauss (2013), S. 19ff

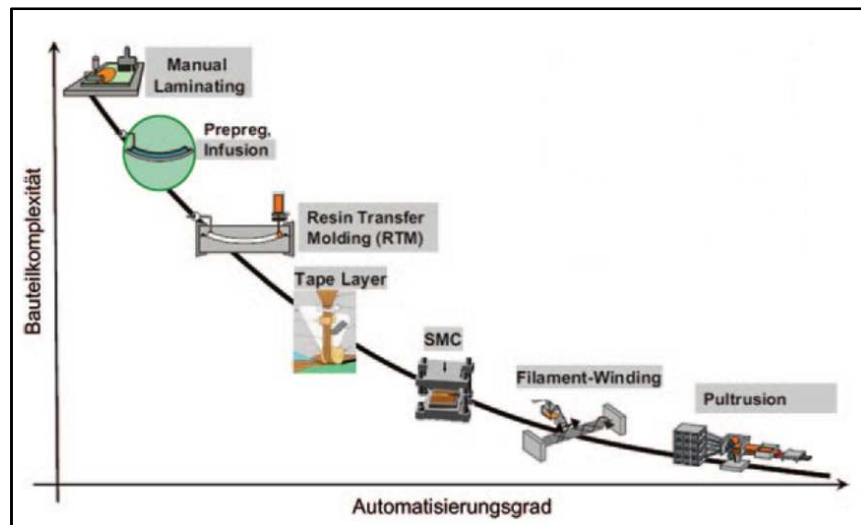


Abbildung 18: CFK-Fertigungsverfahren nach Bauteilkomplexität und Automatisierungsgrad¹⁴⁵

Das RTM-Verfahren (Resin Transfer Moulding) wird sich zur Herstellung von Bauteilen im Automobilbau durchsetzen¹⁴⁶. Daher wird in weiterer Folge näher auf dieses Verfahren eingegangen.

Bis auf geringe Variationsmöglichkeiten ist der Ablauf des RTM-Verfahrens standardisiert. Auf Grund der starken Adhäsionskräfte des Harzes zur Werkzeugform, muss das Aushärtewerkzeug mit einer Trennschicht versehen werden. Diese, meist flüssig aufgetragene, Schicht ermöglicht ein leichtes Entformen des Bauteils nach der Aushärtung. Die vorgeformte Fasermaterial (Preform oder textiles Halbzeug) wird in das geöffnete Werkzeug gelegt (siehe Abbildung 19: 1. Einlegen des Preforms), welches danach geschlossen wird. Damit das Harz die Preform durchtränkt, wird der Hohlraum (Kavität) in der Form evakuiert und unter Injektionsdruck das Harz in das Werkzeug injiziert (siehe Abbildung 19: 2. Harzinjektion). Die injizierte Harzmenge ist größer als jene, die sich später im Bauteil befindet. Der überschüssige Anteil wird zur Spülung der Form verwendet bzw. verbleibt in der Zuleitung. Durch den Spülvorgang wird die Zeitspanne zur Benetzung der Preform verlängert und Verunreinigungen und Luft einschüsse werden in den Überlauf der Form gespült. Erst wenn keine Luftblasen mehr aus den Steigern der Form austreten, wird der Zulauf bis zur vollständigen Aushärtung geschlossen. Nach der Aushärtezeit, die 3-14 Minuten betragen kann, ist die Matrix vernetzt und das Bauteil kann entformt werden.¹⁴⁷

¹⁴⁵ Friedrich (2013), S. 403

¹⁴⁶ Vgl. Suzuki/Takahashi (2005), S. 16; Vgl. Eickenbusch/Krauss (2013), S. 21

¹⁴⁷ Vgl. Friedrich (2013), S. 404; Vgl. o.V. (2013c), S. 391ff

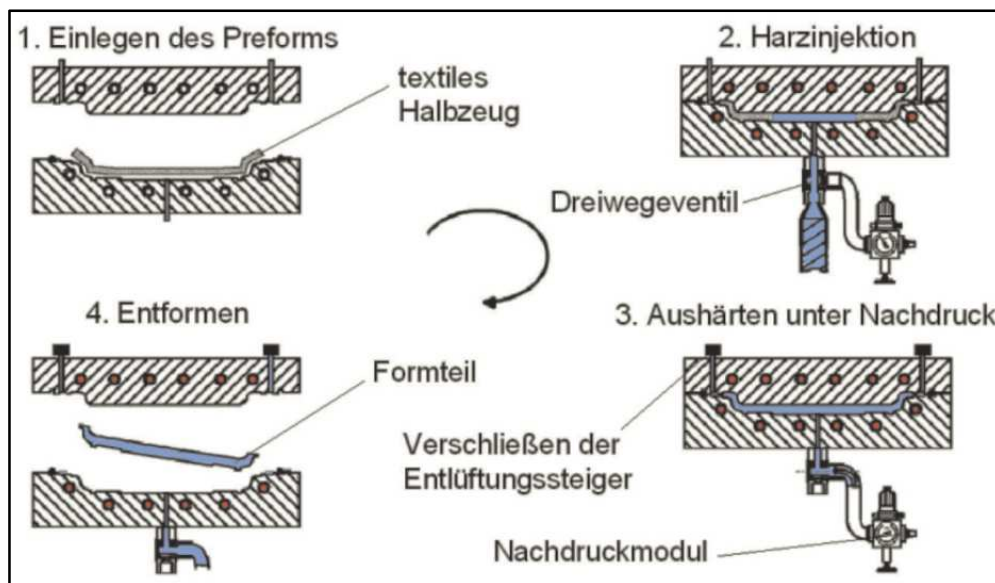


Abbildung 19: Verfahrensablauf des Resin Transfer Moulding¹⁴⁸

Mittels RTM-Verfahren können bei einer Taktzahl von fünf Minuten, Stückzahlen von bis zu 100.000 pro Jahr erreicht werden.¹⁴⁹

3.3.3.2 Eigenschaften

Eigenschaften der Kohlenstofffaser

Eigenschaften des Precursors, wie Reinheit, chemische Zusammensetzung und physikalischer Aufbau beeinflussen die Eigenschaften der daraus hergestellten Kohlenstofffaser. Gehandelt wird Kohlenstofffaser als Garn, welches auf Spulen aufgewickelt ist. Dieses Garn besteht aus vielen einzelnen Fasern, sogenannten Filamenten. Übliche Garngrößen (tow-size) sind 1K, 3K, 6K, 12K und 24K (1K = 1000 Filamente pro Garn) oder 48K bis 80K für sogenannte „heavy tow“.¹⁵⁰

Wie bereits beschrieben, sind Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von der Prozesstemperatur in der Carbonisierung und der Graphitierung abhängig. Weitere physikalische Eigenschaften sind in Tabelle 9 angeführt.

¹⁴⁸ o.V. (2013c), S. 391

¹⁴⁹ Vgl. Eickenbusch/Krauss (2013), S. 22

¹⁵⁰ Vgl. Schult/Retting (2010), S. 21; Vgl. o.V. (2003), S. 8.27

Physikalische Eigenschaft	
Dichte	1760-2120 kg/m ³
Elastizitätsmodul	240-640 GPa
Zugfestigkeit	2600-5600 MPa
Bruchdehnung	1,1-2,0 %

Tabelle 9: Spektrum ausgewählter physikalischer Eigenschaften von Kohlenstofffasern.¹⁵¹

Eigenschaften des Matrixmaterial

Die Eigenschaften von Epoxidharzen hängen stark vom Anwendungsgebiet ab. Es ist daher schwierig, ein allgemeines Eigenschaftsprofil anzugeben. Generell besitzen Epoxidharze eine gute Beständigkeit gegenüber Wärme und Chemikalien, sowie ein sehr gutes Haftungsvermögen auf nahezu allen Werkstoffen. Mit Polyaminhärtungen sind Formbeständigkeitstemperaturen von bis zu 150°C erreichbar. Mit Carbonsäureanhydriden als Härter sind Temperaturen bis zu 200°C möglich, wobei nach dem Aushärten thermische Nachbehandlungen nötig sind.¹⁵²

Physikalische Eigenschaft	
Dichte	1200 kg/m ³
Elastizitätsmodul	3-4,5 GPa
Zugfestigkeit	60-90 MPa

Tabelle 10: Spektrum ausgewählter physikalischer Eigenschaften von Epoxidharz.¹⁵³

Eigenschaften des CFK-Werkstoffes

Als Faserverbundwerkstoffe werden generell Werkstoffe bezeichnet, bei denen ein Fasermaterial in einen Matrixwerkstoff eingebettet ist. Die Werkstoffeigenschaften entstehen erst während der Fertigung und werden durch das Zusammenwirken von Faser, Matrix und Herstellungsprozess bestimmt. Durch den Matrixwerkstoff wird die Temperatur und Medienbeständigkeit weitestgehend festgelegt, wohingegen die

¹⁵¹ Vgl. Schult/Retting (2010), S. 22; Vgl. o.V. (2003), S. 8.26f, eigene Darstellung

¹⁵² Vgl. o.V. (2013c), S. 74; Vgl. Friedrich (2013), S. 590f

¹⁵³ Vgl. o.V. (2013c), S. 74; Vgl. Schürmann (2007), S. 132, eigene Darstellung

Eigenschaften und die Orientierung der Faser insbesondere für die mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeit und Steifigkeit, ausschlaggebend sind.¹⁵⁴

Nach Schürmann und Friedrich zeichnen sich faserverstärkte Kunststoffe durch folgende Eigenschaften aus:¹⁵⁵

- Hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit.
- Hohe Grad an freier Gestaltung und die Integration von Einzelfunktionen.
- Gute Korrosionsbeständigkeit von Fasern und Matrixwerkstoffen
- Festlegung der elektrischen Eigenschaften, durch Kombination von Werkstoffen möglich
- Geringe Wärmeleitfähigkeit.
- Hohes spezifische Energieaufnahmevermögen, vier- bis fünfmal höher als jenes von metallischen Strukturen
- Einfache Fertigung für Einzelstücke und Kleinstserien
- Hohe Materialkosten
- Eigenschaftsänderung in Abhängigkeit der Faserrichtung
- Praktisch keine plastische Verformung und geringe Bruchdehnung
- Schlechte optische Erkennbarkeit von Schäden, wie Faserbrüche und Delaminationen

3.3.3.3 CFK-Recycling

Technologien und Prozesse zum Recyceln von CFK befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Die Schwierigkeit besteht in der Trennung von Faser und Matrix. Um Ökobilanzen von CFK-Bauteilen zu verbessern, müssen Lang- und Endlosfasern wieder gewonnen werden, um sie wieder in hochwertigen Bauteil verarbeiten zu können. Bei den am weitesten entwickelten Verfahren werden die Bauteile und somit die Fasern jedoch mechanisch zerkleinert. Zuerst werden die Bauteile auf eine Größe von 50-100mm zerkleinert und danach in einer Mühle bis auf eine Granulatgröße von 50µm vermahlen. Die anfallenden faserigen und pulverigen Fraktionen werden als verstärkungs- und Füllmaterial in anderen Verbundwerkstoffen wiederverwendet. Bei Wirbelschicht-Pyrolyse-Verfahren werden Reste von trockener Kohlenstofffaser und vorimpregnierten Kohlenstofffasermatten sowie Altbauteile sortiert, zerkleinert und in einem Pyrolyseprozess auf 400-1000°C erhitzt um die Matrix zu verdampfen. Damit die Kohlenstofffaser nicht oxidiert, findet dieser Prozess

¹⁵⁴ Vgl. Friedrich (2013), S. 397, 399

¹⁵⁵ Vgl. Schürmann (2007), S. 4f; Vgl. Friedrich (2013), S. 141ff

unter Schutzgas statt. Die daraus gewonnen Kurzfasern werden in Kunststoffteilen als Verstärkungskomponente oder beim Spritzgießen von Leichtbauteilen wiederverwendet. Chemische Verfahren auf Basis einer Solvolyse werden als Recycling-Ansatz für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe untersucht. Hierzu wird das Matrixmaterial mittels einer reaktiven Lösung zu einem Recyclat aufgelöst und so von der Kohlenstofffaser getrennt. Auf diese Weise kann hier die Kohlenstofffaser in ursprünglicher Länge zurückgewonnen werden (siehe Abbildung 20).¹⁵⁶

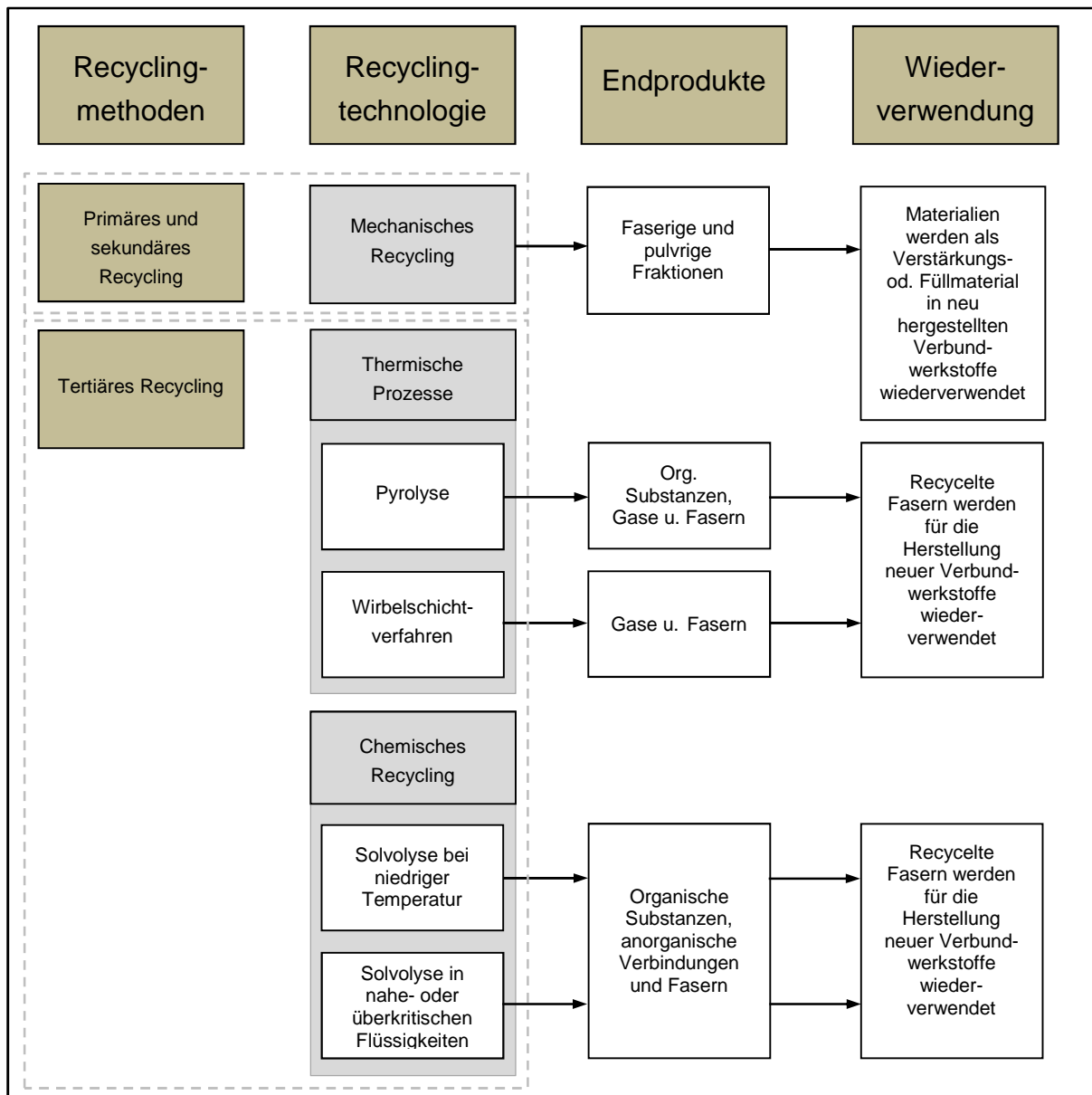


Abbildung 20: Recycling-Technologien für CFK-Bauteile¹⁵⁷

¹⁵⁶ Vgl. Eickenbusch/Krauss (2013), S. 32f; Vgl. Morin et. al. (2012), S. 234ff

¹⁵⁷ Vgl. Morin et. al. (2012), S. 234, eigene Darstellung

3.4 Leichtbauweisen

Die Formen des Leichtbaus werden durch ihre technologischen Merkmale und Bedingungen definiert. Es handelt sich dabei um Fragen der Gestaltung, der Formgebung und der Bauteilgeometrie.¹⁵⁸

Welches Konzept schlussendlich Anwendung findet, hängt von folgenden Faktoren ab:¹⁵⁹

- Anwendung
- Kosten
- Reparaturforderungen
- Sicherheitsanforderungen
- Möglichkeiten der Fertigung

Der Karosseriebau in der Fahrzeugtechnik liefert typische Beispiele, bei denen entweder differenzielle Space-Frame-Konzepte oder integrativere Schalenlösungen verwendet werden.¹⁶⁰

Leichtbauweisen werden laut Wiedemann in die folgenden vier Grundkategorien eingeteilt.

3.4.1 Differentialleichtbau

Bei dieser Bauweise werden einzelnen Elemente und Bauteile additiv zusammengefügt¹⁶¹. Im Blechleichtbau geschieht dies meist durch Kleben, Nieten, Schrauben oder Schweißen¹⁶².

Vor allem beim Verschrauben von Bauteilen wirkt sich die Zerlegbarkeit vorteilhaft auf Recycling und Reparaturen aus. Auch verschiedene Werkstoffe können so einfach miteinander kombiniert werden. Von Nachteil ist jedoch die hohe Anzahl an Fügstellen, die zu aufwendigerer Fertigung und höherem Bauteilgewicht führen. Bei der Verbindung mit Metallen besteht weiters die Gefahr der Korrosion an Kontaktstellen.¹⁶³

¹⁵⁸ Vgl. Wiedemann (2007), S. 7

¹⁵⁹ Vgl. Klein (2009), S. 17

¹⁶⁰ ibidem

¹⁶¹ Vgl. Schindler/Sievers (2008), S. 316

¹⁶² Vgl. Klein (2009), S. 17

¹⁶³ Vgl. Schindler/Sievers (2008), S. 316

3.4.2 Integralleichtbau

Bei dieser Bauweise werden möglichst viele Funktionen in einem Bauteil integriert. Dies führt dazu, dass die Funktionseinheit aus einem Stück gefertigt wird. Daraus ergibt sich der Wegfall bzw. die drastische Verringerung von Fügstellen, was eine Verringerung des Bauteilgewichts zur Folge hat. Nachteilig wirkt sich dies jedoch auf das Schadverhalten (Rissausbreitung) und auf die Fertigung aus. Letzt genannte gestaltet sich daher aufwendiger.¹⁶⁴

3.4.3 Integrierender Leichtbau

Der integrierende Leichtbau versucht die Nachteile des Integralleichtbaus zu begrenzen. Um Rissausbreitung einzugrenzen und Austauschbarkeit sowie Wiederverwertbarkeit zu erleichtern, wird der Grad der Integration reduziert. Es wird dabei versucht, an bestimmten Stellen die positiven Eigenschaften von Addition und Integration zu nutzen.¹⁶⁵

3.4.4 Verbundleichtbau

Unter der Verbundbauweise versteht man die zweckvolle Kombination von verschiedenen Materialien, welche unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Zum Beispiel Bleche mit hoher Festigkeit oder Lagen aus Kohlenstoff- oder Glasfasergeweben, welche mit leichten Schäumen oder Wabenkernen zu Sandwichplatten verbunden werden.¹⁶⁶

¹⁶⁴ Vgl. Schindler/Sievers (2008), S. 316f

¹⁶⁵ Vgl. Klein (2009), S.18

¹⁶⁶ Vgl. Klein (2009), S. 19; Vgl. Wiedemann (2007), S. 8

3.5 Fertigungsleichtbau

Nach Friedrich werden Gewichtsreduktionen, die durch eine Optimierung eines Produktionsprozess auftreten, als Fertigungsleichtbau bezeichnet. Bei bestehenden Produktionsanlagen werden geänderte oder ähnliche Fertigungsverfahren eingesetzt, um Kosten für neue Produktionsanlagen zu sparen. Bei diesen Verfahren werden dem Beanspruchungsverlauf nach die Wandstärken der Bauteile optimiert. Als Beispiel können im Karosseriebau Verfahren zur Herstellung von Tailored Blanks oder Tailord Tubes angeführt werden. Bei Tailored Blanks (maßgeschneiderte Bleche) wird eine variable Blechdicke durch das Auf und Ab Bewegen der Blechwalzen erzeugt (siehe Abbildung 21). Das Ändern von Fügetechniken kann ebenso als Fertigungsleichtbau bezeichnet werden, wenn dabei Materialanhäufungen entfallen. Dies geschieht beim Wechsel von Schraub-, Niet- oder Schweißverbindungen hin zu Kleben, Löten oder Laserschweißen.¹⁶⁷

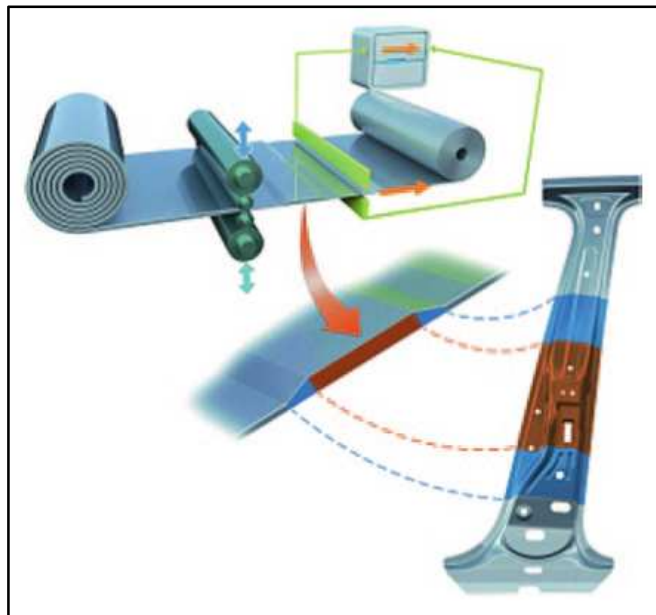


Abbildung 21: Verfahren zur Herstellung von Tailored Blanks¹⁶⁸

¹⁶⁷ Vgl. Friedrich (2013), S. 58

¹⁶⁸ Friedrich (2013), S. 59

4 Lebenzyklus-Analyse der Leichtbaukonzepte

Wie unter Kapitel 2.2.1 gefordert werden folgende Ziele definiert.

Beabsichtigte Anwendung: Untersucht werden drei verschiedenen Karosseriekonzepte für einen Personenkraftwagen des C-Segments in Herstellung und Nutzung. Diese unterscheiden sich durch den Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe und Fertigungsverfahren.

Grund der Durchführung: Die Untersuchung wird durchgeführt, um Unterschiede in Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß der untersuchten Konzepte von der Herstellung bis zum Ende der Nutzungsdauer festzustellen.

Zielgruppe: Automobilhersteller, Zulieferindustrie, NGO's (Nicht-Regierungs-Organisationen), Kunde

Veröffentlichung: Wird veröffentlicht, Ergebnisse münden in eine Publikation

4.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen

Zuerst werden die zu vergleichenden Karosseriekonzepte ausgewählt und beschrieben. Weiters werden die Antriebskonzepte und Fahrzyklen beschrieben, welche zur Berechnung über die Nutzungsdauer betrachtet werden.

In der Arbeit werden drei verschiedenen Konzepte untersucht, die gegenwärtig und in Zukunft von Bedeutung sein werden. Als Referenzkonzept wird den Leichtbauvarianten eine Stahlkarosserie gegenübergestellt, welche den derzeitigen Stand der Technik darstellt. Als erstes Leichtbaukonzept wird eine Aluminiumkarosserie in Anlehnung an die ASF-Bauweise (Aluminium Space Frame) von Audi betrachtet. Als zweites Konzept wird eine CFK-Karosserie ausgewählt, welche das größte Gewichteinsparungspotential verspricht. Die Leichtbaukonzepte werden sowohl auf die Rohkarosserie, als auch auf die Öffnungssysteme (Türen, Motorhaube, Kofferraumdeckel) angewendet. In weiterer Folge wird die Gesamtheit dieser Bauteile als Karosserie bezeichnet.

Von der Betrachtung ausgenommen sind die Herstellung von Anlagen zur Gewinnung von Rohstoffen und zur Herstellung von Gütern, sowie die Transportprozesse von Rohstoffen und Gütern.

4.1.1 Beschreibung der Stahlkarosserie

Untersucht wird eine Stahlkarosserie des C-Segments (siehe Abbildung 4). Seit den 50er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts werden zum überwiegenden Teil im Automobilbau Karosserien in Schalenbauweise aus Stahl eingesetzt. In der Massenproduktion von Automobilen ist dies gegenwärtig die am häufigsten eingesetzte Bauweise, welche sich stetig durch optimierte Blechbearbeitungsprozesse und den Einsatz von hochfesten Stählen weiterentwickelt hat. Eine Stahlkarosserie besteht aus Schalen und Hohlkörpern, (z.B. A-Säule) welche aus 0,6-3 mm dicken Blechen vorgefertigt werden. In Vielpunktschweißanlagen oder durch Schweißroboter werden die einzelnen Teile zur Rohkarosserie und zu Öffnungssystemen verbunden. Diese Anlagen setzen ca. 5000 Schweißpunkte pro Karosserie. Die Öffnungssysteme und Kotflügel werden mit der Karosserie verschraubt.¹⁶⁹



Abbildung 22: Karosserierohbau des BMW F20¹⁷⁰

¹⁶⁹ Vgl. Robert Bosch GmbH (2007), S. 925; Vgl. Friedrich (2013), S. 15

¹⁷⁰ Boeriu (2014), Zugriffsdatum 22.01.2014

4.1.2 Beschreibung der Aluminiumkarosserie

Aluminiumkarosserien als tragende Strukturen wurden bereits 1945 von der Firma Grégoire und 1954 von der Firma Panhard gebaut. Diese Konzepte konnten sich zu jener Zeit jedoch nicht durchsetzen. Seit 1994 baut der Automobilhersteller Audi Fahrzeugkarosserien in ASF-Bauweise. Die Firma Jaguar stellte ebenfalls für ihr Model XJ (Baureihe X350) eine Aluminiumkarosserie in Schalenbauweise her. Gegenüber dem ASF-Konzept hat diese Bauweise aufgrund der höheren Werkzeug- und Fügekosten einen Kostennachteil, ab einer Produktion von über 70.000 Einheiten.¹⁷¹

In dieser Untersuchung wird das ASF-Konzept von Audi als Ausgangslage verwendet. Die Aluminiumkarosserie besteht aus Blech-, Guss- und Strangpressteilen. Gebogene Profile werden nur dort eingesetzt wo es aufgrund der Außenkontur des Fahrzeuges von Nöten ist. Durch die Verwendung von Stangpressprofilen und Gussteilen kann die Teileanzahl reduziert werden. Dies führt zu einer Reduzierung der Verbindungsstellen, was wiederum in weiteren Gewichtseinsparungen resultiert. Als Fügetechniken werden Schweißen und Nieten angewendet.¹⁷²

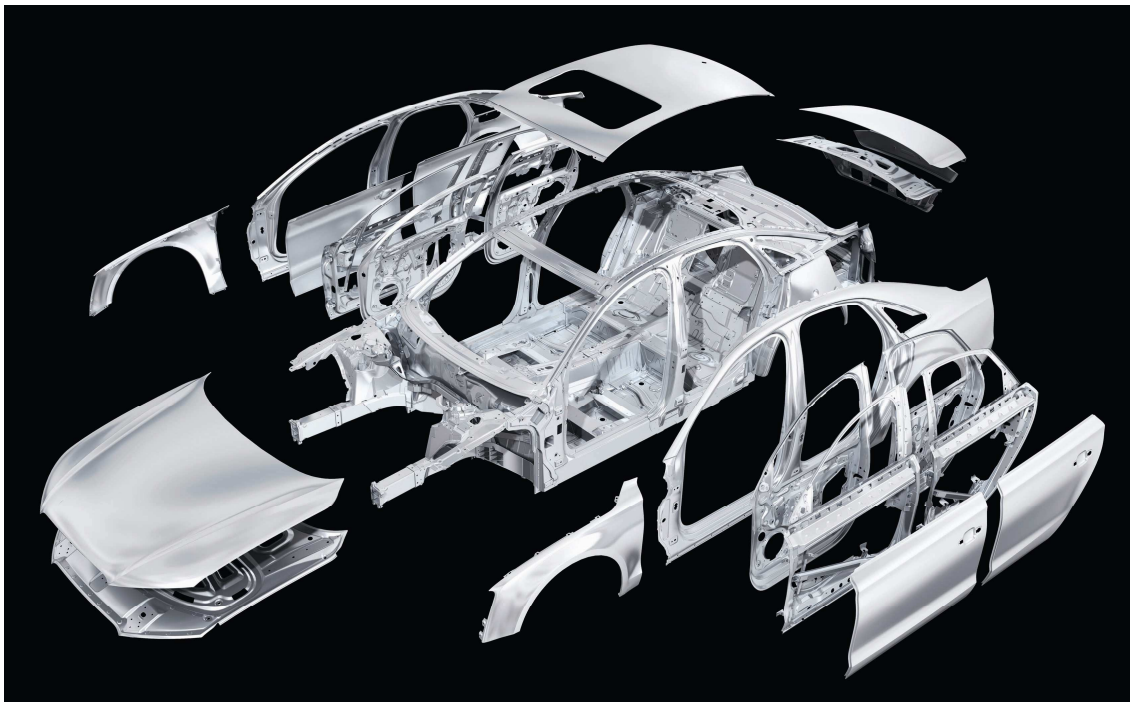


Abbildung 23: Audi Aluminium Space Frame Karosserie¹⁷³

¹⁷¹ Vgl. Braess/Seiffert (2012), S. 806; Vgl. Friedrich (2013), S. 785f

¹⁷² Vgl. Mayer/Venier/Koglin (2002), S. 95; Vgl. Braess/Seiffert (2012), S. 392

¹⁷³ AUDI AG (2014), Zugriffsdatum 22.01.2014

4.1.3 Beschreibung der CFK-Karosserie

Der Einsatz von Einzelkomponenten aus CFK im Automobilbau setzt sich in den letzten Jahren mehr und mehr durch. So wird zum Beispiel das Dach für den BMW M3 (Typ E92) mittels RTM-Verfahren hergestellt und auf der Karosserie verklebt. Als erstes Serienfahrzeug wurde der Porsche Carrera GT mit einem CFK-Monocoque produziert. Der BMW i3 ist das erste Großserienfahrzeug mit CFK-Karosserie (Life-Modul, siehe Abbildung 24). Die Bauweise ist an einer Schalenbauweise aus Blech angelehnt. Hierzu werden flächige Kohlenstofffaserhalbzeuge vorgeformt und anschließend im RTM-Verfahren mit Harz getränkt. Nachdem das Harz ausgehärtet ist, werden die Bauteile beschnitten und miteinander verklebt. Hohlstrukturen wie die A-Säule werden durch Verkleben zweier Bauteile, die als Schalenelemente ausgeführt sind, hergestellt¹⁷⁴

Die in dieser Arbeit untersuchte CFK-Karosserie orientiert sich am Herstellungsprozess Life-Modul des BMW i3. Es wird eine Karosserie aus einem Kohlefaser-Epoxidharz-Verbund betrachtet, welche im RTM-Verfahren hergestellt wird. Als Ausgangsstoff zur Kohlefaserherstellung wird PAN-Faser verwendet.



Abbildung 24: Life-Modul des BMW i3¹⁷⁵

¹⁷⁴ Vgl. Braess/Seiffert (2012), S. 830; Vgl. Friedrich (2013), S. 428

¹⁷⁵ SGL CARBON SE (2014), Zugriffsdatum 22.01.2014

4.2 Sachbilanz der Produktion

Einleitend wird auf die Begriffe Primärenergie, kumulierter Energieaufwand und Prozessenergie eingegangen.

Primärenergie wird nach Schabbach/Wesselak wie folgt definiert Schabbach/Wesselak (2012): „*Primärenergie ist Energie in ihrem natürlichen, noch nicht technisch aufbereiteten Zustand, z. B. in Form von Kohle, Naturgas, Rohöl oder Wind.*“¹⁷⁶

Definition des kumulierten Energieaufwandes (KEA) laut der VDI-Richtlinie 4600: Der KAE gibt „*die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann.*“¹⁷⁷

Als Prozessenergie wird in dieser Untersuchung Energie bezeichnet, die zur Herstellung, Gewinnung oder Umwandlung eines Stoffes oder Produktes dient. Sie setzt sich aus der fossilen Prozessenergie und elektrischer Energie zusammen.

In Abbildung 25 ist der Fluss der Primärenergie und deren Umwandlung dargestellt.

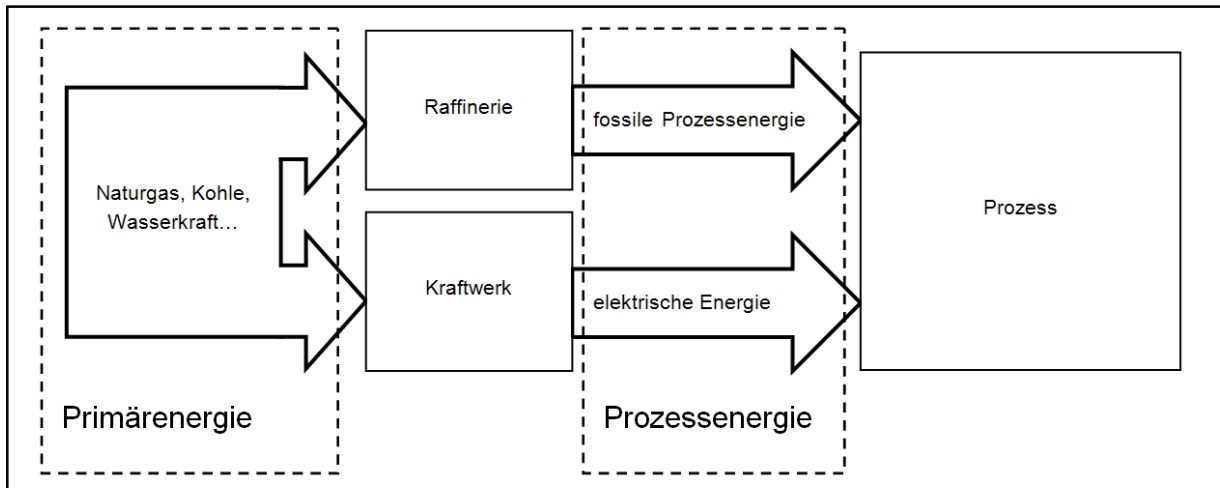


Abbildung 25: Energiefluss der Primär- und Prozessenergie¹⁷⁸

In der folgenden Sachbilanz werden der Primärenergieverbrauch und der CO₂-Ausstoß von der Rohstoffgewinnung bis zum Beginn der Nutzungsdauer der drei Karosserien berechnet (cradel-to-gate). Ein detailliertes Berechnungsschema zu allen drei Karosseriekonzepten kann Anhang C bis E entnommen werden.

¹⁷⁶ Schabbach/Wesselak (2012), S. 29

¹⁷⁷ o.V. (2012), S. 6

¹⁷⁸ Eigene Darstellung

In der Sachbilanz der Produktion gibt es drei Berechnungspfade. Entlang dieser Pfade werden die Inputs und Outputs der einzelnen Prozessmodule der Karosserieherstellung berechnet:

Im ersten Pfad wird die Prozessenergie für jedes Prozessmodul berechnet. Es wird der Energieverbrauch ermittelt, der direkt in einen Produktionsprozesses fließt. Diese Prozessenergie setzt sich je nach Produkt oder Prozess aus einem Anteil fossiler Energieträger und einem Anteil elektrischer Energie zusammen.

Im zweiten Berechnungspfad wird der Primärenergieverbrauch für jedes Prozessmodul berechnet. Dieser setzt sich aus dem Verbrauch der fossilen Prozessenergie und dem Primärenergieverbrauch zur Erzeugung elektrischer Energie zusammen. Letzt genannter wird mit dem Verbrauch der elektrischen Energie und dem KEA berechnet. Der KEA für elektrische Energie ist abhängig von der prozentuellen Verteilung der Kraftwerkstypen eines Landes, welche das Stromnetz speisen (Strom-Mix), und deren Wirkungsgraden. In der Berechnung wird der KEA für Deutschland, Österreich, Norwegen, China, Australien, Europa und USA verwendet (siehe Tabelle 11). Abbildung 26 zeigt das Schema zur Berechnung der Primärenergie für ein Prozessmodul.

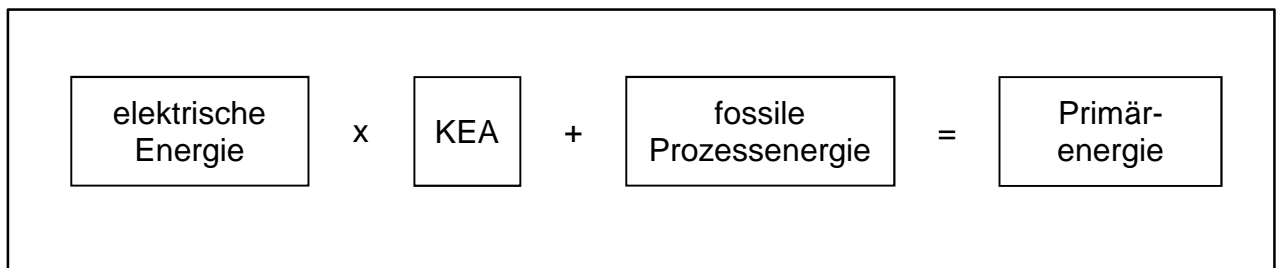


Abbildung 26: Berechnungsschema zur Berechnung der Primärenergie¹⁷⁹

Im dritten Berechnungspfad wird der CO₂-Ausstoß, der durch den Energieverbrauch während der Rohstoffgewinnung, -Verarbeitung und Karosserieherstellung emittiert wird, berechnet.

Je nach Energieform und Datenlage wird der CO₂-Ausstoß entweder aus der Literatur und Datenbanken bezogen, oder auf Basis der zuvor ermittelten Prozess- und Primärenergieverbrauch mit CO₂-Faktoren berechnet.

Bei der Berechnung der CO₂-Emission infolge fossilen Energieträgern, welche direkt im Herstellungsprozess verbraucht werden, wird dieser mit einem CO₂-Faktor

¹⁷⁹ Eigene Darstellung

berechnet, welcher in Kilogramm CO₂ pro Kilowattstunde Energieträger angegeben ist (siehe Abbildung 27).

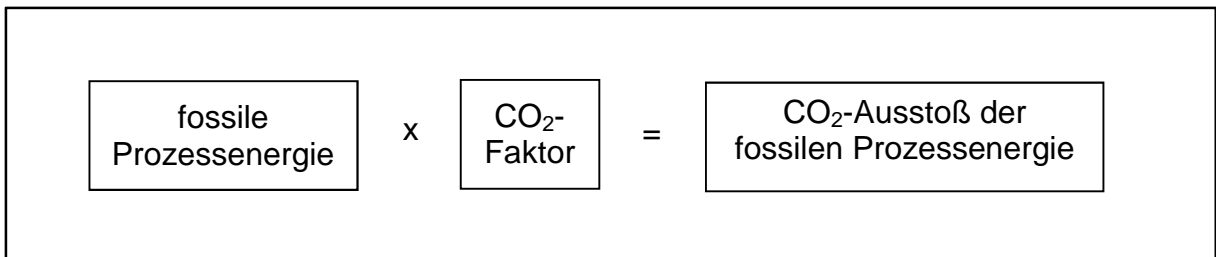


Abbildung 27: Berechnungsschema zur Berechnung des CO₂-Ausstoßes der fossilen Prozessenergie¹⁸⁰

Unternehmen können sich auf einem liberalisierten Strommarkt ihren Anbieter aussuchen. In großen Produktionsanlagen produzieren auch betriebseigene Kraftwerke einen Teil des Eigenbedarfs¹⁸¹. Daraus wird die Schlussfolgerung gezogen, dass der CO₂-Faktor von Unternehmen zu Unternehmen variiert. In dieser Untersuchung wird angenommen, dass die Industriebetriebe die elektrische Energie aus dem öffentlichen Stromnetz beziehen.

Bei der eingesetzten elektrischen Prozessenergie wird ebenfalls der CO₂-Ausstoß mit einem Faktor ermittelt. Dieser CO₂-Faktor ist in Kilogramm CO₂ pro Kilowattstunde elektrischer Energie angegeben und ergibt sich, wie beim Energiebedarf für Strom (KEA), aus der länderspezifischen prozentuellen Verteilung der Kraftwerkstypen, welche das öffentliche Stromnetz speisen bzw. deren jeweiligen CO₂-Ausstoß (siehe Tabelle 11). Abbildung 28 zeigt das Berechnungsschema zur Ermittlung des CO₂-Ausstoßes der elektrischen Energie für ein Prozessmodul.

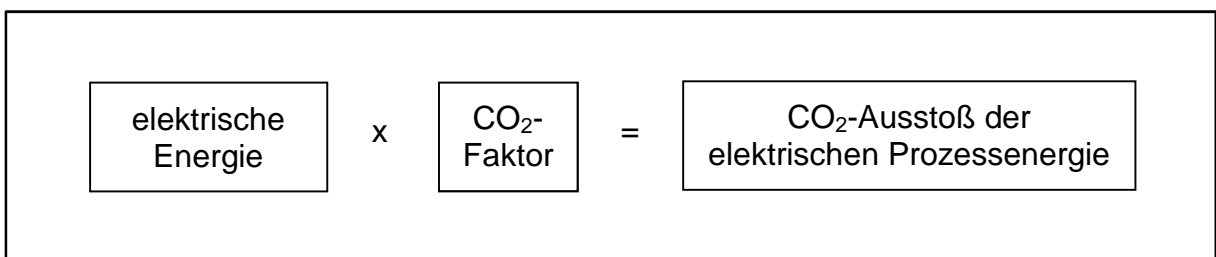


Abbildung 28: Berechnungsschema zur Berechnung des CO₂-Ausstoßes der elektrischen Prozessenergie¹⁸²

Der CO₂-Ausstoß der fossilen und elektrischen Prozessenergie werden zum gesamten CO₂-Ausstoß des jeweiligen Prozesses addiert.

¹⁸⁰ Eigene Darstellung

¹⁸¹ Vgl. BMW AG (2013a), S. 6

¹⁸² Eigene Darstellung

In den folgenden Kapiteln wird der länderspezifische Primärenergieverbrauch und CO₂-Ausstoß mit den KEA's und CO₂-Faktoren für jedes Karosseriekonzept berechnet.

Die in Tabelle 11 angeführten Daten wurden aus folgenden Gründen ausgewählt.

Der Strom-Mix für Österreich wurde gewählt, um den lokalen Bezug der Arbeit zu berücksichtigen.

Der Strom-Mix für Norwegen wird in der Berechnung verwendet, da der Anteil regenerativer Energieformen in diesem Strom-Mix sehr hoch ist, und der daraus resultierende CO₂-Faktor im Vergleich mit anderen in Tabelle 11 angeführten Daten am geringsten ist. Der Strom-Mix für China wird in der Berechnung verwendet, da CO₂-Faktor und KEA in Relation zu den anderen angeführten Daten die höchsten Werte aufweisen.

Die CO₂-Faktoren für die EU und die USA werden auf Grund des weltweit hohen Anteils an Fahrzeugen betrachtet. Die Werte für Deutschland werden auf Grund des hohen Fahrzeuganteils innerhalb der EU berücksichtigt. Ein weiterer Grund ist die hohe Stückzahl an produzierten Fahrzeugen.¹⁸³

Der Strom-Mix für Australien wurde auf Grund der hohen Bauxitförderung in diesem Land gewählt und dessen Einfluss auf den CO₂-Ausstoß in der Aluminiumherstellung.¹⁸⁴

Land	KEA [^{kWh} / _{kWh Strom}]	CO ₂ -Faktor [^{kg CO₂} / _{kWh}]	Datensatzname in GEMIS bzw. GaBi
DEUTSCHLAND	2,28	0,58	Netz-el-DE-lokal-HH/KV-2010
ÖSTERREICH	1,91	0,22	Netz-el-AT-2010-lokal
NORWEGEN	1,12	0,03	Netz-el-NO-2010-lokal
CHINA	2,85	0,96	Netz-el-CN-2000
AUSTRALIEN	2,64	0,85	El-KW-Park-AU-2010
EUROPA	2,84	0,43	Netz-el-EU-2010-lokal
USA	2,88	0,66	GaBi: US: Electric grid mix PE

Tabelle 11: Länderspezifischer CO₂-Ausstoß und Primärenergiebedarf bezogen auf eine kWh elektrische Energie¹⁸⁵

Die qualitative und quantitative Zusammensetzung der Datensätze ist Anhang A zu entnehmen. Der Transport von Rohstoffen und Gütern wird in der Herstellung aller drei Leichtbauvarianten nicht berücksichtigt.

¹⁸³ Vgl. Mock (2013), S. 10ff

¹⁸⁴ Vgl. Bray (2013), S. 27

¹⁸⁵ Fritsche et. al. (2013); PE International AG (2014), eigene Darstellung

4.2.1 CO₂-Ausstoß und Energieverbrauch der Stahlkarosserieherstellung

Um den Anteil des CO₂-Ausstoßes und des Energieverbrauchs berechnen zu können, welcher der Karosserie zuzurechnen ist, ist die Masse der Karosserie zu bestimmen. Hierzu wird aus der Masse eines Fahrzeuges mit Benzinmotor, welche 1202 Kilogramm beträgt, der Massenanteil der Karosserie bestimmt. Es wurden die Daten eines generierten Durchschnittsfahrzeugs für den entsprechenden Fahrzeugtyp verwendet. Die Datengrundlage dieses Durchschnittsfahrzeug bilden Fahrzeugdatenblätter.¹⁸⁶

Der prozentuelle Gewichtsanteil der Rohkarosserie und Öffnungssysteme am Gesamtfahrzeug beträgt 23% bzw. 11.4%. Dies sind ebenso Mittelwerte für den entsprechenden Fahrzeugtyp, welche aus der Recherche von Fahrzeugdatenblättern stammen.¹⁸⁷. Die Masse der Stahlkarosserie beträgt 414kg.

Abbildung 29 zeigt das Produktsystem der Stahlkarosserie.

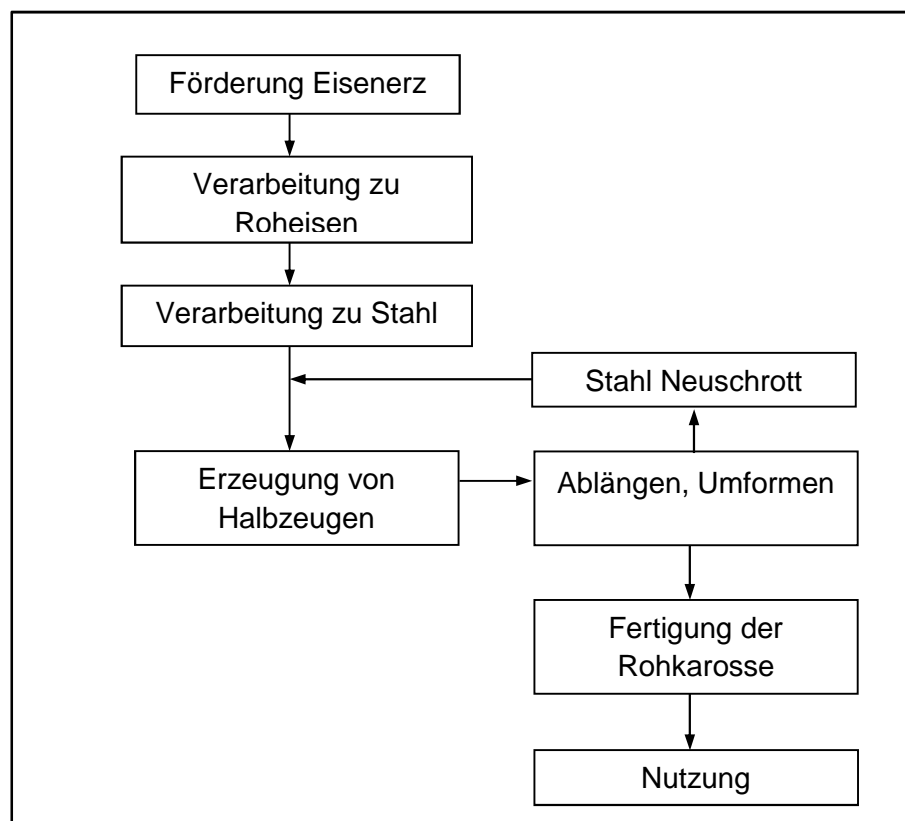


Abbildung 29: Produktsystem Stahlkarosserie¹⁸⁸

¹⁸⁶ Brunner (2013), S. 16

¹⁸⁷ Brunner (2013), S. Bf

¹⁸⁸ Eigene Darstellung

Die folgende Berechnung des Energieverbrauchs und des CO₂-Ausstoßes der Stahlkarosserieproduktion behandelt die in Abbildung 29 angeführten Prozessschritte.

Stahlblechherstellung

Die Primärenergie und der CO₂-Ausstoß in der Erzeugung von Stahlblech betragen laut Gemis 5,97 kWh/kg Stahlblech bzw. 2,26 kg CO₂/kg Stahlblech. Die Daten repräsentieren eine durchschnittliche EU-weite Produktion in den Jahren 2005 bis 2007, und berufen sich auf den World Steel Methodenreport von 2011. Die Werte beinhalten den gesamten Produktionsprozess vom Erzabbau bis zum fertigen Stahlblech.¹⁸⁹ Um den CO₂-Ausstoß der verbrauchten elektrischen Energie bestimmen zu können, wird mit einem Anteil elektrischer Energie an der Prozessenergie zu 18% und einem KEA in der EU von 2,84 kWh/kWh die gesamte Prozessenergie zu 4,48 kWh/kg Stahlblech berechnet¹⁹⁰. Mit den Werten für die Prozessenergie, dem Anteil elektrischer Energie und den länderspezifischen Werten für CO₂-Ausstoß und KEA (siehe Tabelle 11) wird der Primärenergieverbrauch, und der CO₂-Ausstoß pro kg Stahlblech, der durch diesen Energieverbrauch je Land hervorgerufen wird, neu berechnet (siehe Tabelle 12).

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [kWh/kg Stahlblech]	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48
Primärenergie [kWh/kg Stahlblech]	5,52	5,22	4,58	5,98	5,81	5,97	6,00
CO ₂ -Ausstoß [kg CO ₂ /kg Stahlblech]	2,38	2,09	1,94	2,69	2,60	2,26	2,45

Tabelle 12: CO₂-Ausstoß und Energiebedarf der Stahlblechherstellung je nach Länder-Strom-Mix¹⁹¹

Stahlkarosserieherstellung

Die Werte zur Verarbeitung des Blechs zur fertigen Karosserie stammen aus den Umwelterklärungen der BMW Werke Regensburg und Leipzig, und belaufen sich auf 0,87 kWh/kg Karosserie bzw. 0,60 kWh/kg Karosserie Prozessenergie. Diese Werte beinhalten das Pressen der Bauteile aus Stahlblech, welches in so genannten Coils angeliefert wird, und den Rohbau.¹⁹²

¹⁸⁹ Fritsche et. al. (2013)

¹⁹⁰ EIA (2014), Zugriffsdatum 14.01.2014; Fritsche et. al. (2013)

¹⁹¹ Eigene Darstellung und Berechnung

¹⁹² BMW AG (2013b), S. 7ff; BMW AG (2013a), S. 6ff

In die Berechnung der Karosseriefertigung fließt der Mittelwert der beiden Standorte ein, da sich die Anlagen auf unterschiedlichem Stand der Technik befinden. Dieser beträgt $0,73 \text{ kWh/kg Karosserie}$.

In modernen Stahlkarosserien werden sowohl kalt- als auch warmumgeformte bzw. pressgehärtete Blechbauteile verbaut. Zur Aufheizung der Bleche werden sowohl Gas- als auch Elektroöfen eingesetzt.¹⁹³

Der Anteil der fossilen Energie beim Warmumformen variiert von Anlage zu Anlage. Der Einsatz von Elektroheizungen wird vor allem bei Öfen im Niedrigenergiebereich bevorzugt, da sie eine genauere Regulierbarkeit aufweisen und preiswerter sind als Gasöfen.¹⁹⁴

Für die Berechnung wird angenommen, dass ausschließlich Elektroöfen zum Einsatz kommen.

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [kWh/kg Karosserie]	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Primärenergie [kWh/kg Karosserie]	1,67	1,40	0,82	2,09	1,94	2,08	2,11
CO ₂ -Ausstoß [$\text{kg CO}_2/\text{kg Karosserie}$]	0,43	0,16	0,03	0,71	0,62	0,32	0,48

Tabelle 13: CO₂-Ausstoß und Energiebedarf der Stahlkarosserieherstellung je nach Länder-Strom-Mix¹⁹⁵

Aus den in Tabelle 13 angeführten Werten ergeben sich der Energieverbrauch und CO₂-Emission je Karosserie und Land. Sie werden nach dem in Anhang C angegebenen Berechnungsschema ermittelt.

Es wird der Verschnitt aus der Karosserieproduktion sortenrein gesammelt und im Blech-zu-Blech-Recycling wieder der Halbzeugherstellung zugeführt (Neuschrott).¹⁹⁶

¹⁹³ Vgl. Braess/Seiffert (2012), S. 421; Vgl. Pfeifer/Nacke/Beneke (2011), S. 214

¹⁹⁴ Vgl. Schwartz (2014), Zugriffsdatum 03.02.2014

¹⁹⁵ Eigene Darstellung und Berechnung

¹⁹⁶ Vgl. Krinke et. al. (2010), S. 443

Der gesamte Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß bezogen auf ein Kilogramm Stahlkarosserie sowie auf eine gesamte Stahlkarosserie ist in Tabelle 14 gegeben.

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [^{kWh} /kg Karosserie]	5,22	5,22	5,22	5,22	5,22	5,22	5,22
Primärenergie [^{kWh} /kg Karosserie]	2,87	2,61	2,47	3,15	3,07	2,76	2,93
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /kg Karosserie]	7,68	7,40	6,83	8,09	7,94	8,09	8,12
Prozessenergie [^{kWh} /Karosserie]	2159	2159	2159	2159	2159	2159	2159
Primärenergie [^{kWh} /Karosserie]	1188	1079	1022	1304	1269	1143	1212
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /Karosserie]	3177	3064	2824	3349	3287	3346	3358

Tabelle 14: CO₂-Austoß und Energiebedarf der Stahlkarosserie je nach Länder-Strom-Mix¹⁹⁷

¹⁹⁷ Eigene Darstellung und Berechnung

4.2.2 CO₂-Ausstoß und Energieverbrauch der Aluminiumkarosserieherstellung

Ausgehend von der Stahlkarosserie ist die Masse der Aluminiumkarosserie um 40% geringer.¹⁹⁸ Sie beträgt 248 kg.

Bei der Herstellung von Aluminium wird ein wesentlich höherer Anteil an elektrischer Energie benötigt (71%) als bei der Herstellung von Stahl. Es wird bei allen Prozessschritten, welche in Abbildung 30 angegeben sind, der elektrische Anteil der Prozessenergie getrennt betrachtet und berechnet. Die Prozessenergieverbräuche basieren auf dem Report der European Aluminium Association von 2010, ebenso wie der CO₂-Ausstoß für fossile Brennstoffe, welche direkt in den Herstellungsprozess fließen. Der CO₂-Ausstoß für die elektrische Energie wird mit CO₂-Faktoren (Tabelle 11) neu und länderspezifisch berechnet, ebenso der wie der Primärenergieverbrauch der elektrischen Energie, welcher mit dem länderspezifischen KEA (Tabelle 11) berechnet wird.

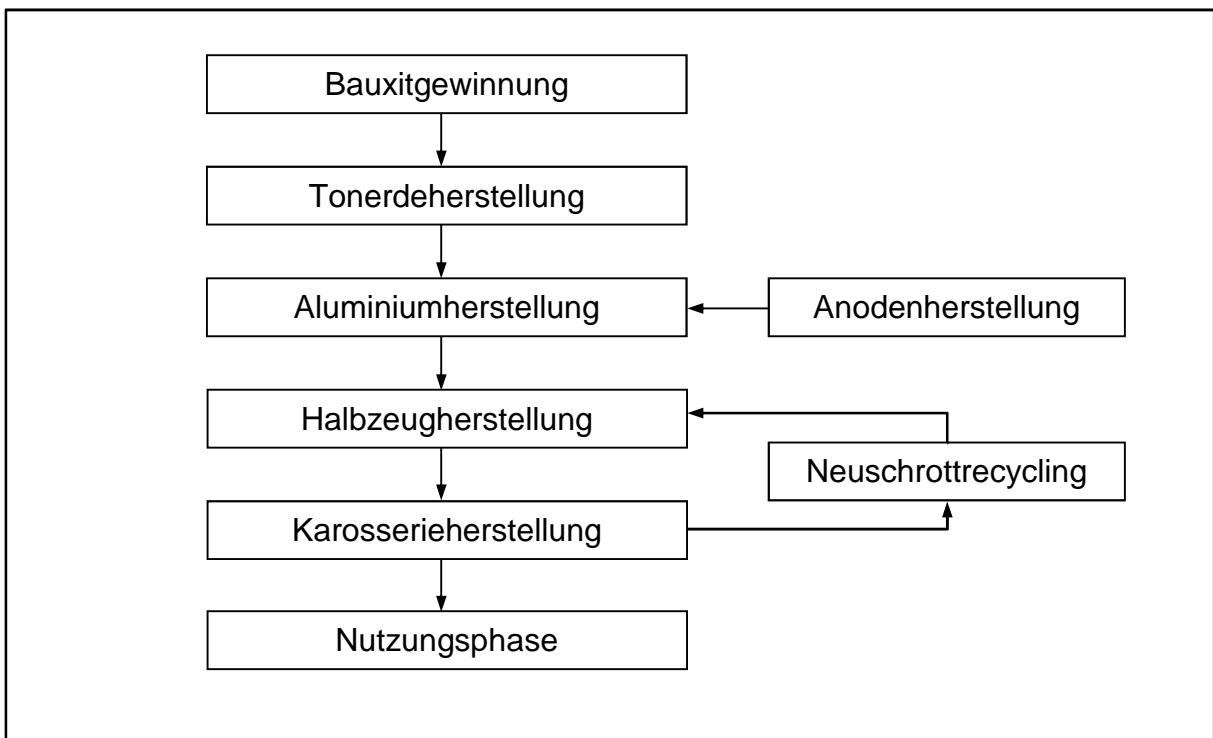


Abbildung 30: Produktsystem Aluminiumkarosserie¹⁹⁹

¹⁹⁸ Vgl. Heuss et. al. (2012), S. 8; Vgl. Krinke et. al. (2010), S. 442; Vgl. Friedrich (2013), S. 54

¹⁹⁹ Eigene Darstellung

Die folgende Berechnung des Energieverbrauchs und CO₂-Ausstoßes der Aluminiumkarosserieproduktion behandelt die in Abbildung 30 angeführten Prozessschritte.

Bauxitgewinnung

Die Bauxitgewinnung benötigt 0,0009 kWh elektrische und 0,0058 kWh fossile Energie pro kg Bauxit. Der CO₂-Ausstoß infolge des Konsums der fossilen Energie beträgt 0,002 kg CO₂/kWh.²⁰⁰

Mit dem KEA und dem CO₂-Ausstoß für elektrische Energie (Tabelle 11) wird der Primärenergieverbrauch und der CO₂-Ausstoß der elektrischen Energie berechnet.

Der gesamte Primärenergieverbrauch der Bauxitgewinnung, bezogen auf ein Kilogramm Bauxit (Tabelle 15) berechnet sich aus der fossilen Energie, die direkt in den Prozess fließt, und dem Primärenergieverbrauch zur Erzeugung der elektrischen Energie.

Der gesamte CO₂-Ausstoß der Bauxitgewinnung, bezogen auf ein Kilogramm Bauxit (Tabelle 15) berechnet sich aus dem CO₂-Ausstoß der zuvor genannten Primärenergie, der elektrischen Energie, sowie dem CO₂-Ausstoß infolge des Konsums der fossilen Energie, die direkt in den Prozess fließt.

Die Bauxitgewinnung wird in der EU, Deutschland, Österreich und Norwegen nicht betrachtet, da in diesen Ländern der Abbau dieses Erzes nicht betrieben wird.²⁰¹

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [^{kWh} /kg Bauxit]	-	-	-	0,0067	0,0067		0,0067
Primärenergie [^{kWh} /kg Bauxit]	-	-	-	0,0083	0,0082		0,0084
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /kg Bauxit]	-	-	-	0,0029	0,0028		0,0026

Tabelle 15: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß der Bauxitgewinnung²⁰²

Tonerdeherstellung

Zur Herstellung eines Kilograms Tonerde (Aluminiumoxid) werden 2,88 kg Bauxit benötigt. In den Prozess direkt fließen 0,18 kWh elektrische und 2,88 kWh fossile

²⁰⁰ European Aluminium Association (2013), S. 23

²⁰¹ Vgl. Bray (2013), S. 27

²⁰² Eigene Darstellung und Berechnung

Energie pro Kilogramm Tonerde. Der Verbrauch der fossilen Energie verursacht einen CO₂-Ausstoß von 0,83 kg CO₂/kg Tonerde.²⁰³

Die Berechnung des Primärenergieverbrauchs und des gesamten CO₂-Ausstoß verläuft nach dem gleichen Schema wie in der Bauxitgewinnung (Ergebnisse siehe Tabelle 16).

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [kWh/kg Tonerde]	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06	3,06
Primärenergie [kWh/kg Tonerde]	3,29	3,22	3,08	3,39	3,36	3,39	3,40
CO ₂ -Ausstoß [kg CO ₂ /kg Tonerde]	0,94	0,87	0,84	1,01	0,99	0,91	0,95

Tabelle 16: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß der Tonerdeherstellung²⁰⁴

Anodenherstellung

In die Herstellung der Anode fließen 0,108 kWh/kg Anode an elektrischer und 0,77 kWh/kg Anode an fossiler Energie. Der Verbrauch der fossilen Energie hat einen CO₂-Ausstoß von 0,199 kg CO₂/kg Anode zur Folge.²⁰⁵

Die länderspezifischen Werte für den Primärenergieverbrauch und den gesamten CO₂-Ausstoß zur Anodenherstellung (Tabelle 17) errechnen sich nach dem gleichen Schema, wie in der Bauxitherstellung.

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [kWh/kg Anode]	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Primärenergie [kWh/kg Anode]	1,01	0,97	0,89	1,07	1,05	1,07	1,08
CO ₂ -Ausstoß [kg CO ₂ /kg Anode]	0,26	0,22	0,20	0,30	0,29	0,25	0,27

Tabelle 17: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß der Anodenherstellung²⁰⁶

²⁰³ European Aluminium Association (2013), S.24

²⁰⁴ Eigene Darstellung und Berechnung

²⁰⁵ European Aluminium Association (2013), S.25

²⁰⁶ Eigene Darstellung und Berechnung

Aluminiumherstellung

Bei der Aluminiumherstellung werden $1,92 \text{ kg Tonerde/kg Aluminium}$ und $0,44 \text{ kg Anode/kg Aluminium}$ benötigt. Diese Faktoren dienen zur Aufrechnung des CO_2 -Ausstoßes und Energieverbrauchs der Tonerdeherstellung sowie der Anodenherstellung auf die Aluminiumproduktion. Bei der Elektrolyse wird die Anode verbraucht und verursacht dabei einen CO_2 -Ausstoß von $1,574 \text{ kg CO}_2/\text{kg Aluminium}$. Die Elektrolyse benötigt $14,88 \text{ kWh/kg Aluminium}$ an elektrischer Energie.²⁰⁷

Mit dem KEA (Tabelle 11) wird der Primärenergiebedarf der Elektrolyse (Tabelle 18) berechnet. Der CO_2 -Ausstoß des Prozesses (Tabelle 18) errechnet sich aus dem Stromverbrauch der Elektrolyse, multipliziert mit dem CO_2 -Faktor für Strom (Tabelle 11). Hinzu kommt der CO_2 -Ausstoß des Anodenverbrauchs.

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [kWh/kg Aluminium]	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88
Primärenergie [kWh/kg Aluminium]	33,95	28,44	16,68	42,40	39,36	42,26	42,85
CO_2 -Ausstoß [$\text{kg CO}_2/\text{kg Aluminium}$]	10,20	4,85	2,08	15,89	14,16	7,97	11,39

Tabelle 18: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO_2 -Ausstoß der Aluminiumherstellung²⁰⁸

Aluminiumbarren- und -Blechherstellung

Das Rohaluminium wird weiter zu Aluminiumbarren und Aluminiumblech verarbeitet. Die Aluminiumbarrenherstellung benötigt $0,98 \text{ kWh/kg}$ an elektrischer und $0,44 \text{ kWh/kg}$ fossiler Prozessenergie. Die Aluminiumblechherstellung benötigt $0,52 \text{ kWh/kg}$ an elektrischer und $0,44 \text{ kWh/kg}$ fossiler Prozessenergie.²⁰⁹

Die länderspezifischen Werte für den gesamten Primärenergieverbrauch und CO_2 -Ausstoß der Barrenherstellung (Tabelle 19) und der Blechherstellung (Tabelle 20) errechnen sich nach dem Schema wie es bereits in der Bauxitherstellung beschrieben wurde.

²⁰⁷ European Aluminium Association (2013), S. 27

²⁰⁸ Eigene Darstellung und Berechnung

²⁰⁹ European Aluminium Association (2013), S. 29

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [$\text{kWh}/\text{kg Al-Barren}$]	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
Primärenergie [$\text{kWh}/\text{kg Al-Barren}$]	2,68	2,31	1,54	3,23	3,03	3,22	3,26
CO ₂ -Ausstoß [$\text{kg CO}_2/\text{kg Al-Barren}$]	0,68	0,33	0,15	1,06	0,94	0,53	0,76

Tabelle 19: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß der Aluminiumbarrenherstellung²¹⁰

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [$\text{kWh}/\text{kg Al-Blech}$]	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Primärenergie [$\text{kWh}/\text{kg Al-Blech}$]	1,71	1,51	1,11	2,00	1,89	2,00	2,02
CO ₂ -Ausstoß [$\text{kg CO}_2/\text{kg Al-Blech}$]	0,43	0,24	0,15	0,63	0,57	0,35	0,47

Tabelle 20: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß der Aluminiumblechherstellung²¹¹

Aluminiumkarosseriefertigung

Zur Herstellung der einzelnen Karosseriebauteile werden drei verschiedene Technologien verwendet:

- Strangpressen
- Druckgießen
- Blechtiefziehen

Auf Grund der ausführlichen Datenlage werden die Daten des Audi A8 (D3) verwendet. Bei diesem Model verteilt sich die Masse der einzelnen Komponenten der Aluminiumkarosserie zu 29% auf Strangpressteile, zu 34% auf Gussteile und zu 37% auf Blechteile (Abbildung 31).²¹²

²¹⁰ Eigene Darstellung und Berechnung

²¹¹ ibidem

²¹² Vgl. Mayer/Venier/Koglin (2002), S. 95

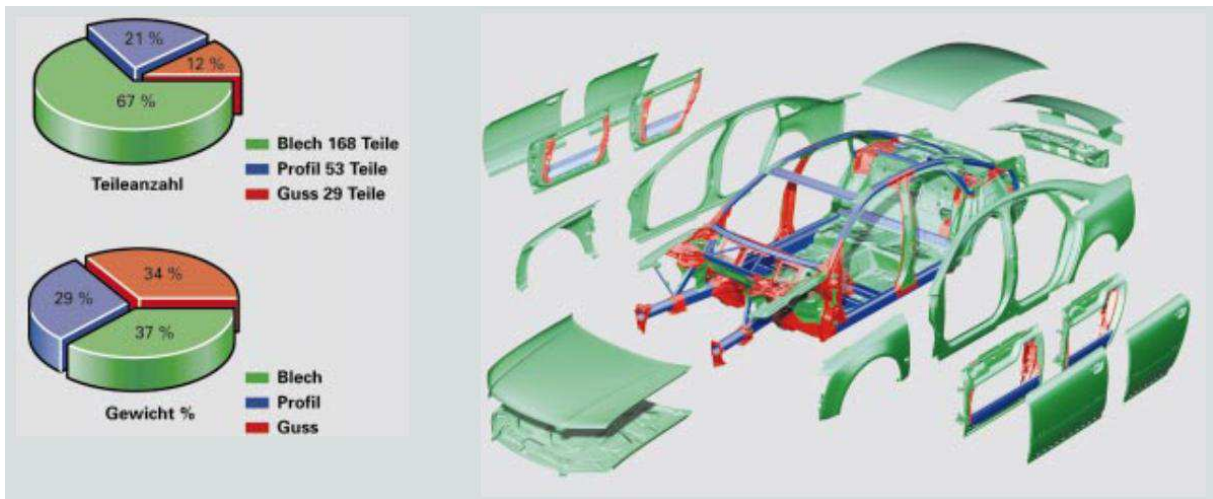


Abbildung 31: Prozentuelle Verteilung der Blech-, Profil- und Gussteile der Karosserie des Audi A8 (D3)²¹²

Der Energiebedarf für Strangpressteile beträgt $0,8 \text{ kWh/kg}$ elektrischer und $0,64 \text{ kWh/kg}$ fossiler Energie²¹³. Für Druckgussbauteile bzw. Blechbauteile beläuft sich der Verbrauch auf $0,97 \text{ kWh/kg}$ bzw. $0,31 \text{ kWh/kg}$ elektrischer Energie und auf $0,53 \text{ kWh/kg}$ fossiler Energie nur bei Druckgussbauteilen.²¹⁴

Aufgrund nicht vorhandener Daten zum Rohbau von Aluminiumkarosserien wird bei der Assemblierung der Teile der Wert aus dem Stahlkarosserierohbau verwendet. Dieser beträgt $0,56 \text{ kWh/kg}$ Karosserie.²¹⁵

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [kWh/kg Karosserie]	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Primärenergie [kWh/kg Karosserie]	3,19	2,73	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
CO ₂ -Ausstoß [$\text{kg CO}_2/\text{kg}$ Karosserie]	0,80	0,36	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Tabelle 21: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß der Aluminiumkarosseriefertigung²¹⁶

Es wird angenommen dass der Aluminiumschrott, der in der Karosseriefertigung anfällt, sortenrein gesammelt und als Neuschrott wieder der Barren und Blechherstellung zugeführt wird.²¹⁷

²¹³ European Aluminium Association (2013), S. 49

²¹⁴ PE International AG (2014)

²¹⁵ BMW AG (2013b), S. 7ff; BMW AG (2013a), S. 6ff

²¹⁶ Eigene Darstellung und Berechnung

²¹⁷ Vgl. Krinke et. al. (2010), S. 443

Der gesamte Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumkarosserie und eine Aluminiumkarosserie ist in Tabelle 22 zusammengefasst.

Dieser berechnet sich aus den Ergebnissen oben beschriebenen Prozesse. Eine detaillierte Berechnungsbeschreibung ist Anhang D zu entnehmen.

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [^{kWh} /kg Karosserie]	24,06	24,06	24,06	24,06	24,06	24,06	24,06
Primärenergie [^{kWh} /kg Karosserie]	48,40	41,83	27,83	58,46	54,83	58,29	58,99
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /kg Karosserie]	13,53	7,29	4,07	20,15	18,13	10,93	14,91
Prozessenergie [^{kWh} /Karosserie]	5975	5975	5975	5975	5975	5975	5975
Primärenergie [^{kWh} /Karosserie]	12016	10387	6910	14514	13613	14471	14647
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /Karosserie]	3358	1810	1009	5004	4502	2714	3703

Tabelle 22: Spez. CO₂-Ausstoß und Energiebedarf der Aluminiumkarosserieherstellung je nach Länder-Strom-Mix²¹⁸

4.2.3 CO₂-Ausstoß und Energieverbrauch der Herstellung einer Karosserie aus Kohlenstofffaser verstärktem Kunststoff

Das Gewichteinsparungspotential einer CFK-Karosserie ausgehend von einer Stahlkarosserie beträgt 60%.²¹⁹

Ausgehend von der Masse der unter Kapitel 4.2.1 angeführten Stahlkarosserie beläuft sich die Masse der CFK-Karosserie auf 165,5 kg.

Die Daten für CO₂-Ausstoß und Energieverbrauch zur Herstellung von PAN-Faser, Kohlenstofffaser und Matrixmaterial sowie zum Herstellungsverfahren von CFK-Bauteilen variieren sehr stark. In vielen Fällen ist nicht nachvollziehbar, woraus sich die angegebenen Werte ableiten. Auch die Tatsache dass Fasern und Matrixmaterial in unterschiedlichen Qualitäten zur Verfügung stehen, erschwert die Eingrenzung der Daten auf repräsentative Werte. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich durch den hohen Grad an Kombinierbarkeit von Faser, Matrixmaterial und Herstellungsverfahren.

²¹⁸ Eigene Darstellung und Berechnung

²¹⁹ Vgl. Das (2001), S. 21; Vgl. Lutsey (2010), S. 12; Vgl. Friedrich (2013), S. 54

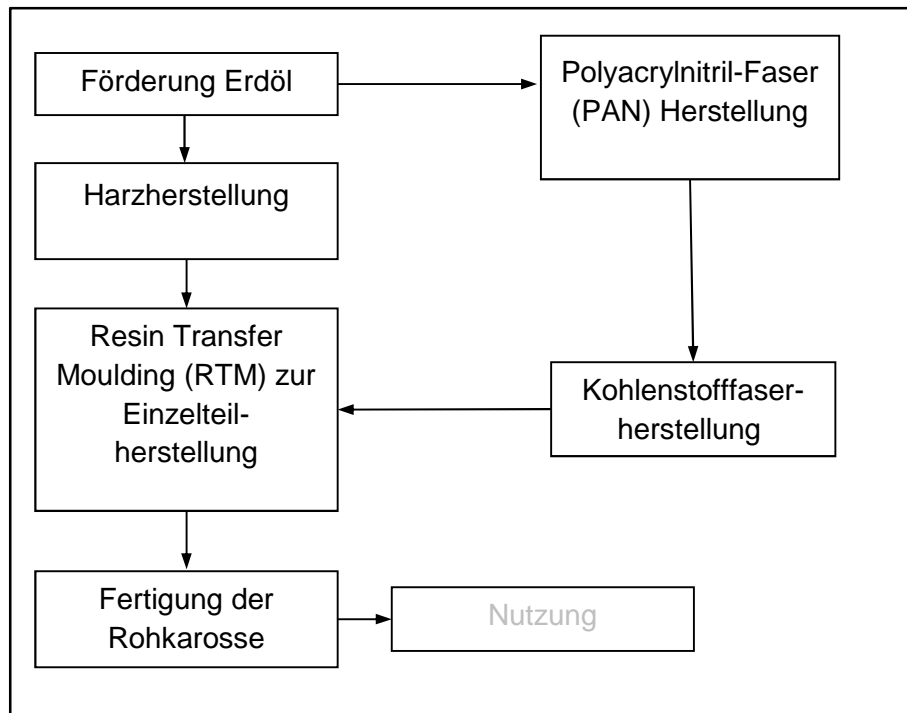
Auf Anfrage bei der Firma Eisenman, welche Fertigungsanlagen zur Kohlenstofffaserproduktion herstellt, sind die Gründe für die unterschiedliche und spärliche Datenlage bei der PAN-Faser- und Kohlenstofffaserherstellung folgende: Bei der Kohlenstofffaserindustrie handelt es sich um einen sehr „jungen“ Industriezweig, welcher zurzeit sehr stark wächst. Die Faserhersteller sind nicht bereit, Prozessdaten preiszugeben da diese als Betriebsgeheimnis angesehen werden. Selbst Anlagenbauern wird der Zugang zu solchen Daten verwehrt. Bei Anlagen mit einem Produktionsvolumen von 1500 t/Jahr ist jedoch mit einem Energieverbrauch von $25 \text{ kWh/kg Kohlenstofffaser}$ zu rechnen, wobei es Optimierungspotential durch Energierückgewinnung gibt. Großanlagen können bis zu 2500 t/Jahr an Kohlenstofffaser produzieren. Die Anlagen werden entweder mit einer Kombination aus Erdgas und elektrischer Energie beheizt oder ausschließlich mit elektrischer Energie betrieben. Der Energiebedarf der Anlage ist abhängig vom Faser-Typ, da sich die Carbonisierungstemperatur je nach gewünschter Faserqualität ändert (siehe Abbildung 14). Weiters haben Anlagengröße bzw. Garngröße (siehe 3.3.3.2) und der Einsatz von Energierückgewinnung starken Einfluss auf den Energiebedarf. Industriefasern besitzen eine Garngröße von 24K-50K und müssen geringere Anforderungen erfüllen als Fasern für Aerospace-Anwendungen. Diese geringeren Anforderungen bzw. mechanischen Eigenschaften haben ein niedrigeres Temperaturprofil zur Folge.²²⁰

Aufgrund einer stark variierenden Datenbasis zur Berechnung des Primärenergieverbrauchs und des CO_2 -Ausstoß der PAN-Faser- und Kohlenstofffaserherstellung werden zwei Szenarien betrachtet. Im ersten Szenario werden Daten für PAN-Faser- und Kohlenstofffaserherstellung nach Das (2011) verwendet. Im zweiten Szenario wird für die PAN-Faserherstellung der Wert aus GaBi und für die Kohlenstofffaserherstellung der Wert des Anlagenbauers HARPER International verwendet. Die Daten die dem Szenario nach Das (2011) zugerechnet werden, werden mit der Bezeichnung (HIGH) kommentiert, jene nach GaBi und des Anlagenbauers HARPER mit (LOW).

Als Matrixmaterial wird Epoxidharz verwendet²²¹. Der Energiebedarf für die Herstellung wird aus dem Datenblatt von EuropePlastic entnommen.

²²⁰ Firma EISENMANN Anlagenbau GmbH & Co. KG, E-Mailkorrespondenz vom 30.01.2014

²²¹ Vgl. Suzuki/Takahashi (2005), S. 17; Vgl. Suzuki et. al. (2000), S. 2

Abbildung 32: Produktsystem CFK-Karosserie²²²

PAN-Faserherstellung

Der Energieverbrauch in der PAN-Faserherstellung (HIGH) beträgt nach Das 64,46 kWh/kg an Erdgas und 0,77 kWh/kg an elektrischer Energie.²²³

Laut GaBi beträgt der gesamte Energieverbrauch und CO_2 -Austoß der PAN-Faserherstellung (LOW) 34,6 kWh/kg bzw. 5,1 $\text{kg CO}_2/\text{kg}$.²²⁴ Diese Werte beinhalten die gesamte Herstellungskette (Anhang F) von der Rohölförderung bis hin zur PAN-Faserherstellung. Die Werte laut Das und GaBi sind die einzig verfügbaren Werte zur PAN-Faserherstellung.

Eine länderspezifische Betrachtung kann bei der PAN-Faserherstellung nicht durchgeführt werden, da nach GaBi nur der Primärenergieverbrauch angegeben wird.

Weiters hat die Herkunft der elektrischen Energie bei den Werten nach Das einen geringen Einfluss auf den CO_2 -Austoß da der Anteil der elektrischen Energie nur 1,2% beträgt. Der CO_2 -Ausstoß berechnet sich mit dem Erdgasverbrauch und dem

²²² Eigne Darstellung

²²³ Vgl. Das (2011), S. 272

²²⁴ PE International AG (2014)

CO₂-Faktor für Erdgas (0,235 kg CO₂/kWh)²²⁵ sowie dem elektrischen Energieverbrauch und einem durchschnittlichen CO₂-Faktor für elektrische Energie von 0,5 kg CO₂/kWh.²²⁶ Der CO₂-Ausstoß beträgt 15,5 kg CO₂/kg PAN-Faser.

	PAN-Faser nach Das (2011)	PAN-Faser nach GaBi
Primärenergie [kWh/kg PAN-Faser]	68,6	34,6
CO ₂ -Ausstoß [kg CO ₂ /kg PAN-Faser]	15,5	5,1

Tabelle 23: Spez. Primärenergieverbrauch und CO₂-Ausstoß der PAN-Faserherstellung²²⁷

Kohlenstofffaserherstellung

Zur Herstellung von einem Kilogramm Kohlenstofffaser werden 2,21 kg PAN-Faser benötigt.²²⁸

Für den Prozess der Kohlenstofffaserherstellung (CF HIGH) werden laut Das, bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser, 27,06 kWh/kg CF an Erdgas und 20,02 kWh/kg CF an elektrischer Energie benötigt²²⁸. Mit für die Prozessenergie und dem KEA (Tabelle 11) wird der Primärenergieverbrauch berechnet.

Der CO₂-Ausstoß wird mit dem Erdgasverbrauch und dem CO₂-Faktor für Erdgas (0,235 kg CO₂/kWh)²²⁹, sowie dem elektrischen Energieverbrauch und dem länderspezifischen CO₂-Faktor für elektrische Energie (Tabelle 11) berechnet.

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [kWh/kg CF]	47,08	47,08	47,08	47,08	47,08	47,08	47,08
Primärenergie [kWh/kg CF]	72,74	65,33	49,51	84,11	80,01	83,92	84,72
CO ₂ -Ausstoß [kg CO ₂ /kg CF]	17,97	10,77	7,04	25,63	23,29	14,97	19,57

Tabelle 24: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß der Kohlenstofffaserherstellung (HIGH)²³⁰

Für die Kohlenstofffaserherstellung (LOW) werden laut HAPER International 27,3 kWh/kg CF an Energie benötigt. HAPER International fertigt Produktionsanlagen zur Herstellung von Kohlenstofffasern. Der oben genannte Energieverbrauch bezieht

²²⁵ Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014), Zugriffsdatum 11.01.2014; Fritsche et. al. (2013)

²²⁶ ibidem

²²⁷ Eigene Darstellung und Berechnung

²²⁸ Vgl. Das (2011), S. 272

²²⁹ Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014), Zugriffsdatum 11.01.2014; Fritsche et. al. (2013)

²³⁰ Eigene Darstellung und Berechnung

sich auf eine Anlage die jährlich 2250 Tonnen Kohlenstofffaser produziert und eine Fertigungslinienbreite von 3000mm besitzt. Weiters zeichnet sich diese Anlage durch Vorheizung der Ofenluft und eine Abgasnachbehandlung für Oxidation, Carbonisierung und Graphitisierung aus. Beschickt wird die Anlage mit PAN-Faser in einer tow-size von 12K. Die Verweildauer im Oxidationsofen beträgt 90 Minuten und im Carbonisationsofen sowie Graphitisierungsofen je 90 Sekunden.²³¹ Es wird angenommen, dass in dieser Anlage nur elektrischer Energie verwendet wird.²³²

Zur Berechnung des Primärenergieverbrauchs und der CO₂-Ausstoßes (Tabelle 25) werden wieder die Länderspezifischen Werte aus Tabelle 11 verwendet.

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [^{kWh} /kg CF]	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
Primärenergie [^{kWh} /kg CF]	62,30	52,18	30,61	77,80	72,21	77,53	78,62
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /kg CF]	15,83	6,01	0,92	26,27	23,09	11,74	18,02

Tabelle 25: spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß der Kohlenstofffaserherstellung (LOW)²³³

Epoxidharzherstellung

Als Matrixmaterial wird Epoxidharz verwendet, welches in der Herstellung 26,39 ^{kWh}/kg Epoxidharz an Energie benötigt und 5,71 ^{kg CO₂}/kg Epoxidharz ausstößt²³⁴.

Das Produktsystem des verwendeten Epoxidharzes vom Rohstoff bis zu fertigen Produkt ist Anhang G zu entnehmen.

Des Weiteren wird angenommen, dass der Prozessenergieverbrauch dem Primärenergieverbrauch gleich gleichgesetzt, da die Werte der Prozessenergien nicht bekannt sind.

RTM-Verfahren

Zur Herstellung der CFK-Karosserieeinzelteile wird das RTM-Verfahren gewählt welches, laut Suzuki/Takahashi 3,5 ^{kWh}/kg Bauteil an Energie benötigt²³⁵. Aufgrund der unzureichenden Datenlage wird angenommen, dass das RTM-Verfahren mit elektrischer Energie betrieben wird. Die länderspezifischen Werte für Primärenergie und CO₂-Ausstoß (siehe Tabelle 26) werden wieder mit den Werten aus Tabelle 11 berechnet.

²³¹ Vgl. Harper International (2014), Zugriffsdatum 05.02.2014

²³² Vgl. SGL GROUP (2011), S. 1; o.V. (2014a), Zugriffsdatum 05.02.2014

²³³ Eigene Darstellung und Berechnung

²³⁴ Boustead (2005), S. 10ff

²³⁵ Suzuki/Takahashi (2005), S. 10

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [$\frac{\text{kWh}}{\text{kg Bt}}$]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Primärenergie [$\frac{\text{kWh}}{\text{kg Bt}}$]	7,99	6,69	3,92	9,97	9,26	9,94	10,08
CO ₂ -Ausstoß [$\frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg Bt}}$]	2,03	0,77	0,12	3,37	2,96	1,51	2,31

Tabelle 26: Spez. CO₂-Ausstoß und Energiebedarf Im RTM-Verfahren je nach Länder-Strom-Mix²³⁶

Mit dem RTM-Verfahren kann ein Faservolumengehalt von 50% erzielt werden.²³⁷ Die Dichte von Kohlenstofffaser und Epoxidharz beträgt $1,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ bzw. $1,214 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.²³⁸ Daraus folgt eine Masseprozentverteilung von 59,7% Kohlenstofffaser und 40,3% Epoxidharz. Mit dem Faservolumengehalt und den Masseprozentverteilung wird der Anteil des CO₂-Ausstoßes und Energieverbrauch der Kohlenstofffaser und des Epoxidharzes am fertigen Bauteil berechnet.

Karosseriefertigung

BMW gibt an, dass die Fertigung des BMW i3 50% der Fertigungsenergie eines konventionellen Fahrzeuges benötigt²³⁹. Die Prozessenergie für die Stahlkarosserieherstellung in den BMW Werken Leipzig und Regensburg beträgt $0,45 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ bzw. $0,68 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$.²⁴⁰ Wie in der Berechnung der Stahlkarosseriefertigung wird der Mittelwert aus den beiden Energieverbräuchen berechnet, welcher $0,56 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ beträgt. Mit der Annahme der Energieeinsparung aus der BMW i3 Fertigung reduziert sich der Energieverbrauch im Zusammenbau der CFK-Karosserie auf $0,28 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ an elektrischer Energie, bezogen auf ein Kilogramm Karosserie. Die länderspezifischen Werte für Primärenergie und CO₂-Ausstoß (siehe Tabelle 27) werden wieder mit den Werten aus Tabelle 11 berechnet.

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [$\frac{\text{kWh}}{\text{kg Karosserie}}$]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Primärenergie [$\frac{\text{kWh}}{\text{kg Karosserie}}$]	0,64	0,54	0,32	0,80	0,74	0,80	0,81
CO ₂ -Ausstoß [$\frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg Karosserie}}$]	0,16	0,06	0,01	0,27	0,24	0,12	0,19

Tabelle 27: Spez. CO₂-Ausstoß und Energiebedarf der CFK-Karosseriefertigung je nach Länder-Strom-Mix²⁴¹

²³⁶ Eigene Darstellung und Berechnung

²³⁷ Vgl. Suzuki/Takahashi (2005), S. 16; o.V. (2014b) Zugriffsdatum 06.02.2014

²³⁸ o.V. (2003), S. 1.09; o.V. (2013d), S. 3

²³⁹ Vgl. BMW AG (2013c), S. 2

²⁴⁰ BMW AG (2013b), S. 7ff; BMW AG (2013a), S. 6ff

²⁴¹ Eigene Darstellung und Berechnung

Der gesamte Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß bezogen auf ein Kilogramm CFK-Karosserie sowie auf eine CFK-Karosserie ist in Tabelle 28 gegeben.

Der Prozentsatz der elektrischen Energie am gesamten Herstellungsprozess beträgt für CFK (LOW) 46,6% und für CFK (HIGH) 14,85%.

Dieser berechnet sich aus den Ergebnissen oben beschriebenen Prozesse. Eine detaillierte Berechnungsbeschreibung ist Anhang E zu entnehmen

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [^{kWh} /kg Karosserie]	161,19	161,19	161,19	161,19	161,19	161,19	161,19
Primärenergie [^{kWh} /kg Karosserie]	184,24	177,58	163,38	194,45	190,77	194,27	194,99
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /kg Karosserie]	39,38	32,90	29,56	46,25	44,15	36,68	40,81
Prozessenergie [^{kWh} /Karosserie]	26681	26681	26681	26681	26681	26681	26681
Primärenergie [^{kWh} /Karosserie]	30496	29394	27042	32186	31576	32156	32276
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /Karosserie]	6518	5446	4892	7656	7308	6071	6756

Tabelle 28: Spez. CO₂-Ausstoß und Energiebedarf der CFK-Karosserie je nach Länder-Strom-Mix (CFK HIGH)²⁴²

	Deutschland	Österreich	Norwegen	China	Australien	EU	USA
Prozessenergie [^{kWh} /kg Karosserie]	81,59	81,59	81,59	81,59	81,59	81,59	81,59
Primärenergie [^{kWh} /kg Karosserie]	109,13	101,18	84,19	121,34	116,94	121,13	121,99
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /kg Karosserie]	22,47	14,73	10,73	30,68	28,18	19,24	24,19
Prozessenergie [^{kWh} /Karosserie]	13504	13504	13504	13504	13504	13504	13504
Primärenergie [^{kWh} /Karosserie]	18064	16747	13936	20084	19356	20049	20192
CO ₂ -Ausstoß [^{kg CO₂} /Karosserie]	3719	2438	1776	5079	4664	3185	4003

Tabelle 29: CO₂-Ausstoß und Energiebedarf der CFK-Karosserieherstellung je nach Länder-Strom-Mix (CFK LOW)²⁴³

²⁴² Eigene Darstellung und Berechnung

²⁴³ ibidem

4.3 Sachbilanz über die Nutzungsdauer

Ausgangsbasis der Sachbilanz über die Nutzungsdauer sind Durchschnittsfahrzeuge des C-Segments mit fünf ausgewählten Antriebskonzepten und Stahlkarosserie. Bei diesen fünf Fahrzeugen wird die Simulationsmasse durch die Leichtbaukonzepte aus Aluminium und CFK reduziert. In den folgenden Kapiteln wird die Berechnung des Energieverbrauchs und CO₂-Ausstoßes während der Nutzungsdauer der verschiedenen Konzepte beschrieben. Es wird zuerst der Energiebedarf des Gesamtfahrzeuges durch eine Simulation in unterschiedlichen Fahrzyklen ermittelt. Für die Fahrzeuge mit Stahlkarosserie wird der Verbrauch laut Herstellerangaben verwendet. Der Energieverbrauch der Fahrzeuge mit Leichtbaukarosserie wird aus dem simulierten Energiebedarf und Wirkungsgrad berechnet und auf die Nutzungsdauer hochgerechnet. Mit den CO₂-Faktoren der unterschiedlichen Treibstoffe und dem ermittelten Energieverbrauch wird abschließend die CO₂-Emission über die gesamte Nutzungsdauer errechnet.

4.3.1 Auswahl der Antriebskonzepte

Für die Sachbilanz über Nutzungsdauer werden folgende fünf Antriebskonzepte betrachtet:

- Benzinmotor
- Dieselmotor
- Elektromotor
- Erdgasmotor
- Hybridantrieb mit Benzinmotor und Elektromotor

Benzin- und Dieselmotor werden auf Grund ihres hohen Marktanteils ausgewählt. In den USA und China werden Personenkraftwagen fast ausschließlich mit Benzinmotoren betrieben. In den 27 Ländern der EU (EU-27) betrug 2012 der Anteil der Fahrzeuge mit Benzinmotor lediglich 44%. Der Anteil der Dieselfahrzeuge ist in der EU mit 55% und Indien mit 40% im Vergleich zu anderen Regionen signifikant höher. Hingegen liegt dieser Anteil in den USA, Japan und China unter 3%.²⁴⁴

Der Anteil der Fahrzeuge mit Elektromotor am Fahrzeugbestand liegt zur Zeit noch weit unter dem von Benzin- und Dieselfahrzeugen, jedoch ist die Zuwachsrate bei dieser Sparte sehr hoch. Wurden in den USA 2011 noch 10.064 Fahrzeuge verkauft

²⁴⁴ Vgl. Mock (2013), S. 42

so waren es 2013 bereits 47.694, was eine Steigerung um 474% ist. Im selben Zeitraum in Deutschland, nahm der Bestand um von 2.307 auf 7.114 Fahrzeuge zu.²⁴⁵

Diese hohen Zuwachsraten sind der Grund für die Berücksichtigung in der Sachbilanz der Nutzungsdauer.

Erdgasfahrzeuge besitzen weder einen hohen Marktanteil, in den EU-27 betrug er 2012 1%, noch lässt sich in den letzten Jahren eine signifikante Steigerungsrate der Neuzulassungen erkennen. Eine Ausnahme bildet hier Italien, wo der Anteil der Verkauften Fahrzeuge 2012 13% betrug.²⁴⁶ Der Grund für die Berücksichtigung dieser Fahrzeuge in dieser Arbeit ist die geringere CO₂-Emission bei der Verbrennung des Kraftstoffes Erdgas gegenüber Benzin. Hauptbestandteil ist Methan mit einem Anteil von 80-99%, daher beträgt das Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnis von Erdgas 4:1, jenes von Benzin jedoch nur 2,3:1. Bei einer Umstellung eines Benzin Motors auf Erdgas kann bereits ohne Optimierung der CO₂-Ausstoß um 25% verringert werden.²⁴⁷

Bei Hybridantrieben sind wieder die Entwicklung der Neuzulassungen und der aktuelle Fahrzeugbestand ausschlaggebend, dass dieses Antriebsstrangkonzzept in die Betrachtung mit einbezogen wird. In den USA hat sich die Anzahl der Neuzulassungen von 2011 auf 2013 mit 495.530 fast verdoppelt und der Anteil am Gesamtbestand 2012 betrug ca. 5%. In den EU-27 betrug der Fahrzeuganteil zwar unter einem Prozent, jedoch stieg die Zahl der Neuzulassungen von 2011 auf 2012 um ca. 40%. Zahlen aus Deutschland zeigen eine Zunahme in 2013 von 70% gegenüber 2012 an. Den größten Anteil am Fahrzeugbestand haben Hybridfahrzeuge in Japan mit 16%.²⁴⁸

Die CO₂-Ausstöße der fossilen Kraftstoffe in der Herstellung und der Verbrennung sind im folgenden Kapitel in Tabelle 41 gegeben.

4.3.2 Auswahl und Beschreibung der Fahrzyklen

Der Energiebedarf wird für die Zyklen NEDC (New European Driving Cycle) und CADC (Common ARTEMIS Driving Cycle, in weiterer folge nur mehr ARTEMIS-Zyklus) berechnet.

²⁴⁵ Vgl. o.V. (2014c), Zugriffsdatum 12.02.2014; Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2013), Zugriffsdatum 12.02.2014

²⁴⁶ Vgl. Mock (2013), S. 44ff

²⁴⁷ Vgl. Robert Bosch GmbH (2007), S. 327f

²⁴⁸ Vgl. o.V. (2014c) Zugriffsdatum 12.02.2014; Vgl. Mock (2013), S. 41ff

Der NEDC wird gewählt, da er gegenwärtig in der EU die gesetzliche Vorgabe bildet um Verbrauchsangaben und CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen zu ermitteln und diese für den Kunden vergleichbar zu machen²⁴⁹.

Zusätzlich wird der ARTEMIS-Zyklus verwendet, welcher aus den Teilzyklen ARTEMIS-Urban, ARTEMIS-Rural und ARTEMIS-Motorway besteht. Er wird gewählt, da er gegenüber dem NEDC einem realeren Fahrverhalten entspricht.²⁵⁰

In den Fahrzyklen wird das gesamte Fahrzeug betrachtet da die Karosserie alleine während der Nutzungsdauer keinen Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß hervorruft. Aus diesem Grund kann die Karosserie direkt auch keine Einsparung während der Lebenszeit des Fahrzeugs generieren. Diese wird indirekt durch geringere Masse,, und damit weniger benötigte Energie am Antriebsstrang erzielt.

4.3.2.1 New European Driving Cycle

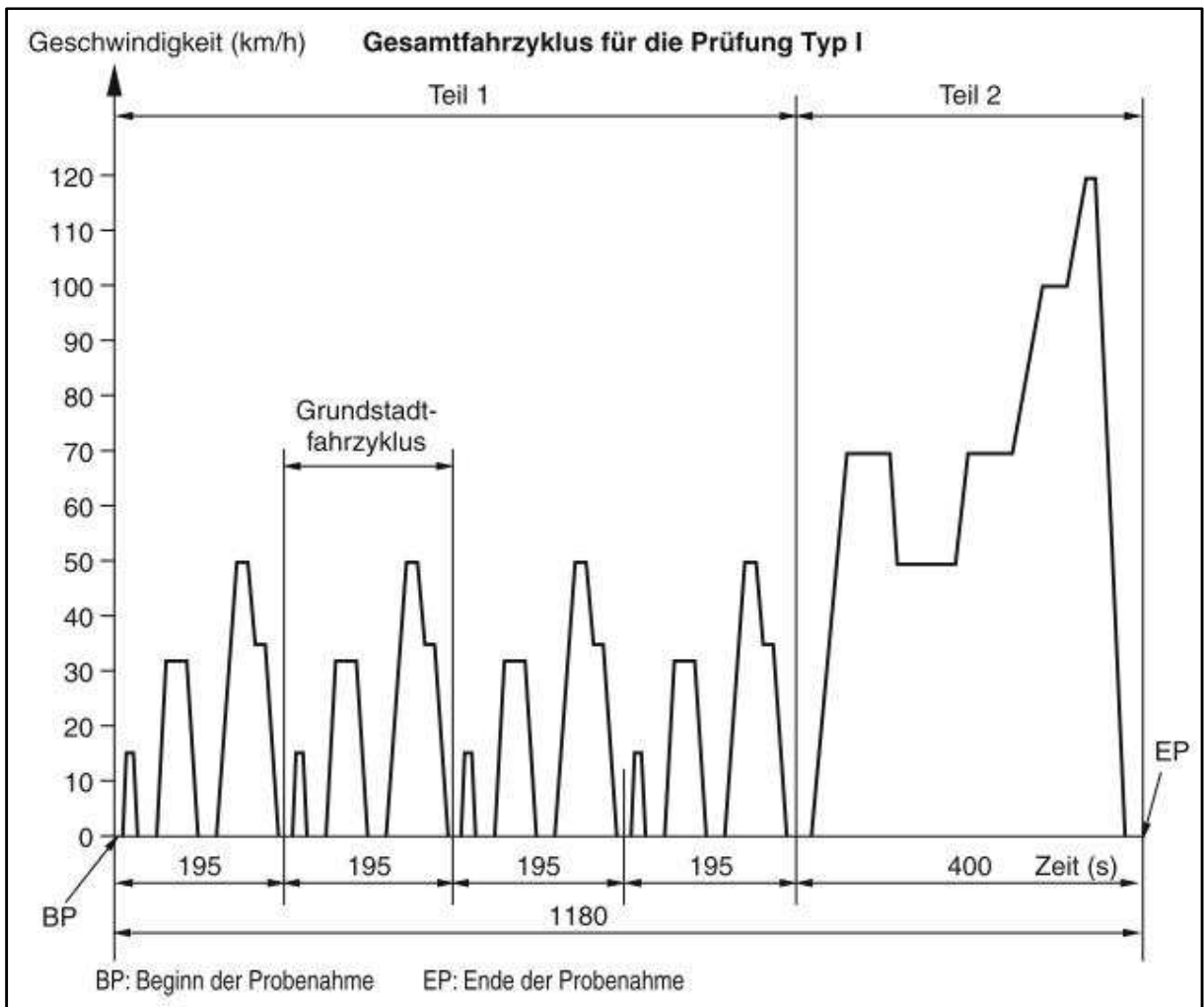
Der NEDC oder NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) ist für die europäische Typprüfung von Personenkraftwagen vorgeschrieben. Er entstand als Weiterentwicklung des ECE-Zyklus (Economic Commission for Europe), der nach wie vor den ersten Teil des NEDC bildet. Das Grundsegment des ECE besteht aus einem 195 Sekunden dauernden Grundstadtfahrzyklus (siehe Abbildung 33) welcher sich 4-mal wiederholt und eine Gesamtlänge 4067 Meter besitzt. Der zweite Teil des NEDC dauert 400 Sekunden, hat eine Länge von 6956 Meter, soll die außer städtischen Fahrten abbilden und wird als EUDC (Extra Urban Driving Cycle) bezeichnet.²⁵¹

Abbildung 33 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf des NEDC über die Zeit.

²⁴⁹ Vgl. Europäisches Parlament (1998), S. 5; Europäische Kommission (1999), S. 1

²⁵⁰ Vgl. Hausberger/Schmitzberger (2008), S. 9

²⁵¹ Vgl. Hausberger/Schmitzberger (2008), S. 8; Vgl. Braess/Seiffert, S. 22

Abbildung 33: Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit des NEDC²⁵²

4.3.2.2 ARTEMIS Fahrzyklus

Der ARTEMIS-Zyklus wurde im Rahmen des Projektes: *Assessment and Reliability of Transport Emission Modeling and Inventories* (ARTEMIS) entwickelt.²⁵³ Weiters beruht er auf realen Messdaten. Als Grundlage dienten dabei Daten von 77 Fahrzeugen, welche in Summe eine Strecke von 88.000 km zurückgelegt²⁵⁴. Aus den analysierten Daten wurden drei Zyklen generiert, welche drei typischen Fahrtstrecken entsprechen sollen. Dabei bildet der Motorway-Zyklus die Fahrten auf Autobahnen, der Rural Road-Zyklus die Fahrten auf Überlandstraßen und der Urban-Zyklus die Strecken in der Stadt ab. Die Charakteristika der Teilzyklen und des

²⁵²Braess/Seiffert, S. 22

²⁵³Vgl. Hausberger/Schmitzberger (2008), S. 8f

²⁵⁴Vgl. André (2004b), S. 76

Gesamtzyklus sind in Tabelle 30 ersichtlich. Abbildung 34 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit aller drei Teilzyklen.

Fahrtklasse und Beschreibung	Dauer in [s]	Prozentsatz der Kilometerleistung	Länge in [m]	Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]	Anhalterate in Stopps/km	Durchschnittliche Beschleunigung [m/s ²]
Motorway	1067	57,6	29545	99,7	0,10	0,52
Rural Road	1081	33,7	17272	57,5	0,29	0,58
Urban	920	8,7	4472	17,5	4,70	0,75
Gesamt	3068	100	51289	60,2	0,57	0,56

Tabelle 30: Beschreibung der drei Teilzyklen und des ARTEMIS-Zyklus²⁵⁵

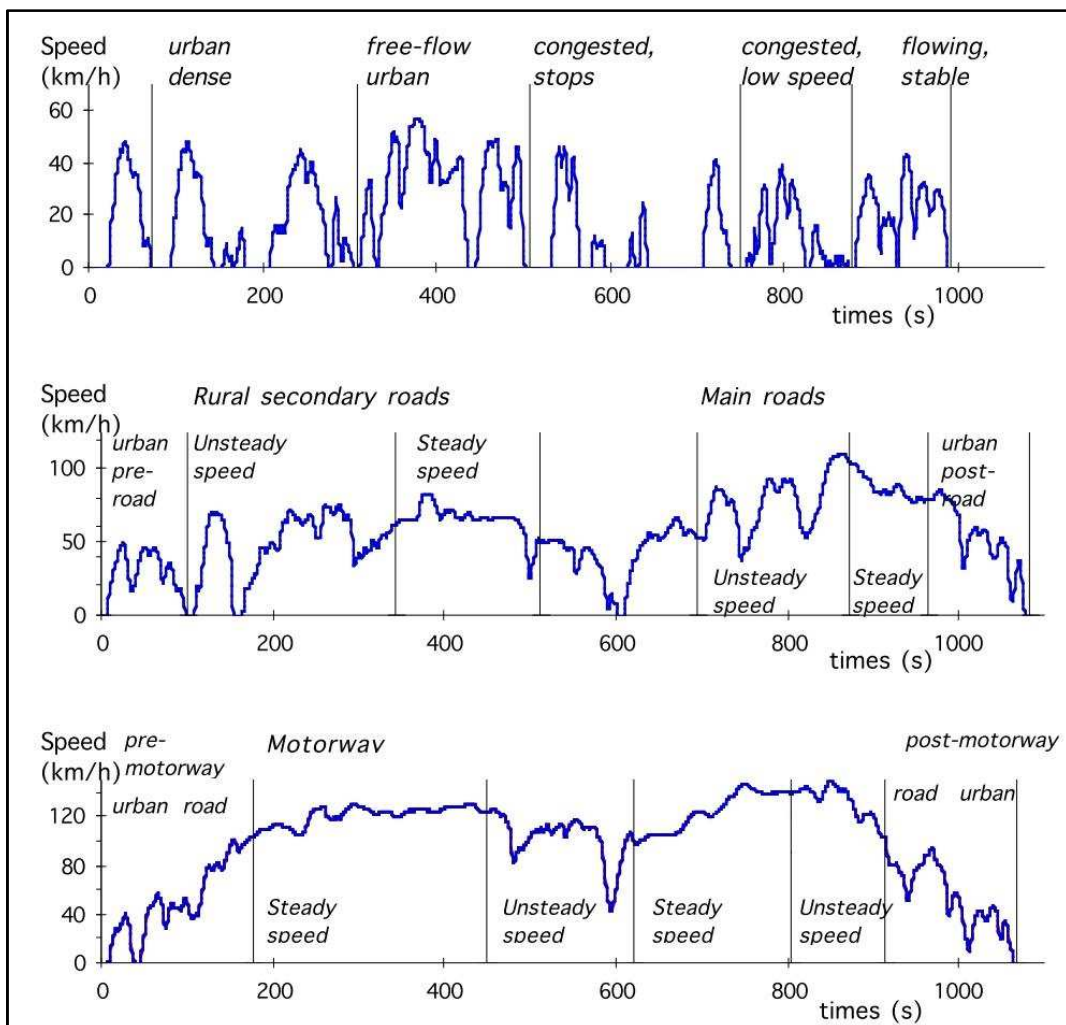


Abbildung 34: Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit der ARTEMIS-Zyklen ARTEMIS-Urban, ARTEMIS, Rural und ARTEMIS-Motorway²⁵⁶

²⁵⁵ André (2004a), S. 53, eigene Darstellung

4.3.3 Simulation und Berechnung des Energieverbrauchs im NEDC

Es wird der Energiebedarf von Fahrzeugen mit der Masse m und dem Luftwiderstand $c_w \cdot A$ im ECE, EUDC und NEDC in den oben angeführten Zyklen simuliert, wobei c_w der Luftwiderstandsbeiwert und A die projizierte Fläche des Fahrzeugs in Fahrtrichtung ist.

Es wird dabei nicht ein konkretes Fahrzeug eines Herstellers als Datengrundlage verwendet, sondern ein generiertes Durchschnittsfahrzeug betrachte welches am Institut für Fahrzeugtechnik der TU Graz generiert wurde. Zur Erstellung dieses Durchschnittsfahrzeuges wird über eine Reihe von Fahrzeugen des C-Segments mit Stahlkarosserie der Durchschnittswert für Masse und Luftwiderstand für jedes Antriebsstrangkonzept gebildet (siehe Tabelle 31). Die Werte stammen aus Preislisten und technischen Datenblättern der Fahrzeughersteller, die frei zugänglich sind.²⁵⁷ Der Gesamtmasse des Fahrzeuges wird eine Masse von 80kg hinzu addiert. Diese 80kg repräsentieren den/die LenkerIn.

Fahrzeugsegment	C	C	C	C	C
Antriebsstrang	Benzin	Diesel	Elektro	Erdgas	Hybrid
Gesamtmasse [kg]	1282	1369	1686	1297	1419
Luftwiderstand $c_w \cdot A$	0,71	0,71	0,6	0,79	0,71

Tabelle 31: Durchschnittswerte für Fahrzeug mit Stahlkarosserie im C-Segment inklusive Fahrer²⁵⁸

Das Berechnungsprogramm ermittelt mit den angegebenen Formeln für Luft- (Formel 1) Roll- (Formel 2) und Beschleunigungswiderstand (Formel 3) den gesamten Fahrwiderstand (Formel 4) und daraus den gesamten Energiebedarf (Formel 5) in kWh an den Antriebsrädern im jeweiligen Fahrzyklus. Der Steigungswiderstand wird nicht berücksichtigt, da in den Fahrzyklen keine Höhenprofile der Strecken enthalten sind. Um den Energiebedarf der verschiedenen Zyklen miteinander vergleichen zu können wird dieser auf 100 km Wegstrecke bezogen.

²⁵⁶ André (2004a), S. 51

²⁵⁷ Vgl. Brunner (2013), S. 16

²⁵⁸ Eigene Darstellung

$$F_L = c_W * A * \rho * \frac{v^2}{2}$$

F_L ...Luftwiderstand [N]

c_W ...Luftwiderstandsbeiwert

A ...Projizierte Fahrzeugfläche in Fahrtrichtung [m²]

ρ ...Dichte der Luft [kg/m³]

v ... Geschwindigkeit des Fahrzeuges [m/s]

Formel 1: Luftwiderstand²⁵⁹

$$F_R = f * m * g$$

F_R ...Rollwiderstand [N]

f ...Rollwiderstandsbeiwert

m ...Masse des Fahrzeuges [kg]

g ...Erdbeschleunigung [m/s²]

Formel 2: Rollwiderstand²⁶⁰

$$F_B = \lambda * m * a$$

F_B ... Beschleunigungswiderstand [N]

λ ...Drehmassenzuschlag

m ...Masse des Fahrzeuges [kg]

a ...Beschleunigung des Fahrzeuges [m/s²]

Formel 3: Beschleunigungswiderstand²⁶¹

²⁵⁹ Vgl. Friedrich (2013), S. 31, eigene Darstellung

²⁶⁰ ibidem

²⁶¹ ibidem

$$F_W = F_L + F_R + F_B$$

F_W ...Gesamter Fahrwiderstand [N]

F_L ...Luftwiderstand [N]

F_R ...Rollwiderstand [N]

F_B ... Beschleunigungswiderstand [N]

Formel 4: Gesamter Fahrwiderstand für ebene Fahrbahnen²⁶²

Für die gesamte Simulation wird die Dichte der Luft mit $\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$, der Rollwiderstandsbeiwert der Reifen mit $f=0,015$ und der Drehmassenzuschlag für die rotierenden Bauteile im Antriebsstrang mit $\lambda=1,034$ angenommen.

$$E_W = \int F_W ds$$

E_W ...Gesamter Energiebedarf über die Länge s [J]

F_W ...Gesamter Fahrwiderstand [N]

s ... Länge des simulierten Zyklus [m]

Formel 5: Energiebedarf über die gesamte Zykluslänge²⁶³

Bei Fahrzeugen mit Hybrid- und Elektroantrieb wird in der Simulation die rekuperierte Energie mit berücksichtigt. Die Verringerung des Energiebedarfs berechnet sich dabei aus der gesamten Energie infolge der Fahrzeugverzögerung, multipliziert mit einem Wirkungsgrad von 0,4. Dieser Wirkungsgrad berücksichtigt folgende Faktoren:²⁶⁴

- Fahrwiderstände (natürliche Rekuperation)
- Mechanisches Bremsen unter 5 km/h
- Gleichrichterverluste

sowie bei Rekuperation und Antrieb

- Speicherwirkungsgrad (laden/entladen)
- E-Maschinenverluste
- Getriebeverluste
- Antriebswellenverluste

²⁶² Vgl. Friedrich (2013), S. 32, eigene Darstellung

²⁶³ ibidem

²⁶⁴ Vgl. Vanhaelst/Scheuermann (2012), S. 16

Dieser Rekuperationswirkungsgrad wurde im NEDC von Vanhaelst/Scheuermann durch die physikalische Modellierung eines elektrischen Antriebsstranges eines Hybridfahrzeuges in MATLAB simuliert.²⁶⁵

Mit dem errechneten Energiebedarf aus dem ECE, EUDC und NEDC, der Fahrzeugdaten aus Tabelle 31 und den durchschnittlichen Verbrauchsangaben für ECE, EUDC und NEDC werden die Wirkungsgrade für diese drei Fahrzyklen berechnet (Ergebnisse siehe Tabelle 32).

Für Fahrzeuge mit Elektrischem Antrieb kann nur ein Wirkungsgrad errechnet werden, da die Recherche keine Verbräuche für ECE und EUDC ergeben hat. Nach Brunner wird für den elektrischen Antrieb in den Zyklen ECE und EUDC ein Wirkungsgrad von 0,63 bzw. 0,74 verwendet²⁶⁶.

Zyklus	Benzin			Diesel			Elektro	Erdgas			Hybrid		
	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC
Energiebedarf [kWh/100km]	9,9	13,3	12,1	10,6	13,9	12,6	11,3	10,2	14,0	12,6	7,6	12,5	10,7
Verbrauchsangaben [kWh/100km]	64,2	41,0	49,5	50,9	36,6	41,8	14,4	62,2	40,2	48,2	38,3	33,1	35,0
Wirkungsgrad	0,155	0,326	0,244	0,207	0,378	0,302	0,786	0,163	0,349	0,261	0,198	0,378	0,306

Tabelle 32: Ergebnistabelle zu den Zykluswirkungsgraden²⁶⁷

Bei diesen Fahrzeugen wird die Masse der Stahlkarosserie (Kapitel 4.2.1) durch die Masse des jeweiligen Leichtbaukonzeptes ersetzt (siehe Kapitel 4.2.2 und 4.2.3). Die Fahrzeugmassen der Leichtbaukonzepte sind in Tabelle 33 und Tabelle 34 angegeben. Die Werte für den Luftwiderstand bleiben unverändert.

Fahrzeugsegment	C	C	C	C	C
Antriebsstrang	Benzin	Diesel	Elektro	Erdgas	Hybrid
Gesamtmasse [kg]	1116	1203	1521	1132	1254

Tabelle 33: Werte für Fahrzeug mit Aluminiumkarosserie im C-Segment inklusive Fahrer²⁶⁸

Fahrzeugsegment	C	C	C	C	C
Antriebsstrang	Benzin	Diesel	Elektro	Erdgas	Hybrid
Gesamtmasse [kg]	1034	1121	1438	1049	1171

Tabelle 34: Werte für Fahrzeug mit CFK-Karosserie im C-Segment inklusive Fahrer²⁶⁹

²⁶⁵ Vgl. Vanhaelst/Scheuermann (2012), S. 18

²⁶⁶ Brunner (2013), S. D

²⁶⁷ Eigene Darstellung und Berechnung

²⁶⁸ ibidem

²⁶⁹ ibidem

Der Energieverbrauch der Fahrzeuge mit Aluminium- und CFK-Karosserie (Tabelle 35 u. Tabelle 36) in den Zyklen ECE, EUDC und NEDC wird mit den Wirkungsgraden aus Tabelle 32 und dem zugehörigen Energiebedarf berechnet.

Zyklus	Benzin			Diesel			Elektro			Erdgas			Hybrid		
	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC
Energiebedarf [kWh/100km]	8,8	12,3	11,0	9,4	12,8	11,6	7,9	12,1	10,6	9,0	13,0	11,5	6,9	11,7	9,9
Energieverbrauch [kWh/100km]	56,7	37,7	45,0	45,3	33,9	38,3	10,1	15,4	13,4	55,2	37,3	44,2	34,5	31,0	32,5

Tabelle 35: Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit Aluminiumkarosserie²⁷⁰

Zyklus	Benzin			Diesel			Elektro			Erdgas			Hybrid		
	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC	ECE	EUDC	NEDC
Energiebedarf [kWh/100km]	8,2	11,8	10,5	8,8	12,3	11,0	7,5	11,7	10,2	9,0	13,0	11,5	6,9	11,7	9,9
Energieverbrauch [kWh/100km]	53,0	36,1	42,8	42,5	32,6	36,5	9,6	14,9	12,9	51,6	35,8	42,1	32,6	30,0	31,2

Tabelle 36: Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit CFK-Karosserie²⁷¹

4.3.4 Simulation und Berechnung des Energieverbrauchs im ARTEMIS

Der Energiebedarf aller Karosserie-Antriebsstrang-Varianten wird in allen drei ARTEMIS-Teilzyklen und dem gesamten ARTEMIS-Zyklus in MATLAB berechnet. Als Fahrzeugdaten werden die Werte aus Tabelle 31, Tabelle 33 und Tabelle 34 verwendet. Weiters wird mit den Wirkungsgraden aus Tabelle 32 und dem Energiebedarf aus den ARTEMIS-Zyklen der Energieverbrauch im jeweiligen ARTEMIS-Zyklus berechnet (siehe Tabelle 37 bis Tabelle 39). Wobei der ECE-Wirkungsgrad zur Berechnung des Verbrauchs im ARTEMIS-Urban, der EUDC-Wirkungsgrad zur Berechnung des Verbrauchs im ARTEMIS-Motorway und der EUDC-Wirkungsgrad zur Berechnung des Verbrauchs im ARTEMIS-Rural Road verwendet wird. Abkürzungen in den folgenden Tabellen: A-U (ARTEMIS-Urban), A-R (ARTEMIS-Rural Road), A-M (ARTEMIS-Motorway)

²⁷⁰ Eigene Darstellung und Berechnung

²⁷¹ ibidem

	Benzin				Diesel				Elektro				Erdgas				Hybrid			
Zyklus	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G
Energiebedarf [kWh/100km]	13,0	13,0	19,8	16,9	13,9	13,6	20,3	17,5	9,2	11,8	18,7	15,5	13,3	13,6	21,3	18,0	8,1	11,2	19,4	15,6
Energieverbrauch [kWh/100km]	84,3	40,0	60,8	56,6	66,9	36,1	53,7	49,5	14,6	16,0	23,8	20,4	81,5	38,9	61,1	56,2	40,9	29,7	51,4	43,4

Tabelle 37: Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit Stahlkarosserie in den ARTEMIS-Zyklen²⁷²

	Benzin				Diesel				Elektro				Erdgas				Hybrid			
Zyklus	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G
Energiebedarf [kWh/100km]	11,5	11,8	18,8	15,8	12,3	12,4	19,3	16,4	8,4	11,0	17,9	14,8	11,7	12,4	20,4	16,9	7,3	10,4	18,7	14,9
Energieverbrauch [kWh/100km]	74,2	36,3	57,8	52,7	59,3	32,9	51,2	46,2	13,4	14,9	22,8	19,3	71,9	35,5	58,4	52,5	36,9	27,6	49,4	41,2

Tabelle 38: Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit Aluminiumkarosserie in den ARTEMIS-Zyklen²⁷³

	Benzin				Diesel				Elektro				Erdgas				Hybrid			
Zyklus	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G	A-U	A-R	A-M	A-G
Energiebedarf [kWh/100km]	10,7	11,2	18,4	15,3	11,5	11,9	18,9	15,9	8,0	10,6	17,6	14,4	11,0	11,8	19,9	16,4	6,9	10,0	18,3	14,5
Energieverbrauch [kWh/100km]	69,2	34,5	56,4	50,8	55,6	31,4	49,9	44,6	12,7	14,4	22,4	18,8	67,2	33,8	57,1	50,7	34,9	26,5	48,4	40,0

Tabelle 39 Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit CFK-Karosserie in den ARTEMIS-Zyklen²⁷⁴

4.3.5 Berechnung des Energieverbrauchs über die Nutzungsdauer

Der Energieverbrauch wird auf eine FahrzeugNutzungsdauer von 200.000 Kilometer hochgerechnet. Diese Annahme beruht auf einem durchschnittlichen Fahrzeugalter bei der Verwertung von 14,4 Jahren, und einer durchschnittlichen jährlichen Kilometerleistung von 13.497 Kilometer pro Jahr²⁷⁵. Der daraus errechnete Wert von 194356,8 km wird aufgerundet.

Die energetische Vorkette der Energieträger Benzin, Diesel und Erdgas wird berücksichtigt in dem der Energieverbrauch während der Nutzungsdauer mit dem

²⁷² Eigene Darstellung und Berechnung

²⁷³ ibidem

²⁷⁴ ibidem

²⁷⁵ Höpfner/Hanusch/Lambrecht (2009), S. 3; VCÖ - MOBILITÄT MIT ZUKUNFT (2010), S. 2

KEA aus Tabelle 40 multipliziert wird. In der Berechnung werden die Faktoren den jeweiligen Energieträgern zugeordnet.

	Benzin	Diesel	Erdgas
KEA [$\frac{\text{kWh}}{\text{kWh Kraftstoff}}$]	1,29	1,22	1,17

Tabelle 40: KEA der Kraftstoffherstellung²⁷⁶

Bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb variiert der KEA je nach länderspezifischem Strom-Mix (siehe Tabelle 11).

Die Ergebnisse der Berechnung werden als Energieverbrauch in Kilowattstunden pro 100 Kilometer ($\frac{\text{kWh}}{100\text{km}}$) angegeben und umfassen neben den drei Leichtbaukonzepten somit auch sechs Fahrzyklen und fünf Antriebskonzepte.

4.3.6 Berechnung des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer

Bei den Energieträgern Benzin, Diesel und Erdgas wird der CO₂-Ausstoß mit dem Energieverbrauch während Nutzungsdauer und den CO₂-Faktoren für Kraftstoffverbrennung und -Herstellung berechnet (siehe Tabelle 41).

	Benzin	Diesel	Erdgas
CO ₂ -Ausstoß in der Herstellung [$\frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$]	0,0605	0,0531	0,0484
CO ₂ -Ausstoß bei der Verbrennung in [$\frac{\text{kg CO}_2}{\text{l}}$] für Benzin und Diesel bzw. [$\frac{\text{kg CO}_2}{\text{m}^3}$] für Erdgas	2,33	2,63	2,01
Heizwert in [$\frac{\text{kWh}}{\text{l}}$] für Benzin und Diesel bzw. [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$] für Erdgas	8,2	9,94	10,77
CO ₂ -Faktor inkl. Herstellung und Verbrennung in [$\frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$]	0,325	0,318	0,235

Tabelle 41: CO₂-Faktoren für die Herstellung und Verbrennung fossiler Kraftstoffe²⁷⁷

²⁷⁶ Fritsche et. al. (2013), eigene Darstellung

Bei elektrischer Energie werden nur die CO₂-Faktoren für die Herstellung der elektrischen Energie benötigt. Diese sind abhängig vom Strom-Mix und sind in Tabelle 11 gegeben.

Der gesamte Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß über die Nutzungsdauer aller Antriebsstrangarten und Karosseriekonzepte für den NEDC und den gesamten Artemis ist Abbildung 42 und Abbildung 43 zu entnehmen.

Für die Berechnung der Nutzungsdauer ergeben sich aus den Variationsmöglichkeiten für Fahrzyklen, Antriebsstrang und Karosserie, 231 mögliche Kombinationen.

4.4 Gesamter Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß

Der Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß der Nutzungsdauer wird dem entsprechenden Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß in der Karosserieherstellung je nach betrachteter Variante zugeordnet und addiert.

Für den die Berechnung des Lebenszyklus ergeben sich aus den Variationsmöglichkeiten für Fahrzyklen, Antriebsstrang und Karosserie und deren Herstellungsort, 1.313.004 mögliche Kombinationen.

²⁷⁷ Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014); Braess/Seiffert , S. 373; Robert Bosch GmbH (2007), S. 332; Fritsche et. al. (2013) , eigene Darstellung

5 Auswertung und Interpretation

Die Auswertung und Interpretation der Lebenszyklusanalyse der Leichtbaukonzepte gliedert sich in vier Teile:

- Getrennte Betrachtung von Karosserieherstellung und Nutzungsdaueranalyse
- Betrachtung des Einflusses der Teilzyklen
- Betrachtung des Einflusses der Antriebsstränge
- Betrachtung des Einflusses des länderspezifischen Strom-Mixes

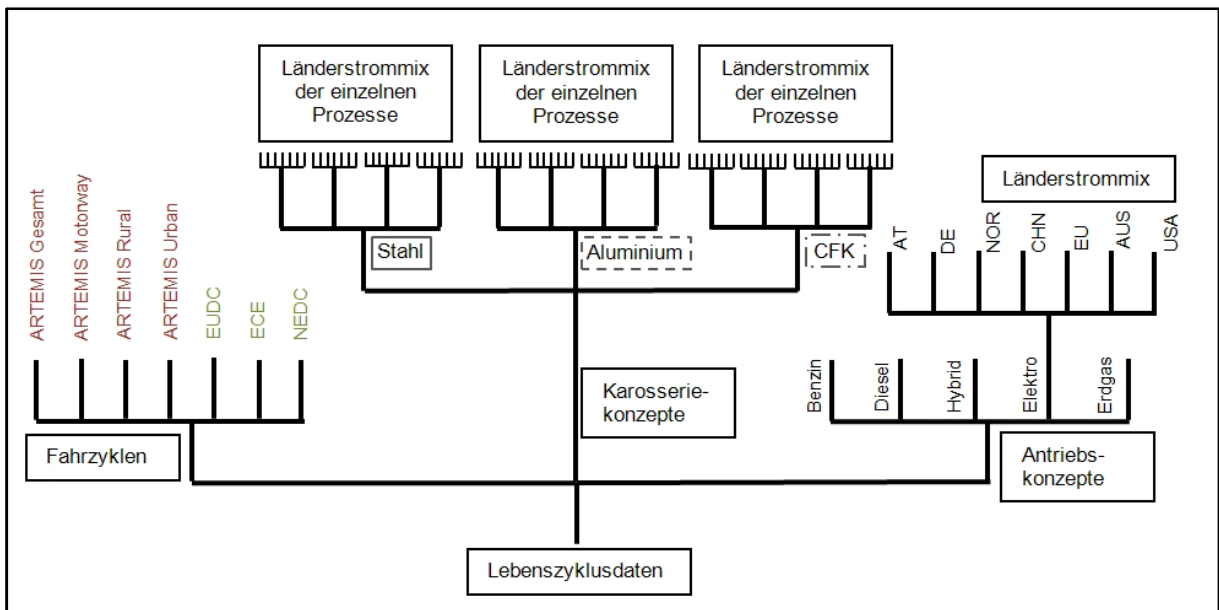
Die Auswertung beschränkt sich nur auf ausgewählte Beispiele der möglichen Berechnungsvarianten, da sich durch die Kombination der 3 Hauptkategorien (Fahrzyklen, Antriebskonzepte und Karosseriekonzepte, siehe Abbildung 35) alleine bereits 105 Kombinationsmöglichkeiten ergeben. Durch die Hinzunahme der länderspezifischen Strom-Mixe erweitern sich die Variationsmöglichkeiten um ein Vielfaches. Die vollständige Betrachtung aller dieser Variationen würde den Rahmen der Arbeit sprengen.

Aus diesem Grund werden in der Auswertung und Interpretation folgende Bereiche schwerpunktmäßig betrachtet:

- Strom-Mix für China, Norwegen und der EU, da die Extremwerte der CO₂-Faktoren China und Norwegen zuzuordnen sind, und da die EU weltweit die höchste Anzahl an Fahrzeugen aufweist²⁷⁸. Dies gilt sowohl für die Karosserieherstellung als auch für den Betrieb von Elektrofahrzeugen.
- Antriebsstränge mit Benzin-, Erdgas und Elektromotor. Antriebsstränge mit Dieselmotor und Hybridkonzept werden ausgeklammert, da deren CO₂-Ausstoß, wie in Abbildung 42 ersichtlich, zwischen denen von Benzin- und Erdgasmotor liegt. Der Elektromotor wird in die Betrachtung aufgenommen, da Leichtbau zur Reichweitenvergrößerung eine wichtige Rolle spielt.
- ARTEMIS-Zyklus und dessen Teilzyklen (Begründung: siehe Kapitel **Fehler!** **Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

Abbildung 35 veranschaulicht die Strukturierung der gesammelten Daten und gibt einen Überblick über den Umfang Variationsmöglichkeiten.

²⁷⁸ Vgl. Mock (2013), S. 10

Abbildung 35: Haupt- und Unterkategorien der Daten²⁷⁹

5.1 Karosserieherstellung und Nutzungsdaueranalyse

In den folgenden Kapiteln werden die Herstellung der drei Karosseriekonzepte und die Nutzungsdauer des Fahrzeuges getrennt voneinander betrachtet.

In der Auswertung der Herstellung werden die Unterschiede im CO₂-Ausstoß und Energieverbrauch der Karosseriekonzepte in Bezug auf den verwendeten Strom-Mix untersucht.

In der Nutzungsdauerbetrachtung werden der Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß aller Antriebsstrang-Karosserie-Kombinationen im NEDC und gesamten ARTEMIS-Zyklus miteinander verglichen.

5.1.1 Karosserieproduktion

Dieses Kapitel beschränkt sich ausschließlich auf die Betrachtung der Produktion der Karosserien und vergleicht dabei deren CO₂-Ausstoß sowie den Prozess- und Primärenergieverbrauch. Zusätzlich werden bei der CFK-Karosserie zwei mögliche Produktionsprozesse (LOW und HIGH) betrachtet (siehe Kapitel 4.2.3). Darüber hinaus wird der Strom-Mix des jeweiligen Produktionsstandorts berücksichtigt, der sich in unterschiedlichen CO₂-Faktoren widerspiegelt. Die Darstellung erfolgt in Absolutwerten, sowie bezogen auf ein Kilogramm der jeweiligen Karosserie (siehe Abbildung 36 bis Abbildung 41).

²⁷⁹ Eigene Darstellung

In diesen Abbildungen ist ersichtlich, dass generell die Stahlkarosserie den geringsten Prozess- und Primärenergieverbrauch sowie CO₂-Ausstoß aufweist, wo hingegen die CFK-Karosserieherstellung (HIGH) das andere Ende des Spektrums darstellt. Die CFK- Karosserieherstellung (LOW) weist zwar einen geringeren Prozessenergieverbrauch auf, der Anteil der elektrischen Energie der CFK-Herstellungsvariante (LOW) ist mit 48,70% allerdings wesentlich höher als jener der CFK-Karosserieherstellung (HIGH) mit 14,85%. Die Aluminiumkarosserieherstellung besitzt mit 71,4% den höchsten Anteil elektrischer Energie an der Prozessenergie (siehe Abbildung 36 und Abbildung 37). Auf den Einfluss des Stromanteils wird in weiterer Folge eingegangen.

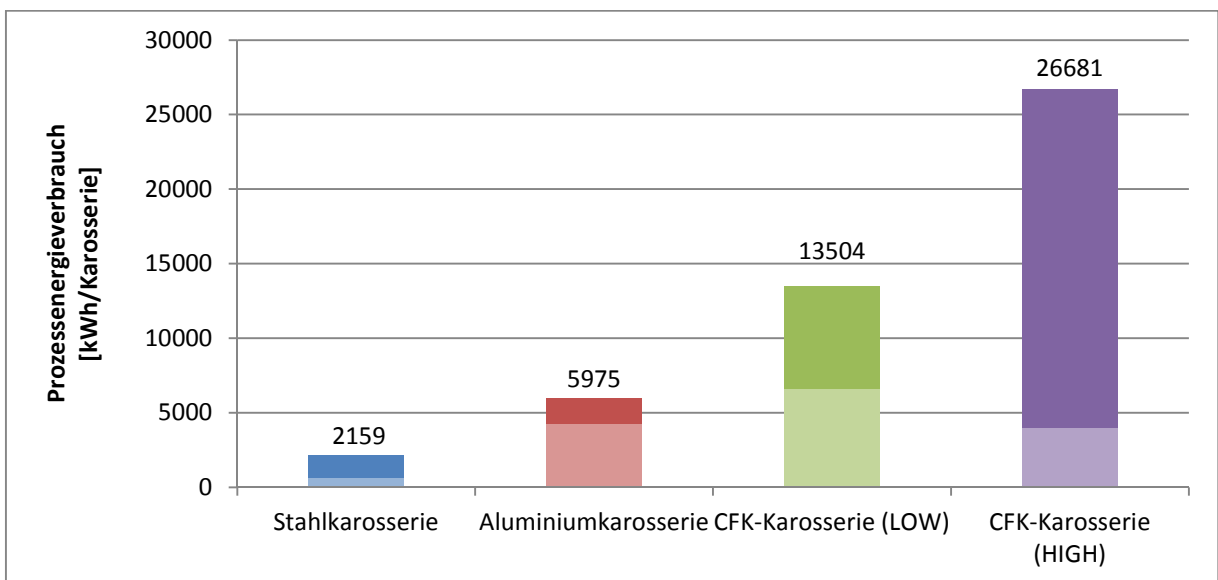


Abbildung 36: Verbrauch an gesamter Prozessenergie (dunkler Balken) sowie anteiligerelektrische Energie (heller Balken) in der Herstellung der einzelnen Karosserievarianten²⁸⁰

²⁸⁰ Eigene Darstellung

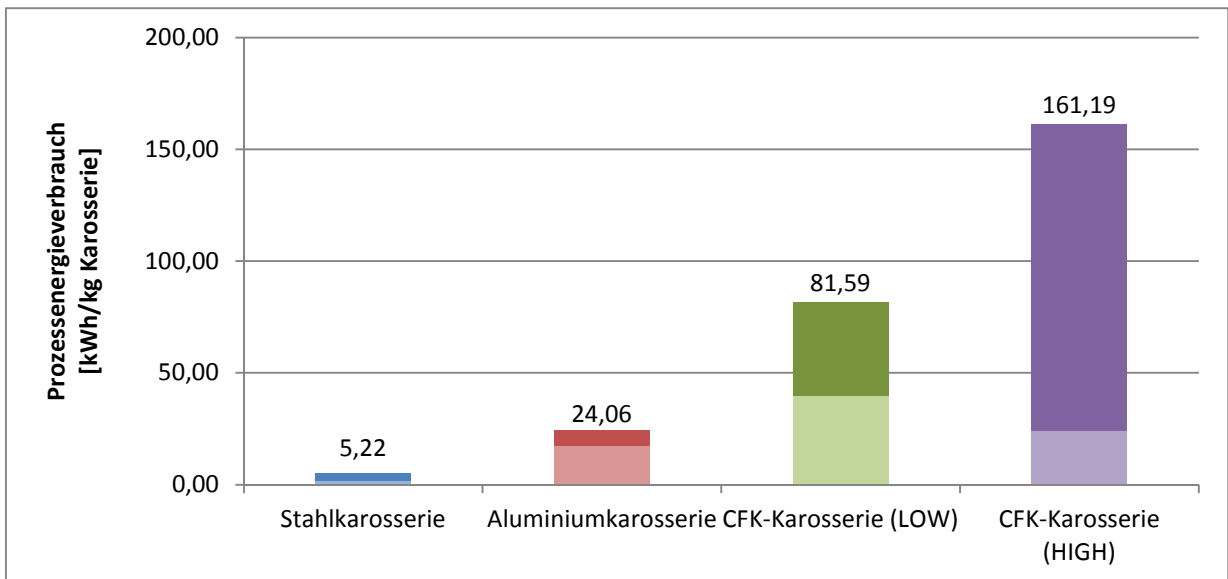


Abbildung 37: Verbrauch an gesamter Prozessenergie (dunkler Balken) sowie anteiliger elektrische Energie (heller Balken) in der Herstellung der einzelnen Karosserievarianten bezogen auf ein kg Karosserie²⁸¹

Stahlkarosserie

Der Einfluss des Produktionslands auf den CO₂-Ausstoß der Stahlkarosserieherstellung fällt wesentlich geringer aus als bei den Konzepten aus Aluminium und CFK. Die Karosserievarianten aus Stahl emittieren im norwegischen Strom-Mix um 23,7% weniger als bei einer Herstellung in der EU. Für die Stahlkarosserieherstellung in China steigt hingegen der CO₂-Ausstoß um 15,9%. Die geringen Differenzen des CO₂-Ausstoßes sind hauptsächlich auf die niedrigen Anteile an elektrischer Energie in der Herstellung zurückzuführen.

Aluminiumkarosserie

Im Vergleich mit einer in der EU hergestellten Aluminiumkarosserie, ist der CO₂-Ausstoß bei einer Herstellung in Norwegen um 62,8% geringer. Im chinesischen Strom-Mix, welcher den höchsten CO₂-Faktor der untersuchten Länder aufweist (siehe Tabelle 11, Seite 57), steigt der CO₂-Ausstoß für die Produktion einer Aluminiumkarosserie um 35,1%. Diese Unterschiede sind auf die CO₂-Faktoren aber auch auf den hohen Anteil der elektrischen Energie in der Aluminiumherstellung zurückzuführen.

CFK-Karosserie (LOW) bzw. (HIGH)

Die Karosserievarianten aus CFK (LOW) emittieren im norwegischen Strom-Mix um 44,2% weniger als bei einer Herstellung in der EU.

²⁸¹ Eigene Darstellung

Obwohl die CFK-Karosserie (HIGH) in der Herstellung die meiste Prozessenergie benötigt, und der absolute CO₂-Ausstoß der CFK-Karosserieherstellung (HIGH) in der EU fast doppelt so hoch ist wie jener der Variante (LOW) liegt die Einsparung beim CO₂-Ausstoß im norwegischen Strom-Mix nur bei 19,4%. Dies ist auf den geringen Anteil der elektrischen Energie an der Prozessenergie von 14,85% zurückzuführen.

Für die CFK- (LOW) und CFK-Karosserie (HIGH) steigt der CO₂-Ausstoß bei einer Herstellung in China um 26,9% bzw. 13,3%. Die Differenzen im Anstieg des CO₂-Ausstoßes sind wieder auf die CO₂-Faktoren und auf die Anteile der elektrischen Energie an den Prozessenergien zurückzuführen.

Die Diagramme in Abbildung 38 und Abbildung 39 veranschaulichen den Einfluss des CO₂-Faktors der elektrischen Energie je Produktionsland auf den CO₂-Ausstoß.

Weitere Betrachtungen

In Abbildung 38 ist zu erkennen, dass der absolute CO₂-Ausstoß der Aluminiumkarosserieherstellung und der CFK-Karosserieherstellung (LOW) in China annähernd gleich hoch sind. In Norwegen liegt der CO₂-Ausstoß der Aluminiumkarosserieherstellung jedoch nur knapp über dem Niveau der Stahlkarosserieherstellung. Dies veranschaulicht den großen Einfluss des Anteiles elektrischer Energie an der Prozessenergie.

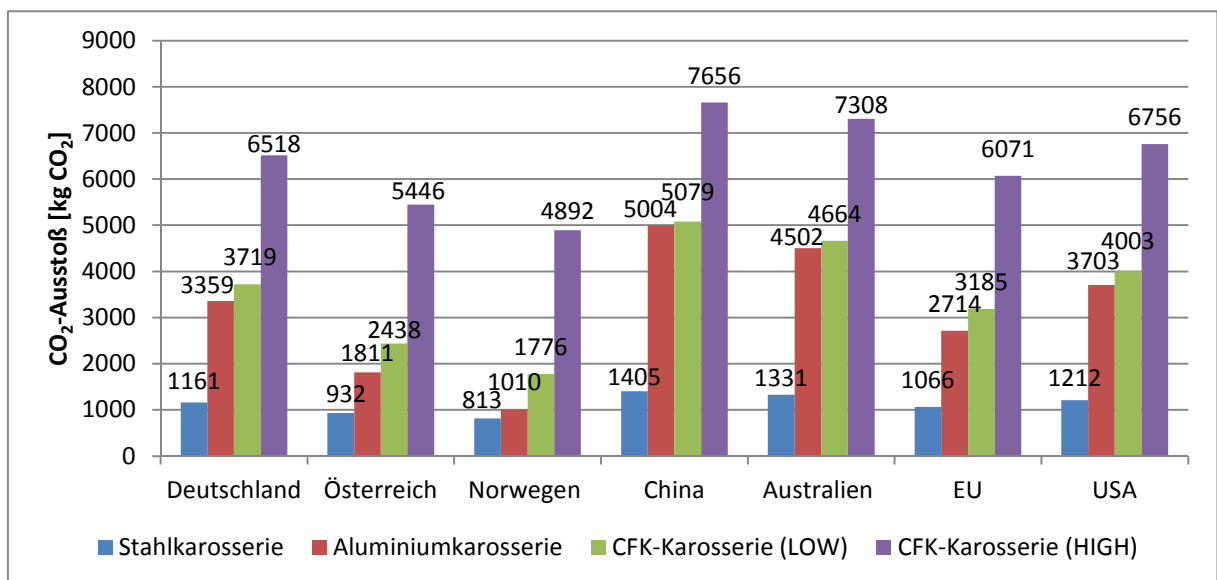


Abbildung 38: CO₂-Ausstoß in Kilogramm CO₂ für jedes Karosseriekonzept und Produktionsland²⁸²

²⁸² Eigene Darstellung

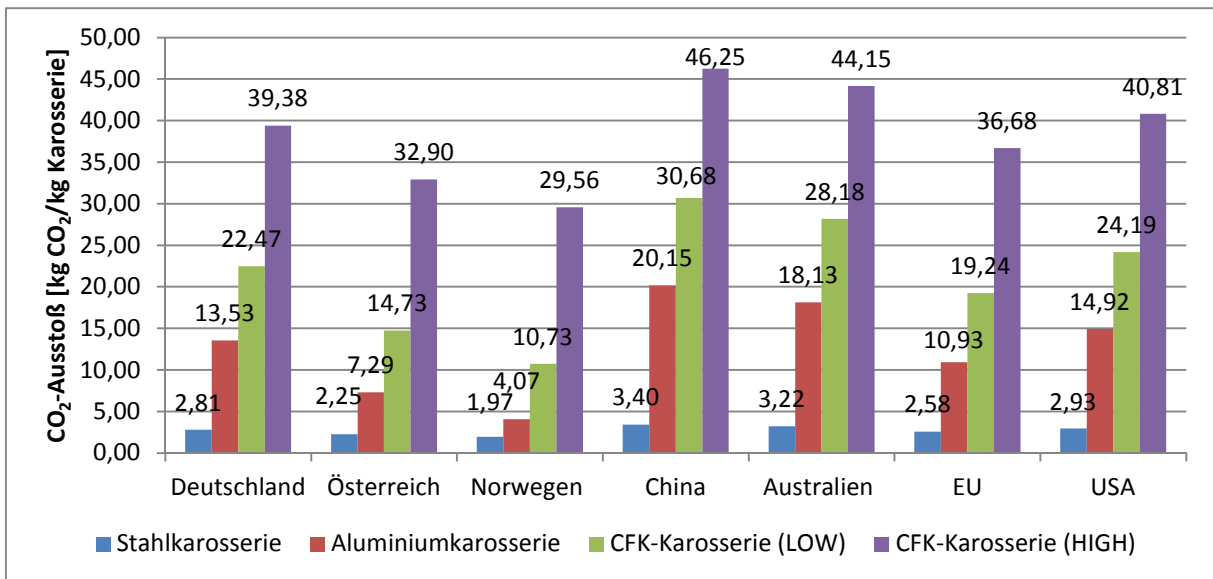


Abbildung 39: CO₂-Ausstoß in Kilogramm CO₂ je Kilogramm Karosserie für jedes Karosseriekonzept und Produktionsland²⁸³

Die Diagramme in Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen den Primärenergieverbrauch je Karosseriekonzept und Produktionsland.

Trendvergleich mit dem CO₂-Ausstoß

Vergleicht man den Primärenergieverbrauch in Abbildung 40 mit dem CO₂-Ausstoß in Abbildung 38, so ist zu erkennen, dass der Verlauf der Werte für die Stahlkarosserie in beiden Diagrammen sehr ähnlich ist, jener für Aluminium jedoch stark differiert. Daraus folgt, dass mit der Erhöhung des Prozentsatzes der elektrischen Energie, der Unterschied in den Verläufen von CO₂-Ausstoß und Primärenergieverbrauch zwischen den einzelnen Karosseriekonzepten steigt.

Vergleich China-EU

Der Primärenergieverbrauch für jeweils alle Karosserievarianten in China und der EU befinden sich auf demselben Niveau, jedoch steigt der CO₂-Ausstoß in China bei CFK (LOW) um 13,3% und bei Aluminium um bis zu bis 35,1% an. Daraus folgt, dass zwar die Energieeffizienz zur Herstellung der elektrischen Energie (KEA, siehe Tabelle 11) annähernd gleich ist, jedoch die jeweils verbrauchten Primärenergieträger unterschiedlichen CO₂-Ausstoß verursachen.

²⁸³ Eigene Darstellung

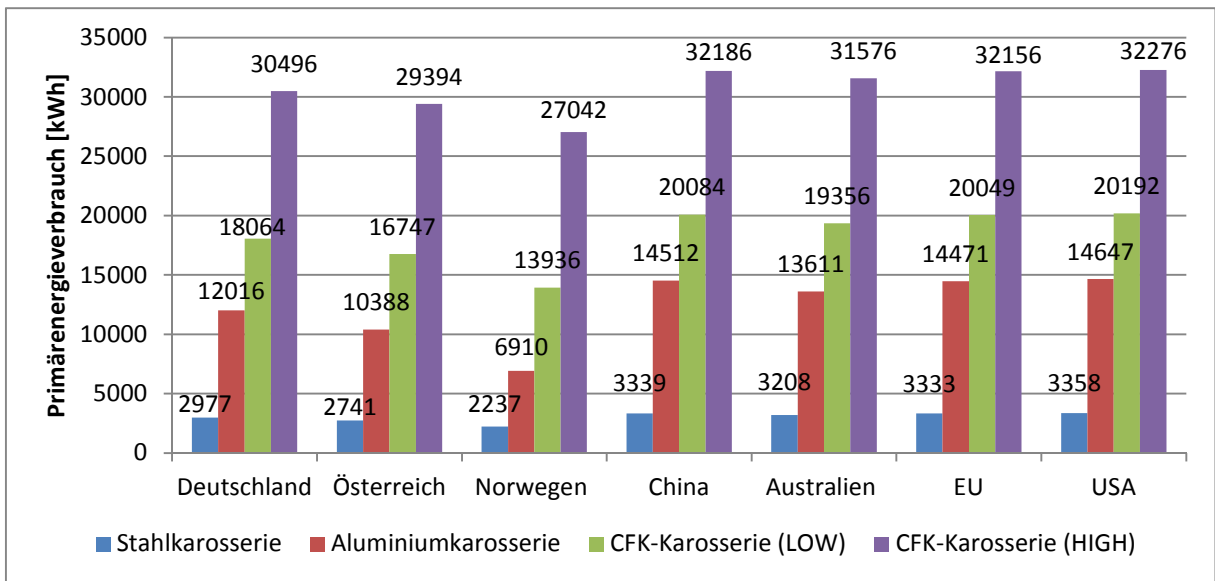


Abbildung 40: Primärenergieverbrauch für jedes Karosseriekonzept und Produktionsland²⁸⁴

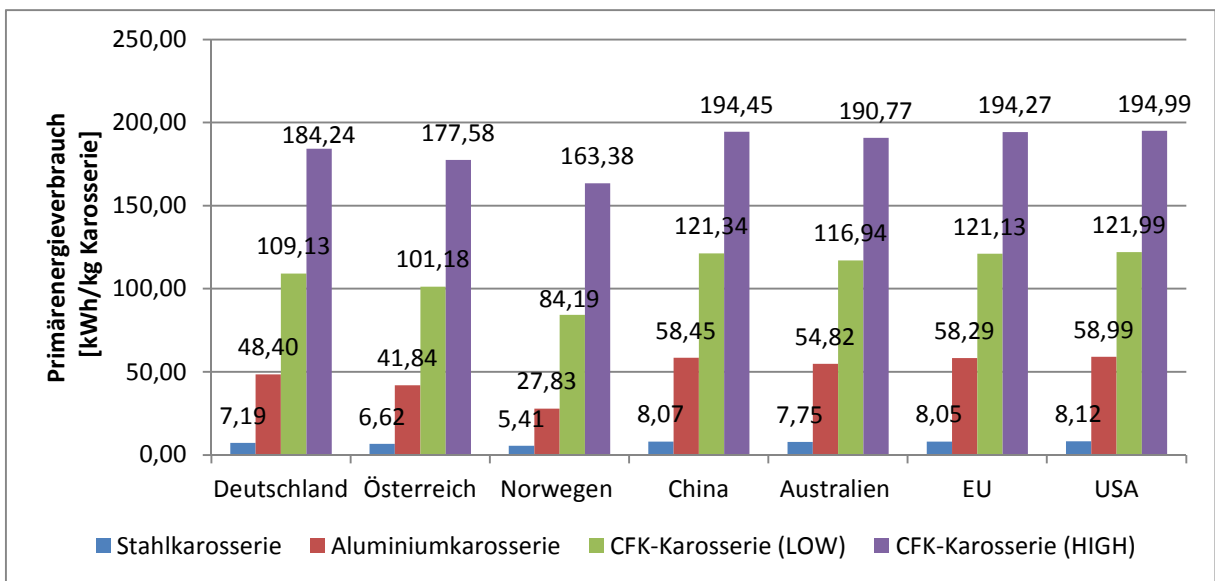


Abbildung 41: Primärenergieverbrauch je Kilogramm Karosserie für jedes Karosseriekonzept und Produktionsland²⁸⁵

5.1.2 Nutzungsdauer

In den folgenden Diagrammen (Abbildung 42 und Abbildung 43) werden der Energieverbrauch und der CO₂-Ausstoß für alle möglichen Kombinationen von Antriebskonzepten und Karosserievarianten im NEDC und im gesamten

²⁸⁴ Eigene Darstellung

²⁸⁵ ibidem

ARTEMIS-Fahrzyklus dargestellt. Für die Kombinationen mit Elektromotor wurde zur Berechnung des CO₂-Ausstoßes der verbrauchten Energie, der CO₂-Faktor für elektrische Energie der EU verwendet. Weitere Diagramme des CO₂-Ausstoßes von Fahrzeugen mit Elektromotor unter Berücksichtigung anderer CO₂-Faktoren sind Anhang H zu entnehmen.

Sowohl Energieverbrauch als auch CO₂-Ausstoß sind im ARTEMIS-Zyklus wesentlich höher als im NEDC. Sie differieren um 19-29 g/km bzw. 6-9 kWh/100 km. Die Differenz ist auf die Charakteristik der beiden Zyklen zurückzuführen. Die Schwankung der Differenz erklärt sich aus den unterschiedlichen Wirkungsgraden der Antriebskonzepte in den einzelnen Teilzyklen. Da der ARTEMIS-Zyklus auf realen Messdaten beruht, werden für die weiteren Auswertungen nur mehr dieser Fahrzyklus und die Teilzyklen ARTEMIS-Urban und ARTEMIS-Motorway betrachtet.

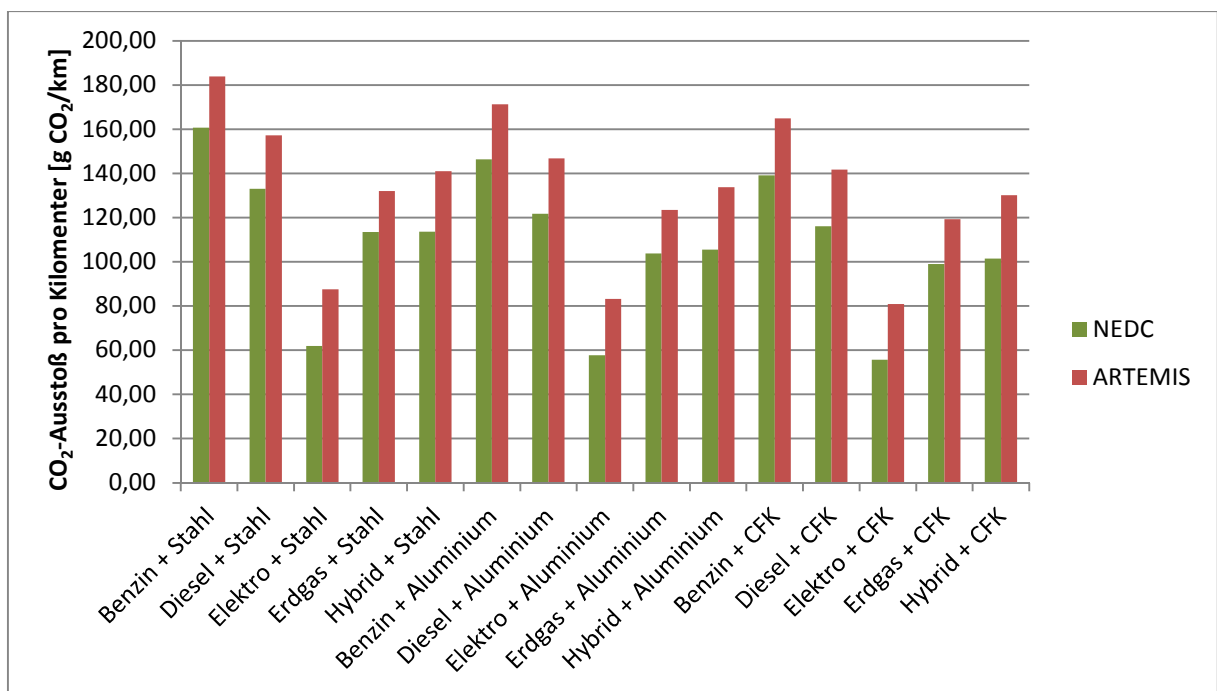


Abbildung 42: CO₂-Ausstoß in den Fahrzyklen NEDC und ARTEMIS in [g CO₂/km]²⁸⁶

²⁸⁶ Eigene Darstellung

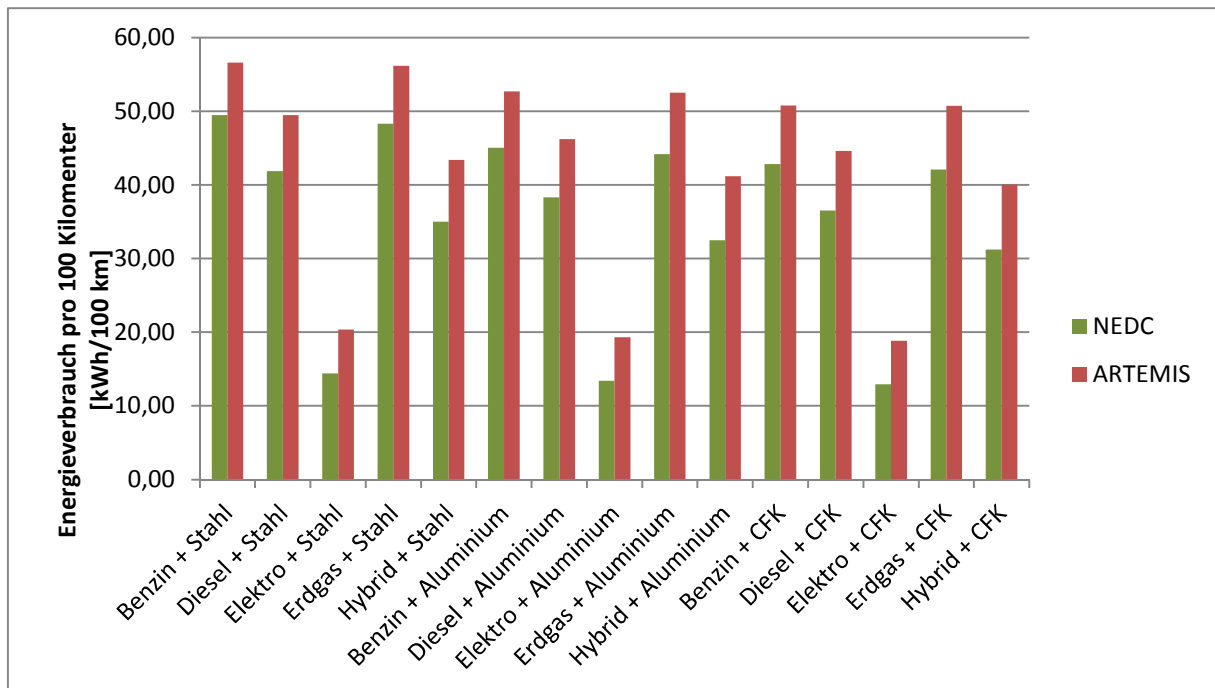


Abbildung 43: Energieverbrauch in den Fahrzyklen NEDC und ARTEMIS in $[\text{kWh}/_{100 \text{ km}}]^{287}$

5.2 Lebenszyklusanalyse bei unterschiedlichem Nutzungsverhalten

In diesem Kapitel wird auf unterschiedliche Antriebsstrang-Karosserie-Kombinationen und ihr CO_2 -Einsparungspotential in Hinblick auf unterschiedliches Nutzungsverhalten eingegangen (Urban, Autobahn, gemischt). Das Nutzungsverhalten wird durch unterschiedliche Zyklen repräsentiert (gesamter ARTEMIS, ARTEMIS-Urban und ARTEMIS-Motorway).

Der Darstellung in den folgenden Diagrammen liegt eine Referenzvariante zugrunde. Diese Variante wird durch die Abzisse des Diagramms repräsentiert. Auf die Referenz beziehen sich alle im Diagramm untersuchten Varianten. Der Wert zu Beginn der Nutzungsdauer ist dabei die Differenz des CO_2 -Ausstoßes in der Karosserieherstellung zwischen untersuchter Variante und Referenzvariante (Berechnungsschema siehe Abbildung 44). Der Endwert errechnet sich aus der Differenz des CO_2 -Ausstoßes am Ende des gesamten Lebenszyklus zwischen den beiden Varianten (Berechnungsschema siehe Abbildung 45).

²⁸⁷ Eigene Darstellung

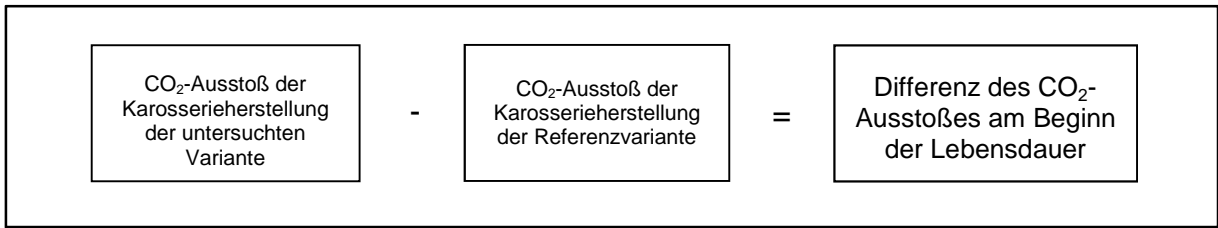


Abbildung 44: Berechnungsschema der Differenz des CO₂-Ausstoßes am Beginn der Nutzungsdauer²⁸⁸

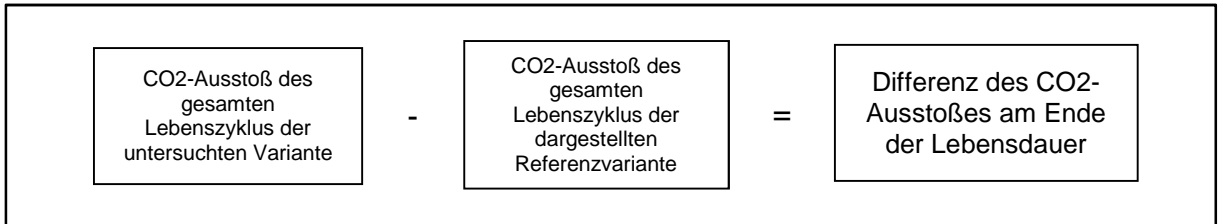


Abbildung 45: Berechnungsschema der Differenz des CO₂-Ausstoßes am Ende der Nutzungsdauer²⁸⁹

Zur besseren Übersicht in den Diagrammen werden folgende Linientypen den Karosseriekonzepten zugeordnet.

Stahlkarosserie , Aluminiumkarosserie ,
CFK-Karosserie (LOW) , CFK-Karosserie (HIGH)

Bei den nun folgenden Darstellungen werden nur Karosserien betrachtet, die in der EU hergestellt wurden. Weiters werden zur besseren Übersicht nur die Aluminiumkarosserien und die CFK-Karosserie (LOW) mit der Stahlkarosserie verglichen. Die CFK-Karosserie (HIGH) wird in einer späteren Betrachtung wieder mit einbezogen.

Szenario: Nutzungsverhalten (1)

Für die Vergleiche in Abbildung 46 bis Abbildung 48 wird als Referenz ein Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie verwendet.

Im gesamten ARTEMIS-Zyklus amortisiert sich der erhöhte CO₂-Ausstoß in der Herstellung der Aluminiumkarosserie nach 130.000km, jener der CFK-Karosserie bereits nach 115.000 km.

²⁸⁸ Eigene Darstellung
²⁸⁹ ibidem

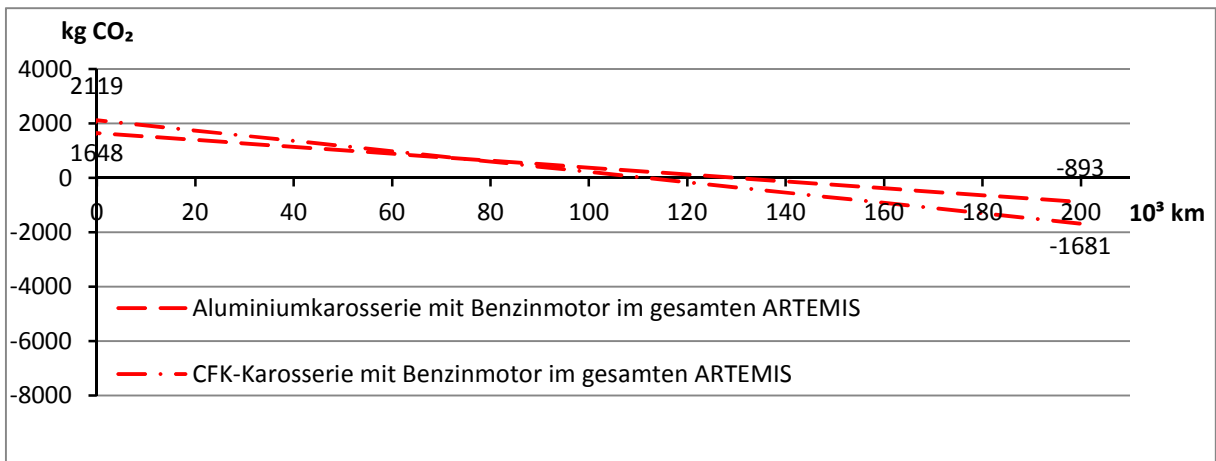


Abbildung 46: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus²⁹⁰

Im ARTEMIS-Urban-Zyklus wird bereits eine Amortisation durch die Aluminiumkarosserie nach 50.000 km, und durch die CFK-Karosserie nach fast 40.000 km erreicht. Die frühere Amortisation gegenüber dem gesamten ARTEMIS-Zyklus ist auf den Geschwindigkeitsverlauf des Zyklus zurückzuführen (siehe Abbildung 34, Seite 79).

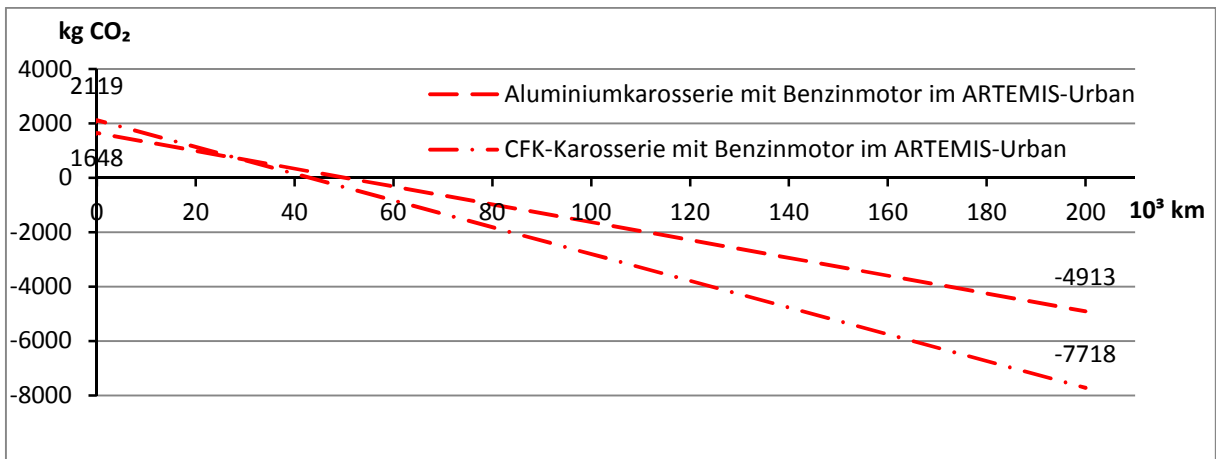


Abbildung 47: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Urban-Zyklus²⁹¹

Im ARTEMIS-Motorway-Zyklus amortisiert sich die Aluminiumkarosserie erst nach 170.000 km und die CFK-Karosserie nach 140.000 km. Dies ist wie in der vorherigen

²⁹⁰ Eigene Darstellung

²⁹¹ ibidem

Variante auf den Geschwindigkeitsverlauf des ARTEMIS-Motorway zurückzuführen (siehe Abbildung 34, Seite 79).

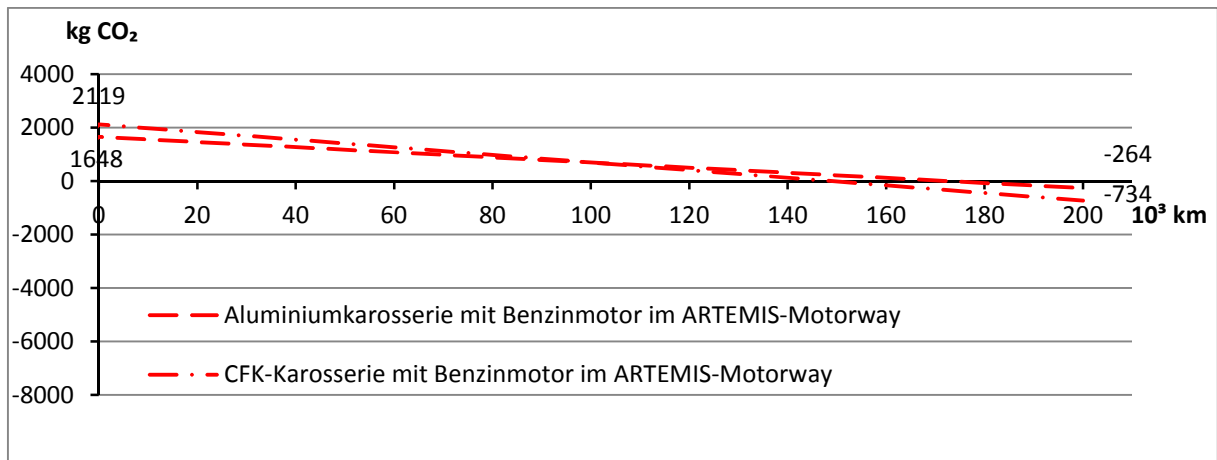


Abbildung 48: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Motorway-Zyklus²⁹²

Szenario: Nutzungsverhalten (2)

Für die Vergleiche in Abbildung 49 bis Abbildung 51 wird als Referenz ein Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie verwendet. Diese wird mit Leichtbauvarianten verglichen, die ebenso mit einem Elektromotor betrieben werden. Die elektrische Energie, welche für das Laden der Fahrzeuge nötig ist, wird aus dem EU-Stromnetz bezogen. Es wird daher zur Berechnung des CO₂-Ausstoßes der CO₂-Faktor des oben erwähnten Stromnetzes verwendet.

In allen drei Zyklen findet keine Amortisation des zusätzlichen CO₂-Ausstoßes der Leichtbauvarianten innerhalb des gewählten Nutzungsdauerbereichs statt. Dies ist auf den geringen CO₂-Ausstoß des elektrischen Antriebes zurückzuführen. Da die elektrische Energie aus dem EU-Stromnetz bezogen wird, führt dies zu einem weit aus geringerem CO₂-Ausstoß pro Kilometer. Dadurch ist die absolute Einsparung an Masse CO₂ auf Grund der Fahrzeugmassenreduktion geringer als bei der Variante mit Benzinmotor.

²⁹² Eigene Darstellung

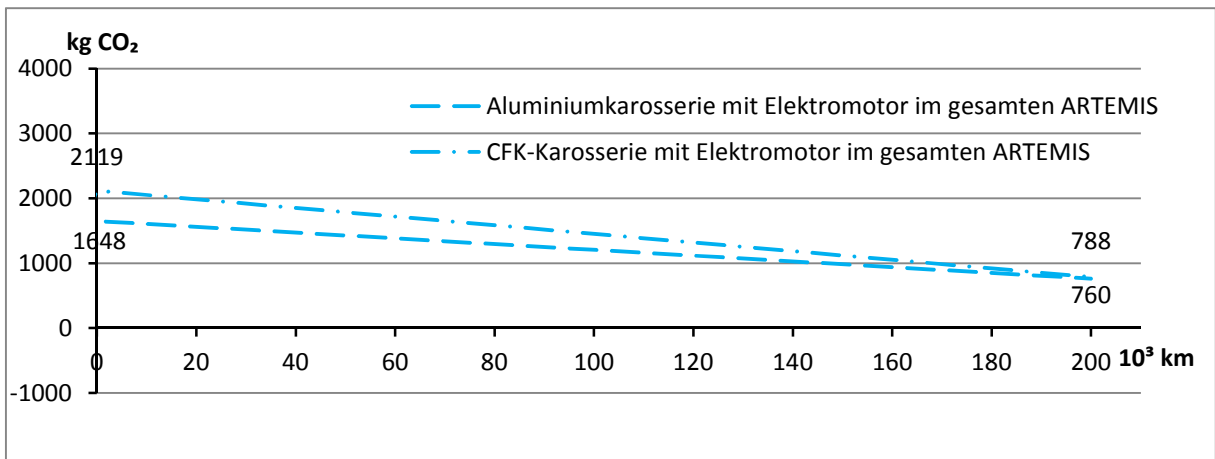


Abbildung 49: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus²⁹³

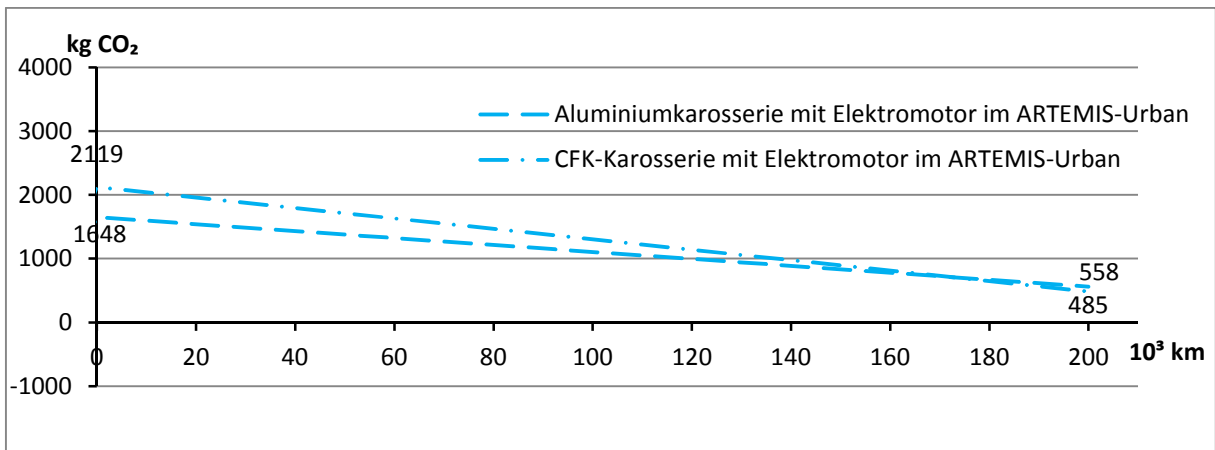


Abbildung 50: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Urban-Zyklus²⁹⁴

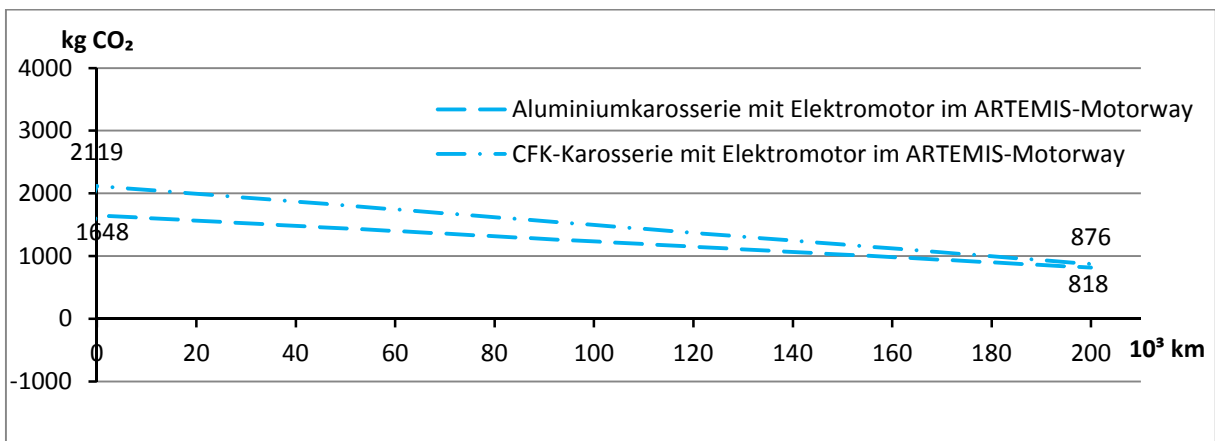


Abbildung 51: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Motorway-Zyklus²⁹⁵

²⁹³ Eigene Darstellung

²⁹⁴ ibidem

Szenario: Nutzungsverhalten (3)

Für die Vergleiche in Abbildung 52 bis Abbildung 54 wird als Referenz ein Fahrzeug mit Erdgasmotor und Stahlkarosserie verwendet.

Im gesamten ARTEMIS-Zyklus amortisierten sich die Leichtbauvarianten erst gegen Ende der Nutzungsdauer. Die CFK-Karosserie erreicht die Amortisation nach 160.000 km, die Aluminiumkarosserie erst knapp vor dem Ende der Nutzungsdauer bei 190.000 km. Im ARTEMIS-Urban-Zyklus wird eine Amortisation der Aluminium- und der CFK-Karosserie nach 60.000 km bzw. 70.000 km erreicht. Im ARTEMIS-Motorway-Zyklus tritt jedoch keine Amortisation innerhalb der betrachteten Nutzungsdauer auf. Dies lässt sich wieder auf den geringen Einfluss auf den Verbrauch durch die Fahrzeugmasse in diesem Zyklus zurückzuführen bzw. auf den verringerten CO₂-Ausstoß des Erdgasmotors.

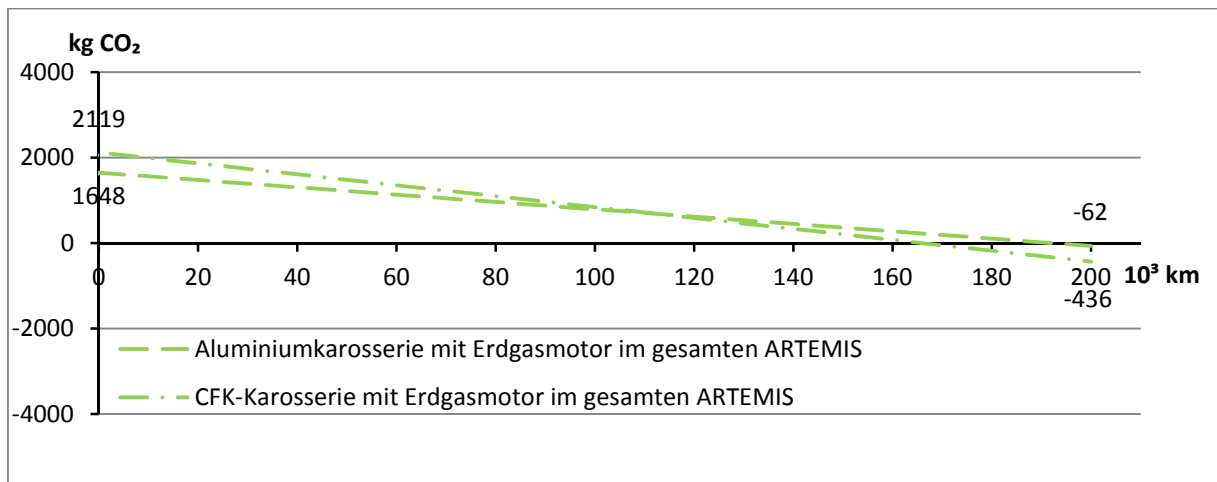


Abbildung 52: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Erdgasmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus²⁹⁶

²⁹⁵ Eigene Darstellung

²⁹⁶ ibidem

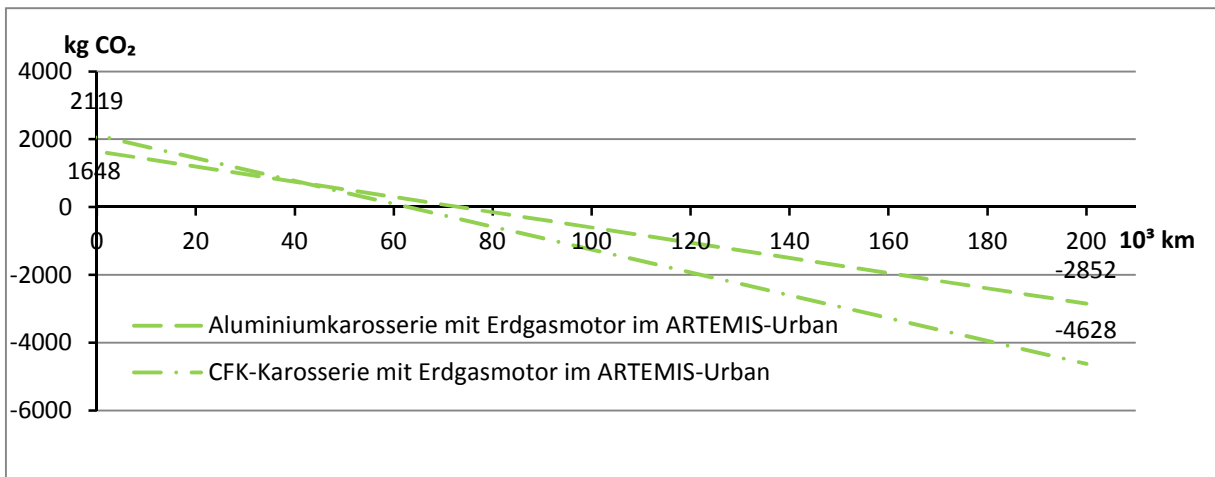


Abbildung 53: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Erdgasmotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Urban-Zyklus²⁹⁷

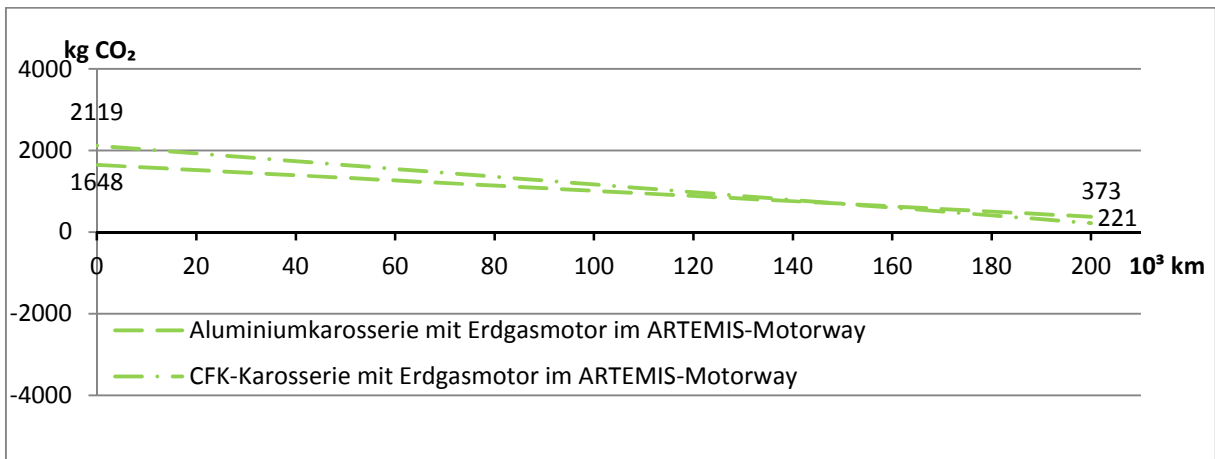


Abbildung 54: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Erdgasmotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Motorway-Zyklus²⁹⁸

Die in den Abbildungen 47,50 und 53 dargestellten Vergleichsvarianten werden in Abbildung 55 mit derselben Referenzvariante verglichen.

Für die Vergleiche wird als Referenz ein Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie verwendet.

Es ist zu erkennen, dass das CO₂-Einsparungspotenzial der Varianten mit Stahlkarosserie und Elektro- bzw. Erdgasmotor um das 10-20fache höher ist, als jenes der Varianten mit Benzinmotor und Aluminium- bzw. CFK-Karosserie. In dieser Arbeit stehen die Antriebsstränge zwar nicht im Focus, die Abbildung 55 zeigt jedoch, dass das CO₂-Einsparungspotenzial durch alternative Antriebe weit höher ist als jenes von Leichtmaßnahmen durch Aluminium und CFK.

²⁹⁷ Eigene Darstellung

²⁹⁸ ibidem

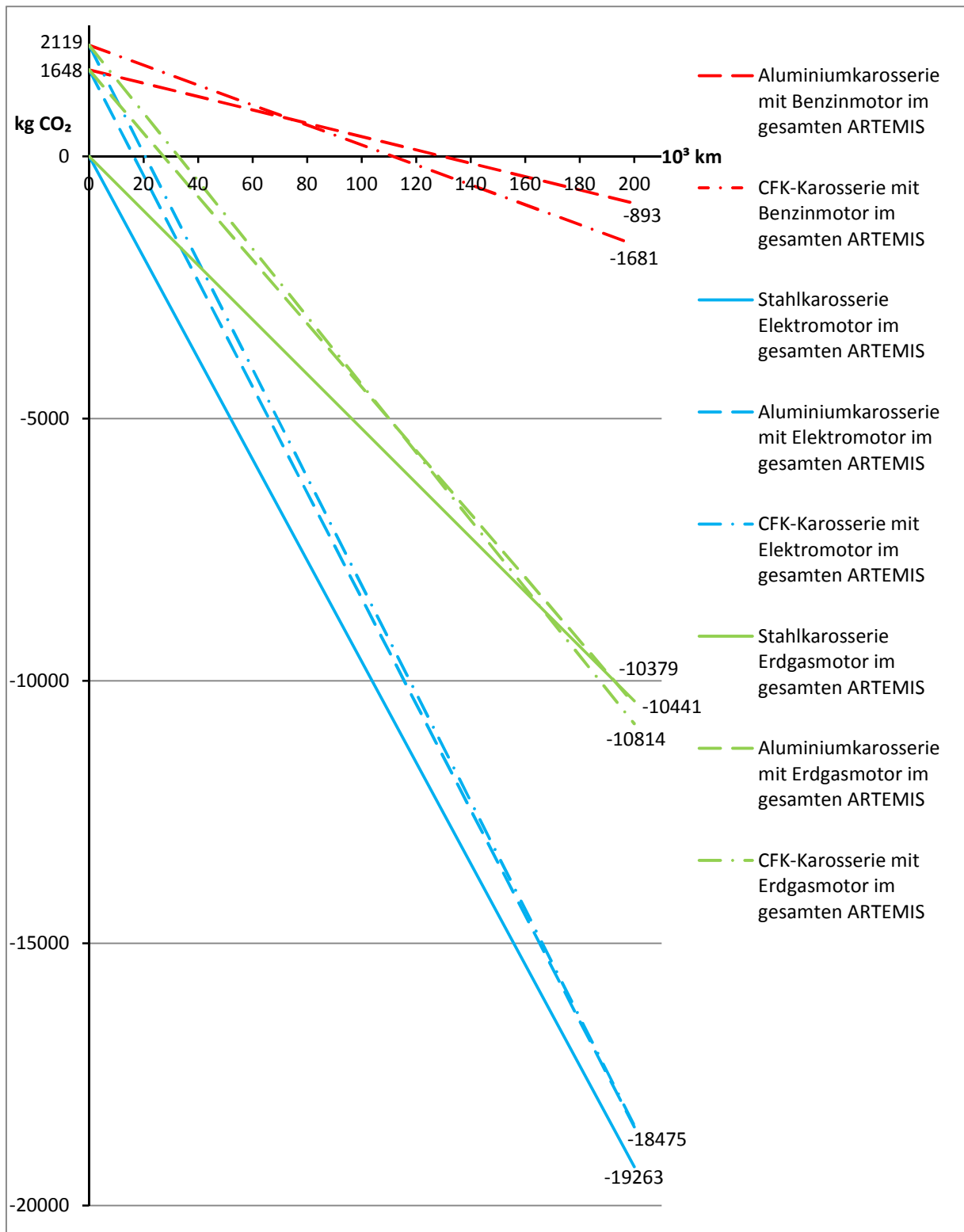


Abbildung 55: Differenz des CO₂-Ausstoßes verschiedener Antriebsstrang-Karosserie-Kombinationen über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus²⁹⁹

²⁹⁹ Eigene Darstellung

5.3 Lebenszyklusanalyse verschiedener Antriebskonzepte

In den folgenden Diagrammen dient wieder ein Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie als Referenz. Fahrzeuge mit Aluminiumkarosserie und CFK-Karosserie werden mit dieser Referenz verglichen. Die in der Produktion aller Karosserien verwendete elektrische Energie, wird aus dem EU-Stromnetz bezogen. Es wird untersucht, welchen Einfluss das Antriebskonzept in Verbindung mit den Leichtbauvarianten auf den CO₂-Ausstoß hat.

Der CO₂-Ausstoß über die Nutzungsdauer wird für die Referenz und alle Varianten im gesamten ARTEMIS-Zyklus berechnet.

Es werden dabei folgende Antriebskonzepte, jeweils mit Aluminium- und CFK-Karosserie, mit dem Referenzfahrzeug verglichen:

- Benzinmotor
- Dieselmotor
- Erdgasmotor
- Hybridantrieb
- Elektromotor

Da der CO₂-Ausstoß eines Elektrofahrzeuges vom Strom-Mix abhängt, mit dem das Fahrzeug geladen wird, werden die CO₂-Faktoren folgender Länder verwendet (CO₂-Faktoren aus Tabelle 11, Seite 57).

- Österreich
- Norwegen
- China
- EU
- USA

Für ein Elektrofahrzeug mit Aluminiumkarosserie, welches in China betrieben wird tritt keine Amortisation ein (siehe Abbildung 56). Verglichen mit der Referenz ist der CO₂-Ausstoß am Ende der Nutzungsdauer sogar größer als zu Beginn. Dies ist auf den sehr hohen CO₂-Ausstoß des chinesischen Strom-Mixes zurückzuführen.

Bei allen weiteren Antriebskonzepten amortisiert sich der erhöhte CO₂-Ausstoß am Beginn der Nutzungsdauer. Bei der Variante mit Benzinmotor ist das allerdings erst bei 130.000 km der Fall. Alle anderen Antriebskonzepte amortisieren sich bereits zwischen 10.000 und 50.000 km und sparen das 3,5-20fache des CO₂-Ausstoßes ein, welches die Aluminiumkarosserie in der Herstellung mehr emittiert.

Bei einem Elektrofahrzeug mit CFK-Karosserie, welches elektrische Energie aus dem chinesischen Stromnetz bezieht, wird der Mehrausstoß an CO₂ der CFK-Karosserieherstellung nur teilweise wieder über die Nutzungsdauer kompensiert. Die Variante mit Benzinmotor und CFK-Karosserie amortisiert sich nach 110.000 km, alle anderen Varianten amortisieren sich zwischen 10.000 und 50.000 km und sparen das 3-15fache des CO₂-Ausstoßes ein, welchen die CFK-Karosserie in der Herstellung mehr emittiert.

Herauszuheben ist, dass ein Fahrzeug mit Benzinmotor und CFK-Karosserie gegenüber der Referenzvariante doppelt so viel Masse an CO₂ einspart, als ein Fahrzeug mit Benzinmotor und Aluminiumkarosserie. Jedoch spart bei Fahrzeugen mit Elektromotor, die Energie aus dem norwegischen Stromnetz beziehen, die Variante mit Aluminiumkarosserie am Ende der Nutzungsdauer mehr CO₂ ein als jene mit CFK-Karosserie. Diese Tatsache ergibt sich daraus, dass Fahrzeuge mit CFK-Karosserie zwar ein höheres Einsparungspotenzial über die Nutzungsdauer aufweisen, die Aluminiumkarosserie allerdings weniger CO₂-Emission bei der Herstellung produziert.

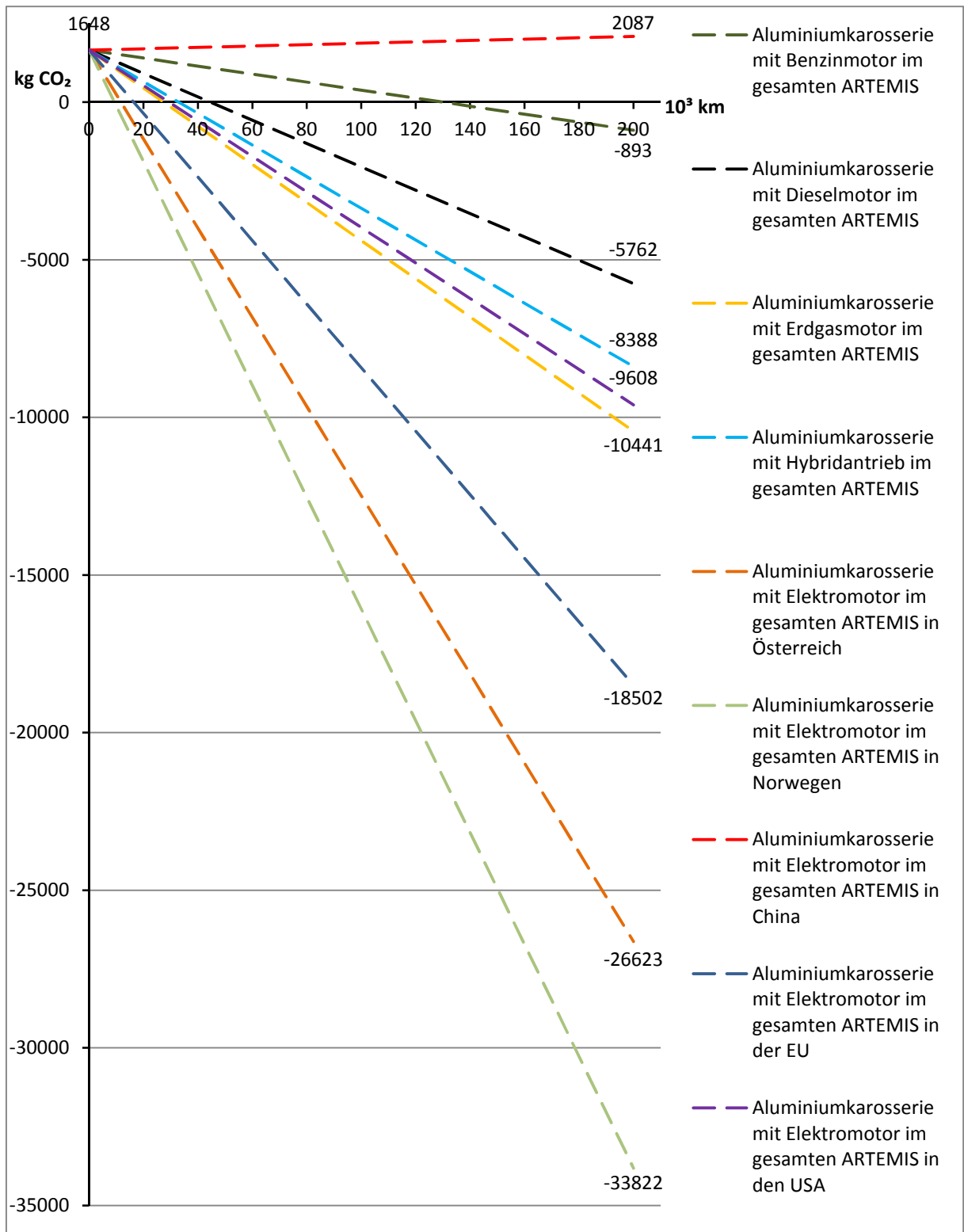


Abbildung 56: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer verschiedener Antriebskonzepte mit Aluminiumkarosserie. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus³⁰⁰

³⁰⁰ Eigene Darstellung

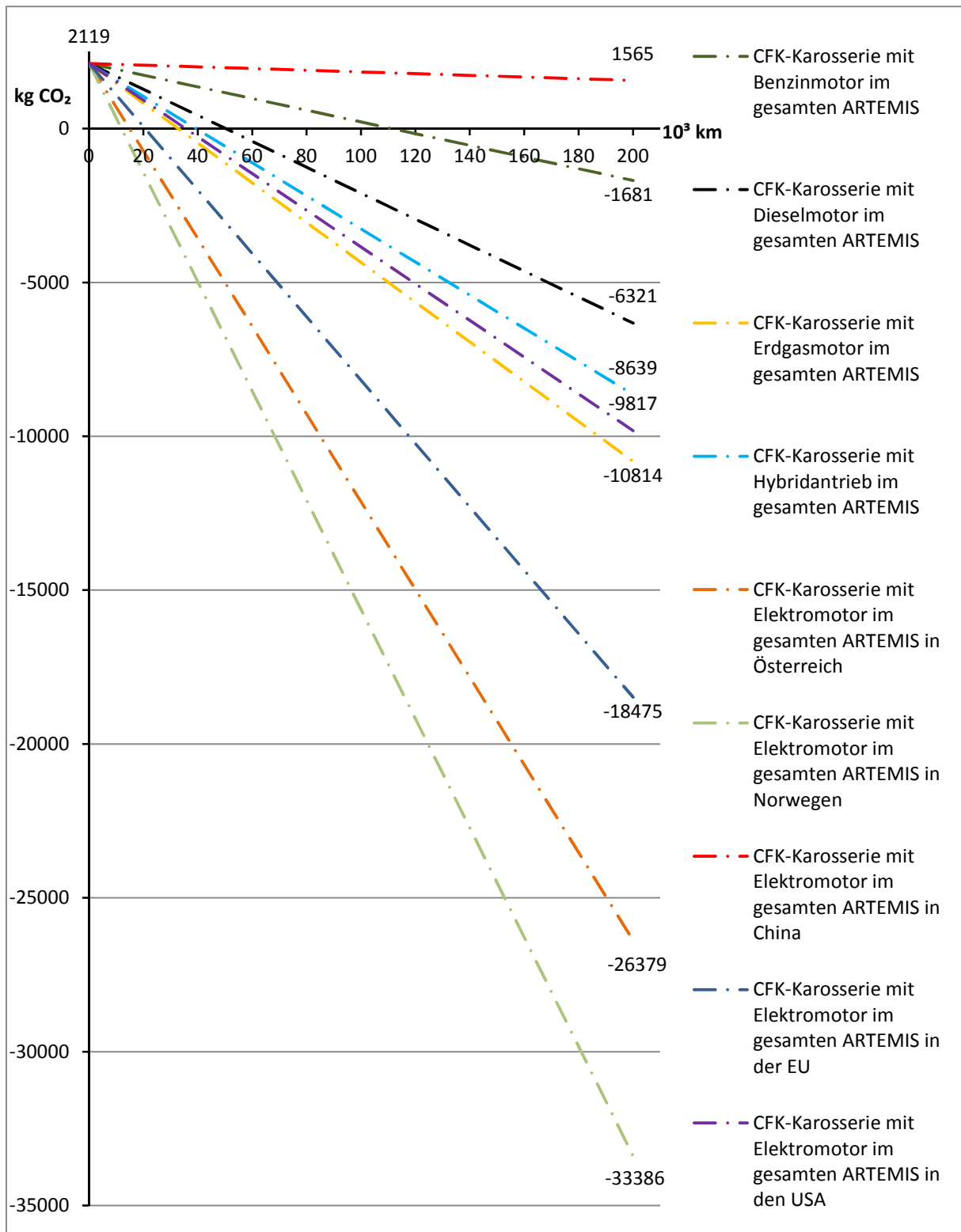


Abbildung 57: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer verschiedener Antriebskonzepte mit CFK-Karosserie. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus³⁰¹

³⁰¹ Eigene Darstellung

5.4 Lebenszyklusanalyse verschiedener Produktionsstandorte

In den folgenden 2 Kapiteln wird der Einfluss des Produktionsstandortes der Leichtbaukonzepte auf den CO₂-Ausstoß über die gesamte Nutzungsdauer untersucht. Als Referenzen für die Untersuchungen dienen einerseits wieder ein Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie und andererseits ein Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie. Beide Stahlkarosserien werden in der EU hergestellt.

5.4.1 Aluminiumkarosserie

In Abbildung 58 wird als Referenzvariante das Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie verwendet. Verglichen wird diese Referenz mit Fahrzeugen mit Aluminiumkarosserie welche von einem Benzinmotor angetrieben werden, wobei zur Herstellung der Aluminiumkarosserie unterschiedliche länderspezifische Strom-Mixe verwendet werden. Die Nutzungsdauer wird für die Referenzvariante und alle weiteren Varianten im gesamten ARTEMIS-Zyklus betrachtet.

Für den Vergleich der Produktion der Aluminiumkarosserie werden die Strom-Mixe aus Österreich, Norwegen, China, der EU und den USA verwendet (siehe Tabelle 11, Seite 57).

Die Verringerung des CO₂-Ausstoßes aufgrund der Massensreduktion durch die Aluminiumkarosserie reicht bei einer Aluminiumkarosserie die im chinesischen Strom-Mix hergestellt wird, nicht aus, um bis ans Ende der Nutzungsdauer eine Amortisation zu erreichen. Für eine Aluminiumkarosserie die im USA-Strom-Mix hergestellt wird, wird eine Amortisation bis 200.000km gerade nicht erreicht. In Österreich und der EU hergestellte Aluminiumkarosserien amortisieren sich nach 60.000 bzw. 130.000 km. Auf Grund des geringen CO₂-Ausstoßes im norwegischen Strom-Mix weist eine Aluminiumkarosserie, die mit diesem Strom-Mix produziert wird, zu Beginn ihrer Nutzungsdauer bereits einen geringeren CO₂-Ausstoß auf als eine Stahlkarosserie.

In der Betrachtung in Abbildung 59 wird der Benzinmotor durch einen Elektromotor ersetzt. Das Elektrofahrzeug wird mit Strom aus der EU betrieben. Alle anderen Parameter sind mit der Variante aus Abbildung 58 ident.

Aufgrund des geringeren CO₂-Ausstoß des Elektromotors (siehe Abbildung 42, Seite 95) ist das CO₂-Einsparungspotenzial durch Massenreduktion in der Nutzungsdauer wesentlich geringer als bei einem Fahrzeug mit Benzinmotor.

Aluminiumkarosserien die in China, den USA und der EU hergestellt werden amortisieren sich bei dieser Antriebsvariante erst weit nach 200.000 km. Eine in

Österreich hergestellte Karosserie amortisiert sich erst nach 160.000 km. Eine Aluminiumkarosserie die im norwegischen Stromnetz hergestellt wird, hat wieder zu Beginn ihrer Nutzungsdauer einen geringeren CO₂-Ausstoß als eine Stahlkarosserie.

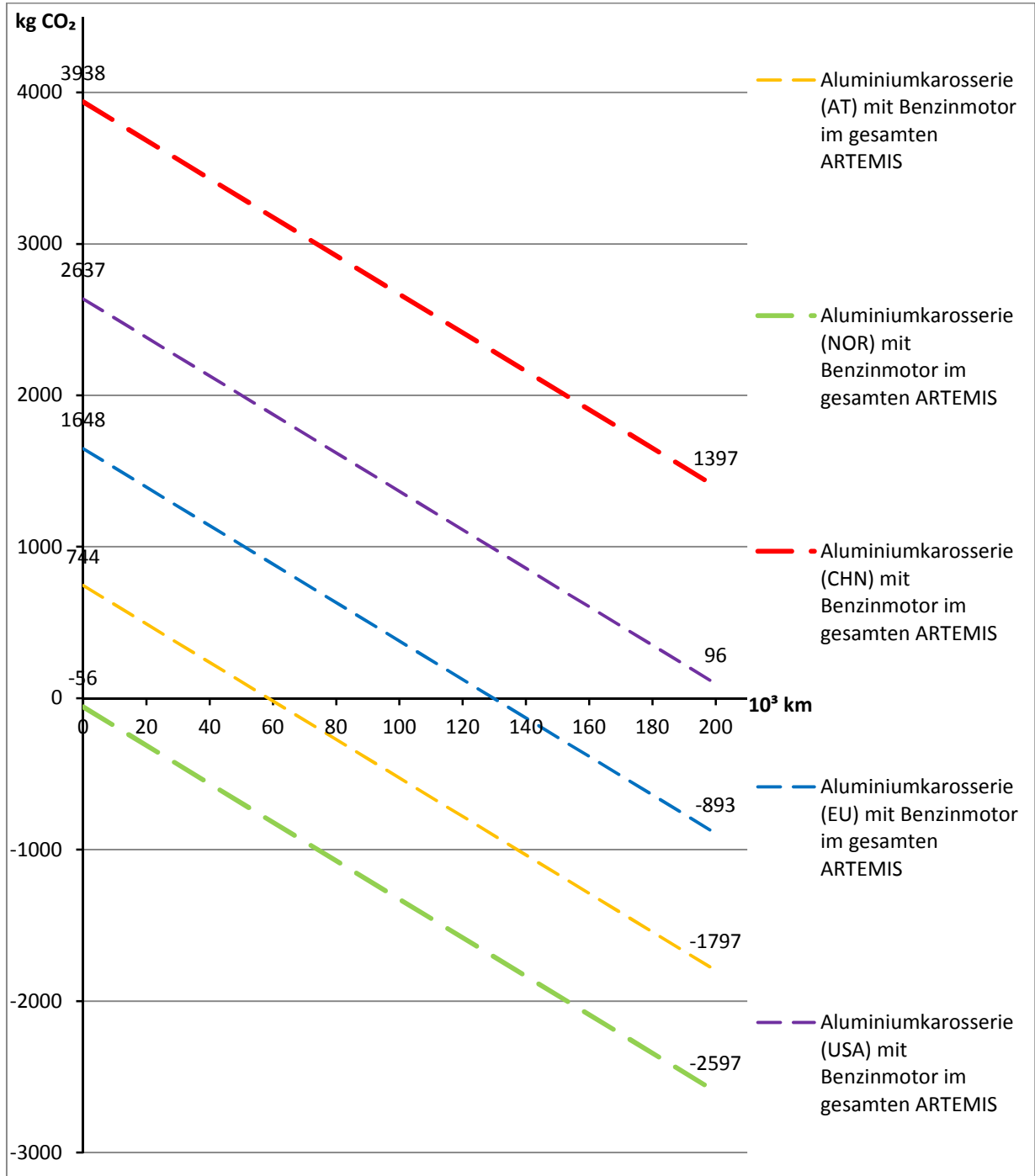


Abbildung 58: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer von Benzinfahrzeugen mit Aluminiumkarosserien, hergestellt mit unterschiedlichen Strom-Mixen: Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus³⁰²

³⁰² Eigene Darstellung

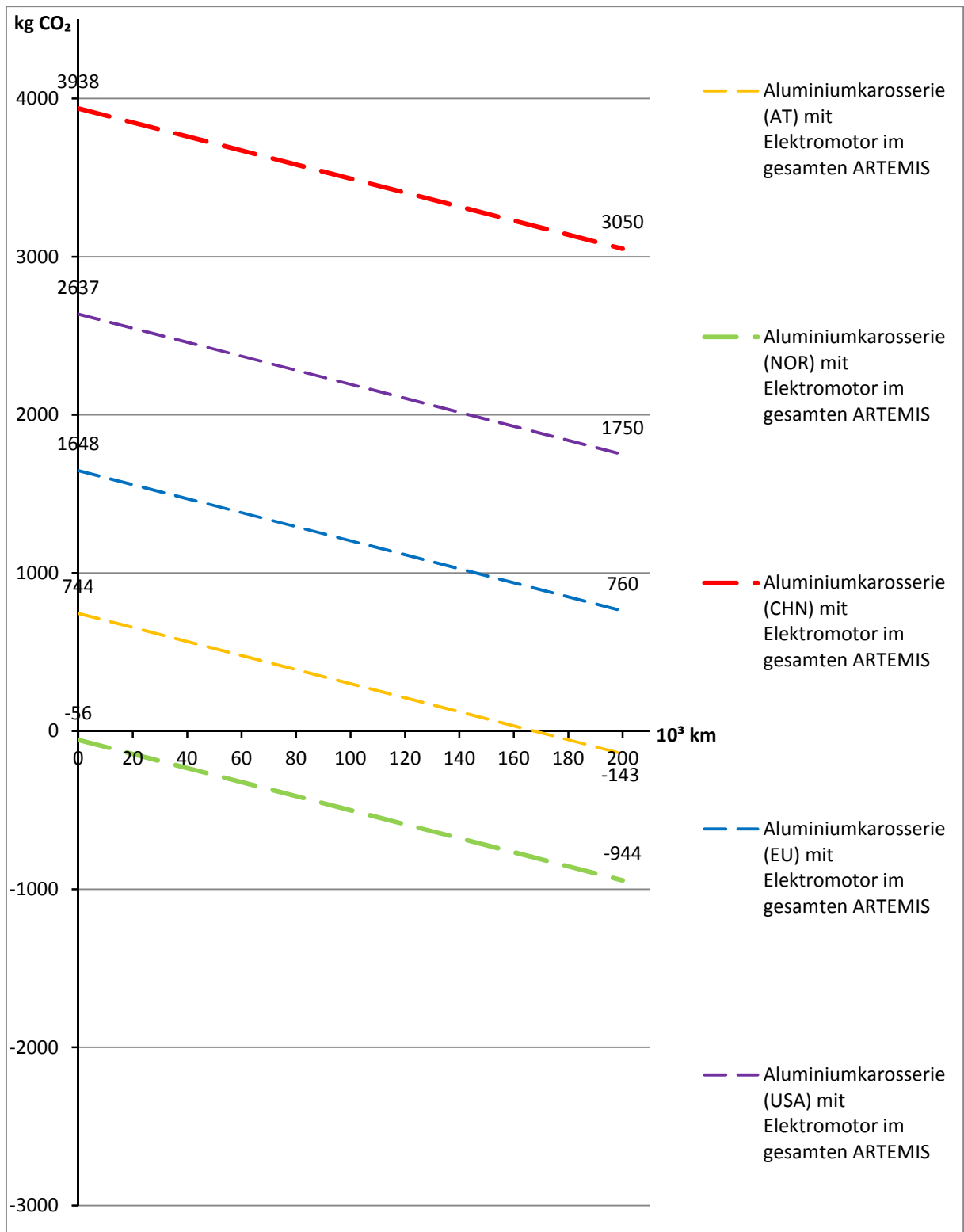


Abbildung 59: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen mit Aluminiumkarosserien, hergestellt mit unterschiedlichen Strom-Mixen: Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus³⁰³

³⁰³ Eigene Darstellung

5.4.2 Karosserie aus Kohlenstofffaser verstärktem Kunststoff

Neben den verschiedenen Strom-Mixen zur Herstellung werden in den Diagrammen in Abbildung 60 und Abbildung 61 die Auswirkungen zweier unterschiedlicher Prozessvarianten zur CFK-Karosserieherstellung verglichen. Als Referenzfahrzeuge dienen wieder die unter 5.4 angeführten Fahrzeuge mit Benzin bzw. Elektromotor.

Für den Vergleich der Produktion der CFK-Karosserie werden, die Strom-Mixe aus Österreich, Norwegen, China, der EU und den USA verwendet (siehe Tabelle 11, Seite 57).

Der CO₂-Ausstoß der CFK-Karosserieherstellung (LOW) mit chinesischem Strom-Mix liegt nur leicht über dem der Aluminiumkarosserieherstellung im selben Strom-Mix. Das CO₂-Einparungspotenzial in der Nutzungsdauer eines Fahrzeuges mit CFK-Karosserie ist wesentlich höher, jedoch amortisiert sich der erhöhte CO₂-Ausstoß in der Herstellung mit chinesischem Strom-Mix nicht bis zum Ende der Nutzungsdauer. Die anderen ausgewählten Produktionsszenarien der CFK-Karosserie (LOW) amortisieren sich dagegen sehr wohl. Bei einer Herstellung mit dem Strom-Mix der USA amortisiert sich der erhöhte CO₂-Ausstoß in der CFK-Karosserieherstellung nach 150.000km. In der EU liegt die Amortisation bei 110.000 km, in Österreich bei über 70.000km und in Norwegen bei unter 40.000km.

Der CO₂-Ausstoß, welcher in der Herstellung der CFK-Karosserievarianten (HIGH) auftritt, kann über die Nutzungsdauer nicht wieder eingespart werden. Im norwegischen Strom-Mix wird bis zum Ende der Nutzungsdauer annähernd der CO₂-Ausstoß der Referenzvariante erreicht. Dass dieses Berechnungsmodell der CFK-Karosserieherstellung den Punkt der Amortisation nicht erreicht, liegt zum einen am höheren Energieverbrauch und somit am höheren CO₂-Ausstoß, aber auch am geringeren Anteil an elektrischer Energie gegenüber der CFK (LOW) Variante. Somit ist der Einfluss des CO₂-Faktors auf den CO₂-Ausstoß der CFK-Karosserie (HIGH) geringer als auf jenen der Variante (LOW).

Im Vergleichsszenario in Abbildung 61 amortisiert sich nur die CFK-Karosserieherstellung mit norwegischem Strom. Alle anderen Varianten amortisieren sich auf Grund des geringen CO₂-Ausstoßes des Elektroantriebes erst nach 200.000 km

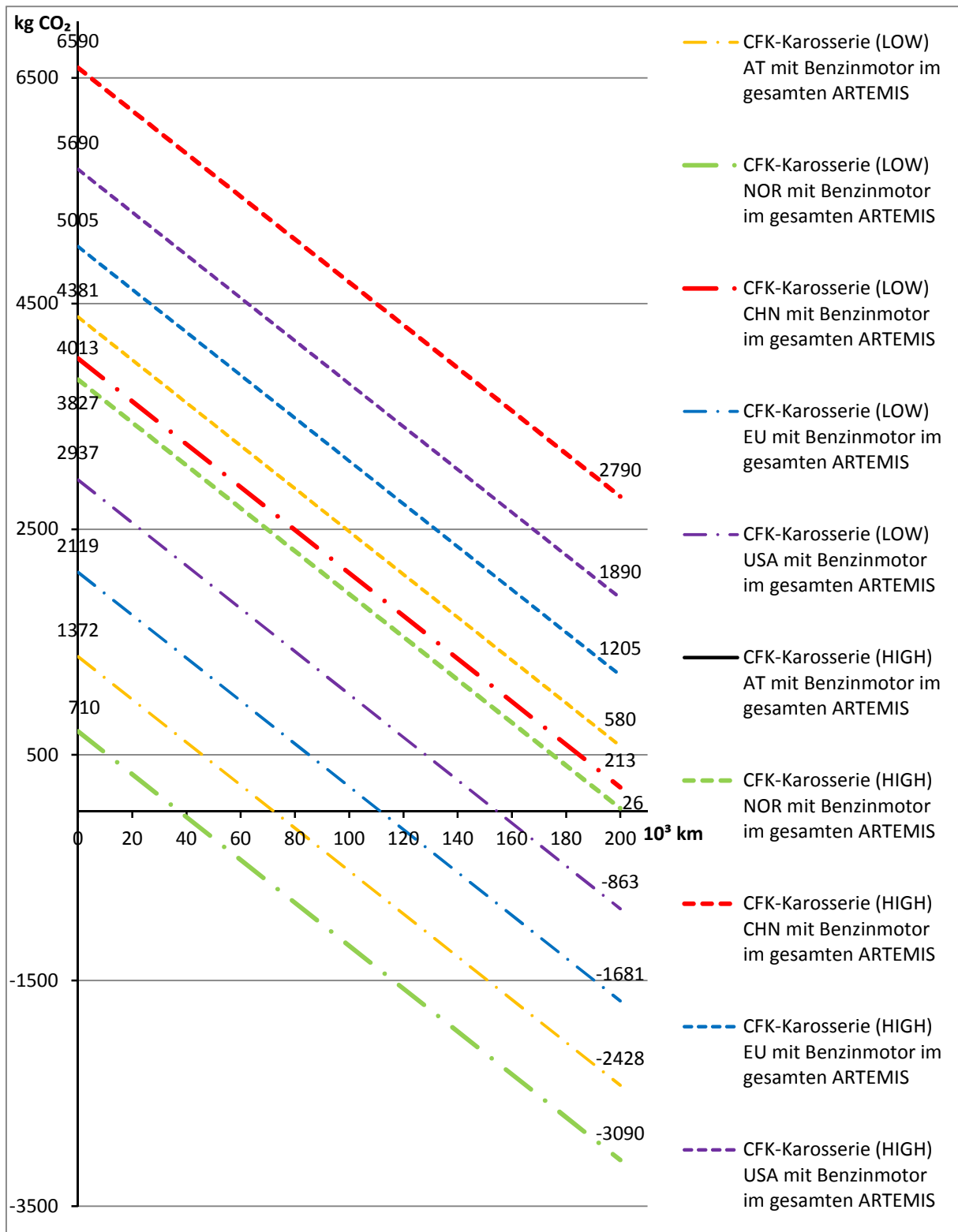


Abbildung 60: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer von Benzinfahrzeugen mit CFK-Karosserien (LOW u. HIGH), hergestellt mit unterschiedlichen Strom-Mixen: Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus³⁰⁴

³⁰⁴ Eigene Darstellung

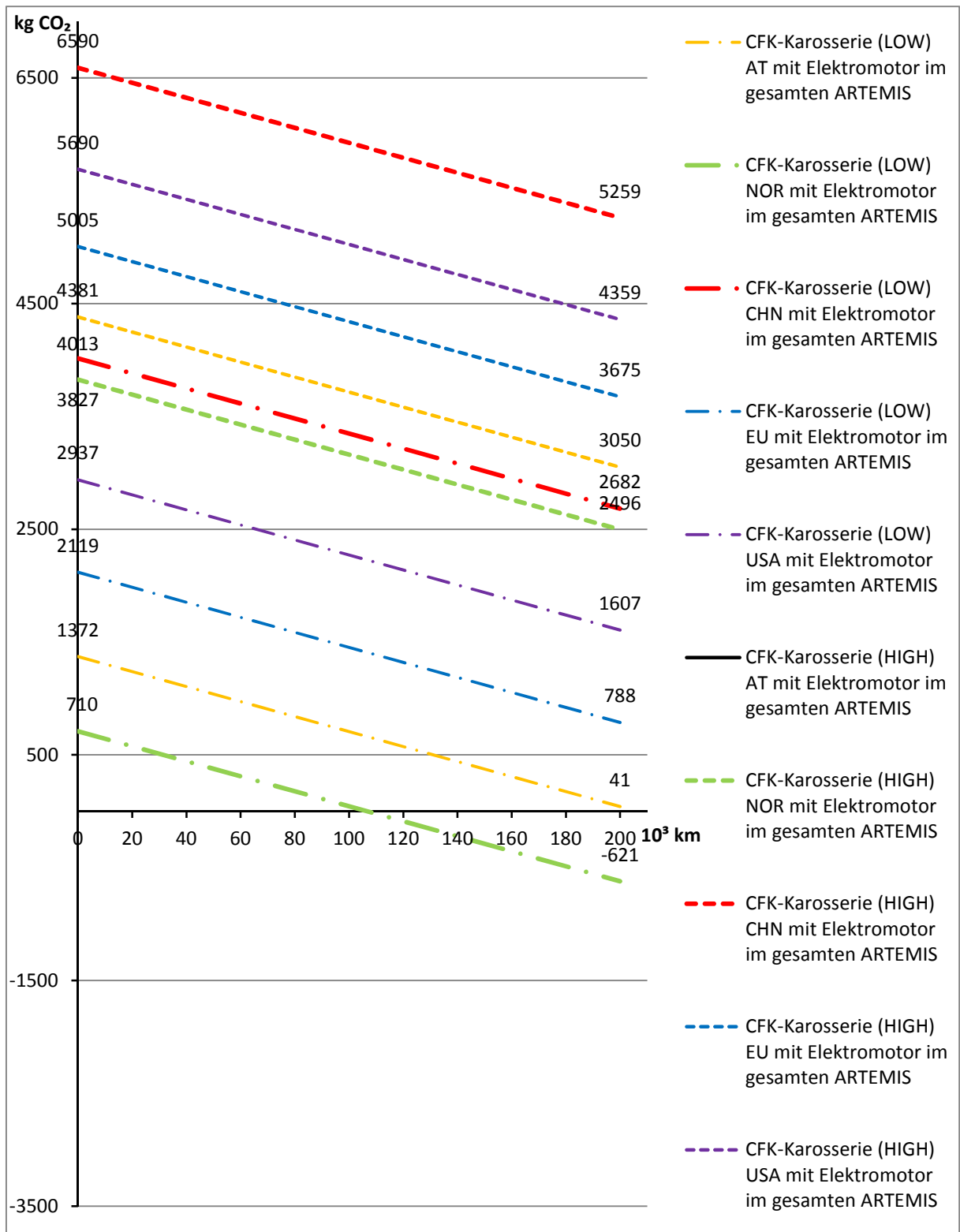


Abbildung 61: Differenz des CO₂-Ausstoßes über die Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen mit CFK-Karosserien (LOW u. HIGH), hergestellt mit unterschiedlichen Strom-Mixen: Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus³⁰⁵

³⁰⁵ Eigene Darstellung

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Hinblick auf die CO₂-Bilanz von Fahrzeugen führt die Verwendung von Leichtbauvarianten per se, nicht immer zu einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von der Rohstoffgewinnung bis zum Ende der Nutzungsdauer. Die Rahmenbedingungen unter denen sie hergestellt und eingesetzt werden, haben einen beträchtlichen Einfluss auf die CO₂-Emission. So kann am ehesten durch Leichtbauvarianten CO₂ eingespart werden, wenn sie mit regenerativer Energie hergestellt, oder/und ein Antriebskonzept mit Verbrennungskraftmotor nicht durch einen alternativen Antrieb mit geringerem CO₂-Ausstoß ersetzt werden kann. Was den Fahrbetrieb anbelangt, so haben Leichtbaukarosserien in urbanen Gebieten ein weit höheres CO₂-Einsparungspotenzial als auf Autobahnen. Durch den hohen Anteil der Beschleunigungsphasen im Stadtgebiet bringt Massenreduktion hier ihr Potenzial stärker zur Geltung.

Nicht nur der kleinräumige Unterschied vom Stadt- zum Autobahnverkehr beeinflusst die CO₂-Emissionen, sondern auch der länderspezifische Einsatz von Elektrofahrzeugen. Ob sich der erhöhte CO₂-Ausstoß in der Fertigung einer Leichtbauvariante über die Nutzungsdauer amortisiert, ist stark vom Strom-Mix abhängig mit dem das Fahrzeug geladen wird.

Beim Vergleich des CO₂-Einsparungspotenzial von Antriebsstrang und Leichtbaukarosserie kann gesagt werden, dass durch einen Antriebsstrangwechsel das Einsparungspotenzial wesentlich höher ist als durch eine Leichtbauvariante. Zum Beispiel sparen sowohl ein Elektroauto, welches mit dem EU-Strom-Mix geladen wird, und dessen Leichtbaukarosserie unter Verwendung des EU-Strom-Mixes hergestellt wird, als auch ein Benzinfahrzeug mit Leichtbaukarosserie, gegenüber dem entsprechenden Fahrzeug mit Stahlkarosserie CO₂ ein, sinnvoller wäre es jedoch, den Benzinmotor durch einen Elektromotor zu ersetzen.

Unter Berücksichtigung der Art des Antriebsstranges ist weiter festzustellen dass je geringer der CO₂-Ausstoß über die Nutzungsdauer ist, desto stärker ist die Forderung Energieformen mit geringer CO₂-Emission zur Herstellung von Leichtbaukarosserien zu verwenden wird.

Ausgehend vom, in der Auswertung angeführten, Referenzfahrzeug mit Benzinmotor, ist bei einer Substituierung des Antriebs durch ein Alternativkonzept, auf die Wahl des Leichtbaukonzeptes zu achten. Je geringer der CO₂-Ausstoß des Antriebes über die Nutzungsdauer ist, desto eher ist der Einsatz einer Aluminiumkarosserie sinnvoller als jener einer CFK-Karosserie. Bei CFK-Karosserien hat zusätzlich der

Faserherstellungsprozess einen gravierenden Einfluss darauf, ob eine CO₂-Einsparung über den Lebenszyklus überhaupt möglich ist.

Abschließend ist zu sagen, dass in Hinblick auf die gesetzlichen Vorgaben zur CO₂-Reduktion über die Nutzungsdauer von Fahrzeugen (Stichwort: Flottenverbrauch), es sinnvoll ist, die Herstellung der Fahrzeuge unter ökologischen Gesichtspunkten vom Gesetzgeber aus über den gesamten Lebenszyklus in einer Reglementierung zu erfassen. Diese ist nur mit einer ausreichenden Transparenz von Seiten der Hersteller für Energie- und Rohstoffflüssen zu erreichen.

7 Literaturverzeichnis

- ANDRÉ, M.:** Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles, Bron 2004a.
- ANDRÉ, M.:** The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions., in: The Science of the total environment, Bron 2004b, S. 73–84
- BERGER, C.; KLOOS, K.H.:** 3. Eigenschaften und Verwendung der Werkstoffe in: DUBBEL—Taschenbuch für den Maschinenbau, Berlin, 23. Auflag 2012, S. E32–E70.
- BMW AG:** Umwelterklärung 2012 / 2013. BMW Standort Regensburg., Regensburg 2013a.
- BMW AG:** Umwelterklärung 2012/2013. Standort Leipzig., Leipzig 2013b.
- BMW AG:** Beginn einer neuen Ära: BMW Group startet Serienproduktion des Elektrofahrzeugs BMW i3 in Leipzig., München 2013c.
- BOUSTEAD, I.:** Eco-profiles of the European Plastics Industry-LIQUID EPOXY RESINS, Brussels 2005.
- BRAESS, H.; SEIFFERT, U.:** Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Auflage, Wiesbaden 2012
- BRAY, E.L.:** Mineral Commodity Summaries, Reston 2013.
- BRUNNER, H.:** Neugestaltung der Automobile, Zwischenbericht 2, Graz 2013.
- DAHLMANN, P. ET. AL.:** Wege zur Effizienzsteigerung in der Stahlindustrie Stahlinstitut VDEh Wirtschaftsvereinigung Stahl, Düsseldorf 2010.
- DAS, S.:** The Cost of Automotive Polymer Composites : A Review and Assessment of Doe' s Lightweight Material Composites Resarch, Oak Ridge 2001.
- DAS, S.:** Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, Heft 3 (16) 2011, S. 268–282
- EICKENBUSCH, H.; KRAUSS, O.:** Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien, Berlin 2013.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION:** RICHTLINIE 1999/100/EG der Kommission, Brüssel 1999
- EUROPÄISCHES PARLAMENT:** RICHTLINIE 98/69/EG, Brüssel 1998.

- EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION:** Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry April 2013-Data for the year 2010, Brüssel 2013.
- FEIFEL, S.; WALK, W.; WURSTHORN, S.:** Die Ökobilanz im Spannungsfeld zwischen Exaktheit, Durchführbarkeit und Kommunizierbarkeit, in: Environmental Sciences Europe 2010, S. 46–55,
- FINKBEINER, M. ET. AL.:** Commentaries The New International Standards for Life Cycle Assessment : ISO 14040 and ISO 14044, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, Heft 2 (11) 2006, S. 80–85.
- FRIEDRICH, H.E.:** Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden 2013.
- FRITSCH, U.R. ET. AL.:** Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.81, Darmstadt 2013.
- FUNKE, H.:** Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in am Beispiel eines Kleinflugzeuges 2001.
- HAUSBERGER, S.; SCHMITZBERGER, M.:** Emissionsverhalten von SUV – Sport Utility Vehicles, Wien 2008.
- HEUSS, R. ET. AL.:** Lightweight , heavy impact 2012.
- HÖPFNER, U.; HANUSCH, J.; LAMBRECHT, U.:** ABWRACKPRÄMIE UND UMWELT – eine erste Bilanz, Heidelberg 2009.
- JAHN, B.; KARL, D.; WITTEN, E.:** Composites-Marktbericht 2012 - Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, Frankfurt 2012.
- JOLLIET, O. ET. AL.:** Presenting a New Method IMPACT 2002 + : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, Heft 6 (8) 2003, S. 324–330.
- KLEIN, B.:** Leichtbau-Konstruktion, 8. Auflage, Wiesbaden 2009
- KLÖPFER, W.; GRAHL, B.:** Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf, Weinheim 2009,
- KRINKE, S. ET. AL.:** Automobiler leichtbau unter einbezug des gesamten lebenszyklus, in: ATZ, Heft 6 2010, S. 438–445.
- LUTSEY, N.:** Survey of vehicle mass-reduction technology trends and prospects, El Monte 2010.
- MAYER, H.; VENIER, F.; KOGLIN, K.:** The ASF Body of the Audi A8, in: ATZ/MTZ (63) 2002, S. 94–106.
- MEYER, L.O.:** Closing the loop for CFRP´s in: CFK-Recycling, Meitingen 2007.

- MOCK, P.:** European Vehicle Market Statistics Pocketbook 2013, Berlin 2013.
- MORIN, C. ET. AL.:** Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art, in: The Journal of Supercritical Fluids (66) 06.2012, S. 232–240
- NAPPI, C.:** The Global Aluminium Industry: 40 years from 1972, London 2013,
- O.V.:** Handbuch: Faserverbundwerkstoffe, Waldenbuch 2003.
- O.V.:** VDI-Richtlinie 4600, Kumulierter Energieaufwand, Berlin 2012.
- O.V.:** Crude steel production - December 2013, Brüssel 2013a.
- O.V.:** Handbuch Faserverbundkunststoffe / Composites, 4. Auflage, Wiesbaden 2013c.
- O.V.:** SIGRAFIL® C Die Carbonfaser auf der Basis von PAN, Wiesbaden 2013d.
- OSTERMANN, F.:** Anwendungstechnologie Aluminium, Berlin, Heidelberg 2007
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT:** ÖNORM EN ISO 14044 Umweltmanagmant - Ökobilanz Anforderungen und Anleitungen, Wien 2006.
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT:** ÖNORM EN ISO 14040 Umweltmanagmant - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Wien 2009.
- PE INTERNATIONAL AG:** PE: GaBi 5, Software-System and Database for Life Cycle Engineering, Stuttgart/Echterdingen 2014.
- PFEIFER, H.; NACKE, B.; BENEKE, F.:** Praxishandbuch Thermoprozesstechnik, Band II, Essen 2011.
- ROBERT BOSCH GMBH:** Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 26. Auflage, Plochingen 2007.
- ROOS, E.; MAILE, K.:** Werkstoffkunde für Ingenieure, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg 2008
- SCHABBACH, T.; WESSELAK, V.:** Energie - Die Zukunft wird erneuerbar, Berlin/Heidelberg 2012.
- SCHINDLER, V.; SIEVERS, I.:** Forschung für das Auto von Morgen, Berlin/Heidelberg 2008
- SCHMITZ, S.; PAULINI, I.:** Bewertung in Ökobilanzen, Berlin 1999.
- SCHULT, K.; RETTING, K.:** Kohlenstofffasern - Wohin geht es mit den Faserkapazitäten, Produkten und Entwicklungstrends?, in: lightweight design, Heft 1 2010, S. 20–25.

SCHÜRMAN, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Berlin/Heidelberg 2007

SUZUKI, T. ET. AL.: LCA of Passenger Vehicles Lightened by Recyclable Carbon Fiber Reinforced Plastics, Tokyo 2000.

SUZUKI, T.; TAKAHASHI, J.: Prediction of Energy Intensity of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Mass-Produced Passenger Cars, Tokyo 2005.

TUCK, C.A.: Iron Ore, Reston 2013.

VANHAELEST, R.; SCHEUERMANN, J.: Die Potenziale des Plug-In-Hybrids -eine detaillierte Betrachtung-, Wolfenbüttel 2012.

WIEDEMANN, J.: Leichtbau: Elemente und Konstruktion, 3. Auflage, Berlin 2007

8 Internetquellenverzeichnis

AUDI AG: Audi MediaServices, <https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/public/fotos/2009/12/01/A8090064.html>,
Zugriffsdatum: 22.01.2014.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT: Berechnung der CO2-Emissionen - Infozentrum Umwelt Wirtschaft, http://www.izu.bayern.de/praxis/detail_praxis.php?pid=0203010101217,
Zugriffsdatum: 11.01.2014.

BOERIU, H.: 2012 BMW 1 Series Production Photos from Regensburg, <http://www.bmwblog.com/2011/07/09/2012-bmw-1-series-production-photos-from-regensburg/p90078724-6/>, Zugriffsdatum: 22.01.2014.

EIA: Energy Information Administration (EIA)- Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS) Steel Analysis Brief, <http://www.eia.gov/consumption/manufacturing/briefs/steel/#energy-consumption>,
Zugriffsdatum: 14.01.2014.

HARPER INTERNATIONAL: Harper Beacon - Test Your Plant's Carbon Footprint, <http://harperbeacon.com/quiz/>, Zugriffsdatum: 05.02.2014.

KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: KBA Umwelt, http://www.kba.de/ckn_031/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/b_u_mwelt_z_teil_2.html, Zugriffsdatum: 12.02.2014.

O.V.: SPENGLERTECHNIK, <http://www.spenglertechnik.net/metalle/aluminium.html>,
Zugriffsdatum: 21.02.2014b.

O.V.: Sustainable production in Moses Lake, <http://www.sglacf.com/en/production/moses-lake-usa/sustainable-mol.html>,
Zugriffsdatum: 05.02.2014a.

O.V.: Formen und Vernetzen, <http://www.for860.rwth-aachen.de/cms4215/index.php?id=24>, Zugriffsdatum: 06.02.2014b.

O.V.: Electric Drive Sales, <http://electricdrive.org/index.php?ht=d/sp/i/20952/pid/20952>,
Zugriffsdatum: 12.02.2014c.

SCHWARTZ, R.: Entwicklungstendenzen beim Presshärten in der Automobilindustrie, http://www.umformtechnikmagazin.de/umformtechnik-fachartikel/entwicklungstendenzen-beim-preshaerten-in-der-automobilindustrie_9640_de/, Zugriffsdatum: 03.02.2014.

SGL CARBON SE: Carbon in Mobility SGL Group – The Carbon Company, http://www.sglgroup.com/cms/international/innovation/carbon-in-mobility/index.html?__locale=de, Zugriffsdatum: 22.01.2014.

SGL GROUP: The Carbon Age Begins – BMW Group / SGL Group Joint Venture opens the new Moses Lake Plant, Wiesbaden 2011, http://www.sglgroup.com/cms/_common/downloads/press-lounge/news/2011/09/2011_09_02_The_Carbon_Age_Begins_-_BMW_Group-SGL_Group_Joint_Venture_opens_the_new_Moses_Lake_Plant.pdf, Zugriffsdatum: 11.01.2014..

VCÖ - MOBILITÄT MIT ZUKUNFT: Österreichs Autos fahren im Schnitt 13 . 500 Kilometer pro Jahr, <http://www.vcoe.at/de/presse/aussendungen-archiv/details/items/2010-26?print=true>, Zugriffsdatum: 11.01.2014.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das SETAC-Dreieck von 1990 und die Erweiterung von 1993.....	4
Abbildung 2: Allgemeine Darstellung eines Produktsystems einer Ökobilanz.....	6
Abbildung 3: Satz von Prozessmodulen in einem Produktsystem in allgemeiner Darstellung	6
Abbildung 4: Komponenten einer Ökobilanz nach ISO 14040	8
Abbildung 5: Vereinfachtes Verfahren zur Erstellung einer Sachbilanz nach ISO 14044	13
Abbildung 6: Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung am Beispiel der Klimaänderung	16
Abbildung 7: Bestandteile der Auswertung und ihre Beziehung zu anderen Bereichen der Ökobilanz	17
Abbildung 8: Kosten der Gewichtseinsparung.....	22
Abbildung 9: Zwei Wege zur Rohstahlherstellung.....	26
Abbildung 10: Prozessschema der Aluminiumoxidgewinnung	32
Abbildung 11: Elektrolyseofen zur Aluminiumherstellung.....	33
Abbildung 12: a) verstrecken von Fasern b) Molekülkettenorientierung in nur gesponnenem und gestreckten Zustand	36
Abbildung 13: PAN-Faserherstellungsprozess.....	37
Abbildung 14: Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von Kohlenstofffasern als Funktion der Behandlungstemperatur, sowie Auswirkung der Oberflächenbehandlung auf die Zugfestigkeit.....	38
Abbildung 15: Herstellungsprozess der Kohlenstofffaser	39
Abbildung 16: Produktionskapazität für Kohlenstofffaser nach Hersteller in Tonnen (2011).....	40
Abbildung 17: Globaler Bedarf an Kohlenstofffaser in Tonnen.....	40
Abbildung 18: CFK-Fertigungsverfahren nach Bauteilkomplexität und Automatisierungsgrad	42
Abbildung 19: Verfahrensablauf des Resin Transfer Moulding	43
Abbildung 20: Recycling-Technologien für CFK-Bauteile.....	46

Abbildung 21: Verfahren zur Herstellung von Tailored Blanks	49
Abbildung 22: Karosserierohbau des BMW F20.....	51
Abbildung 23: Audi Aluminium Space Frame Karosserie	52
Abbildung 24: Life-Modul des BMW i3	53
Abbildung 25: Energiefluss der Primär- und Prozessenergie	54
Abbildung 26: Berechnungsschema zur Berechnung der Primärenergie	55
Abbildung 27: Berechnungsschema zur Berechnung des CO ₂ -Ausstoßes der fossilen Prozessenergie	56
Abbildung 28: Berechnungsschema zur Berechnung des CO ₂ -Ausstoßes der elektrischen Prozessenergie	56
Abbildung 29: Produktsystem Stahlkarosserie	58
Abbildung 30: Produktsystem Aluminiumkarosserie.....	62
Abbildung 31: Prozentuelle Verteilung der Blech-, Profil- und Gussteile der Karosserie des Audi A8 (D3) ²¹²	67
Abbildung 32: Produktsystem CFK-Karosserie	70
Abbildung 33: Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit des NEDC.....	78
Abbildung 34: Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit der ARTEMIS-Zyklen ARTEMIS-Urban, ARTEMIS, Rural und ARTEMIS-Motorway.....	79
Abbildung 35: Haupt- und Unterkategorien der Daten.....	89
Abbildung 36: Verbrauch an gesamter Prozessenergie (dunkler Balken) sowie anteiliger elektrische Energie (heller Balken) in der Herstellung der einzelnen Karosserievarianten	90
Abbildung 37: Verbrauch an gesamter Prozessenergie (dunkler Balken) sowie anteiliger elektrische Energie (heller Balken) in der Herstellung der einzelnen Karosserievarianten bezogen auf ein kg Karosserie	91
Abbildung 38: CO ₂ -Ausstoß in Kilogramm CO ₂ für jedes Karosseriekonzept und Produktionsland.....	92
Abbildung 39: CO ₂ -Ausstoß in Kilogramm CO ₂ je Kilogramm Karosserie für jedes Karosseriekonzept und Produktionsland	93
Abbildung 40: Primärenergieverbrauch für jedes Karosseriekonzept und Produktionsland.....	94

Abbildung 41: Primärenergieverbrauch je Kilogramm Karosserie für jedes Karosseriekonzept und Produktionsland	94
Abbildung 42: CO ₂ -Ausstoß in den Fahrzyklen NEDC und ARTEMIS in [^g CO ₂ /km].....	95
Abbildung 43: Energieverbrauch in den Fahrzyklen NEDC und ARTEMIS in [^{kWh} / ₁₀₀ km].....	96
Abbildung 44: Berechnungsschema der Differenz des CO ₂ -Ausstoßes am Beginn der Nutzungsdauer.....	97
Abbildung 45: Berechnungsschema der Differenz des CO ₂ -Ausstoßes am Ende der Nutzungsdauer.....	97
Abbildung 46: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus	98
Abbildung 47: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Urban-Zyklus.....	98
Abbildung 48: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Motorway-Zyklus	99
Abbildung 49: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus....	100
Abbildung 50: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Urban-Zyklus.....	100
Abbildung 51: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Motorway-Zyklus....	100
Abbildung 52: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Erdgasmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus....	101
Abbildung 53: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Erdgasmotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Urban-Zyklus	102
Abbildung 54: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Erdgasmotor und Stahlkarosserie im ARTEMIS-Motorway-Zyklus....	102
Abbildung 55: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes verschiedener Antriebsstrang-Karosserie-Kombinationen über die Nutzungsdauer. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus.....	103
Abbildung 56: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer verschiedener Antriebskonzepte mit Aluminiumkarosserie. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus.....	106

Abbildung 57: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer verschiedener Antriebskonzepte mit CFK-Karosserie. Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus.....	107
Abbildung 58: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer von Benzinfahrzeugen mit Aluminiumkarosserien, hergestellt mit unterschiedlichen Strom-Mixen: Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus.....	109
Abbildung 59: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen mit Aluminiumkarosserien, hergestellt mit unterschiedlichen Strom-Mixen: Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus.....	110
Abbildung 60: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer von Benzinfahrzeugen mit CFK-Karosserien (LOW u. HIGH), hergestellt mit unterschiedlichen Strom-Mixen: Referenz: Fahrzeug mit Benzinmotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus.....	112
Abbildung 61: Differenz des CO ₂ -Ausstoßes über die Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen mit CFK-Karosserien (LOW u. HIGH), hergestellt mit unterschiedlichen Strom-Mixen: Referenz: Fahrzeug mit Elektromotor und Stahlkarosserie im gesamten ARTEMIS-Zyklus.....	113
Abbildung 62: Prozesskette für den deutschen Strom-Mix.....	i
Abbildung 63: Prozesskette für den österreichischen Strom-Mix	iii
Abbildung 64: Prozesskette für den norwegischen Strom-Mix	iv
Abbildung 65: Prozesskette für den chinesischen Strom-Mix.....	v
Abbildung 66: Prozesskette für den australischen Strom-Mix	vi
Abbildung 67: Prozesskette für den europäischen Strom-Mix.....	vii
Abbildung 68: Anteile der Kraftwerke im US-Strom-Mix	viii
Abbildung 69: Energiefluss der Primär- und Prozessenergie	ix
Abbildung 70: Prozesse und Zwischenprodukte der PAN-Faserherstellung	xxx
Abbildung 71: Gliederung der Prozessschritte die erforderlich sind um flüssige Epoxidharze aus Rohstoffen herzustellen	xxxi
Abbildung 72: Gliederung des Epoxidharzherstellungsprozesses aus Zwischenprodukten	xxxii

Abbildung 73: CO₂-Ausstoß in den Fahrzyklen NEDC und ARTEMIS für alle Elektrofahrzeug-Karosserie-Kombinationen in allen untersuchten Ländern.....xxxiii

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkungskategorien und die übergeordneten Schadenskategorien	15
Tabelle 2: Akzeptable Mehrkosten pro eingesparter Masse.....	23
Tabelle 3: Eisenerzproduktion und Reserven.....	26
Tabelle 4: Rohstahlerzeugung nach Ländern bzw. Regionen 2013	28
Tabelle 5: Spektrum ausgewählter physikalischer Eigenschaften von Stahl	29
Tabelle 6: Bauxitproduktion und Reserven.....	31
Tabelle 7: Aluminiumproduktion nach Ländern bzw. Regionen 2010.....	33
Tabelle 8: Spektrum ausgewählter physikalischer Eigenschaften von Aluminiumlegierungen.....	35
Tabelle 9: Spektrum ausgewählter physikalischer Eigenschaften von Kohlenstofffasern.	44
Tabelle 10: Spektrum ausgewählter physikalischer Eigenschaften von Epoxidharz.	44
Tabelle 11: Länderspezifischer CO ₂ -Ausstoß und Primärenergiebedarf bezogen auf eine kWh elektrische Energie	57
Tabelle 12: CO ₂ -Ausstoß und Energiebedarf der Stahlblechherstellung je nach Länder-Strom-Mix.....	59
Tabelle 13: CO ₂ -Ausstoß und Energiebedarf der Stahlkarosserieherstellung je nach Länder-Strom-Mix.....	60
Tabelle 14: CO ₂ -Ausstoß und Energiebedarf der Stahlkarosserie je nach Länder-Strom-Mix.....	61
Tabelle 15: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß der Bauxitgewinnung	63
Tabelle 16: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß der Tonerdeherstellung	64
Tabelle 17: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß der Anodenherstellung	64
Tabelle 18: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß der Aluminiumherstellung	65
Tabelle 19: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß der Aluminiumbarrenherstellung.....	66

Tabelle 20: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß der Aluminiumblechherstellung.....	66
Tabelle 21: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß der Aluminiumkarosseriefertigung	67
Tabelle 22: Spez. CO ₂ -Ausstoß und Energiebedarf der Aluminiumkarosserieherstellung je nach Länder-Strom-Mix	68
Tabelle 23: Spez. Primärenergieverbrauch und CO ₂ -Ausstoß der PAN-Faserherstellung.....	71
Tabelle 24: Spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß der Kohlenstofffaserherstellung (HIGH).....	71
Tabelle 25: spez. Prozess- und Primärenergieverbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß der Kohlenstofffaserherstellung (LOW)	72
Tabelle 26: Spez. CO ₂ -Ausstoß und Energiebedarf Im RTM-Verfahren je nach Länder-Strom-Mix.....	73
Tabelle 27: Spez. CO ₂ -Ausstoß und Energiebedarf der CFK-Karosseriefertigung je nach Länder-Strom-Mix.....	73
Tabelle 28: Spez. CO ₂ -Ausstoß und Energiebedarf der CFK-Karosserie je nach Länder-Strom-Mix (CFK HIGH)	74
Tabelle 29: CO ₂ -Ausstoß und Energiebedarf der CFK-Karosserieherstellung je nach Länder-Strom-Mix (CFK LOW)	74
Tabelle 30: Beschreibung der drei Teilzyklen und des ARTEMIS-Zyklus.....	79
Tabelle 31: Durchschnittswerte für Fahrzeug mit Stahlkarosserie im C-Segment inklusive Fahrer	80
Tabelle 32: Ergebnistabelle zu den Zykluswirkungsgraden.....	83
Tabelle 33: Werte für Fahrzeug mit Aluminiumkarosserie im C-Segment inklusive Fahrer.....	83
Tabelle 34: Werte für Fahrzeug mit CFK-Karosserie im C-Segment inklusive Fahrer	83
Tabelle 35: Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit Aluminiumkarosserie	84
Tabelle 36: Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit CFK-Karosserie	84

Tabelle 37: Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit Stahlkarosserie in den ARTEMIS-Zyklen.....	85
Tabelle 38: Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit Aluminiumkarosserie in den ARTEMIS-Zyklen.....	85
Tabelle 39 Energiebedarf und Energieverbrauch der Fahrzeuge mit CFK-Karosserie in den ARTEMIS-Zyklen.....	85
Tabelle 40: KEA der Kraftstoffherstellung	86
Tabelle 41: CO ₂ -Faktoren für die Herstellung und Verbrennung fossiler Kraftstoffe .	86
Tabelle 42: Anteile der Kraftwerke im deutschen Strom-Mix.....	ii
Tabelle 43: Anteile der Kraftwerke im österreichischen Strom-Mix	iii
Tabelle 44: Anteile der Kraftwerke im norwegischen Strom-Mix	iv
Tabelle 45: Anteile der Kraftwerke im chinesischen Strom-Mix.....	v
Tabelle 46: Anteile der Kraftwerke im australischen Strom-Mix	vi
Tabelle 47: Anteile der nationalen Strom-Mixe im europäischen Strom-Mix	viii

11 Abkürzungsverzeichnis

ARTEMIS...Assessment and Reliability of Transport Emission Modeling and Inventories

ASF...Aluminium Space Frame

CADC...Common ARTEMIS Driving Cycle

CF...Carbon Faser

CFK...Carbon Faser verstärkter Kunststoff

CO₂...Kohlendioxid

ECE...Economic Comission for Europe

EUDC...Extra Urban Driving Cycle

EU-27...Mitgliedsstaaten der europäischen Union bis einschließlich Juni 2013

ISO...International Organization for Standardization

KEA...Kumulierter Energieaufwand

NEDC...New European Driving Cycle

PAN...Polyacrylnitril

RTM...Resin Transfer Moulding

12 Formelverzeichnis

Formel 1: Luftwiderstand.....	81
Formel 2: Rollwiderstand.....	81
Formel 3: Beschleunigungswiderstand.....	81
Formel 4: Gesamter Fahrwiderstand für ebene Fahrbahnen	82
Formel 5: Energiebedarf über die gesamte Zykluslänge	82
Formel 6: Primärenergie.....	ix
Formel 7: Elektrische Energie	ix
Formel 8: Anteil der Primärenergie der zur Herstellung elektrischer Energie nötig ist.x	

Anhang A

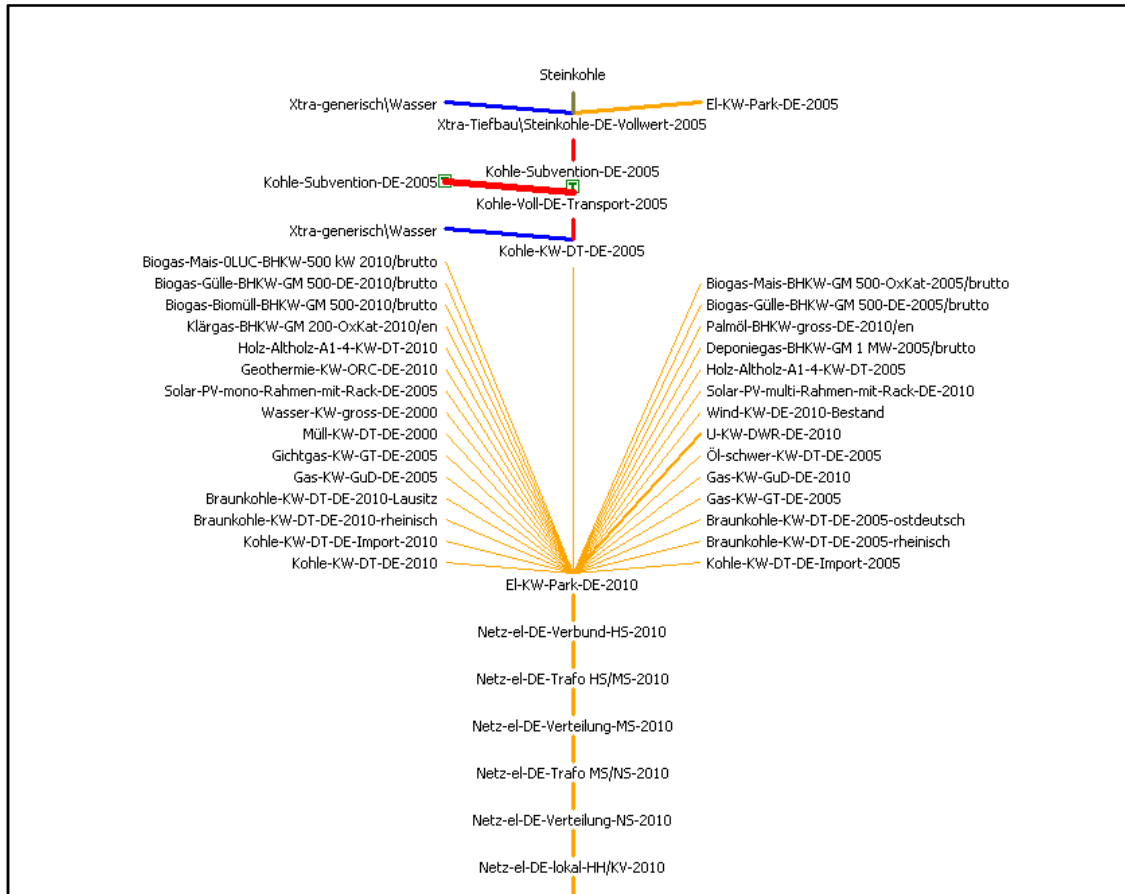


Abbildung 62: Prozesskette für den deutschen Strom-Mix³⁰⁶

³⁰⁶ Fritsche et. al. (2013)

Lieferant	Anteil in %
Kohle-KW-DT-DE-2005	3
Kohle-KW-DT-DE-2010	1
Kohle-KW-DT-DE-Import-2005	12
Kohle-KW-DT-DE-Import-2010	2,99
Braunkohle-KW-DT-DE-2005-rheinisch	12
Braunkohle-KW-DT-DE-2010-rheinisch	0,63
Braunkohle-KW-DT-DE-2005-ostdeutsch	3
Braunkohle-KW-DT-DE-2010-Lausitz	7,82
Gas-KW-GT-DE-2005	1
Gas-KW-GuD-DE-2005	10,53
Gas-KW-GuD-DE-2010	2
Gichtgas-KW-GT-DE-2005	2,70
Öl-schwer-KW-DT-DE-2005	1,31
Müll-KW-DT-DE-2000	1,52
U-KW-DWR-DE-2010	22,73
Wasser-KW-gross-DE-2000	3,34
Wind-KW-DE-2010-Bestand	5,9
Solar-PV-mono-Rahmen-mit-Rack-DE-2005	0,50
Solar-PV-multi-Rahmen-mit-Rack-DE-2010	1,44
Geothermie-KW-ORC-DE-2010	0,01
Holz-Altholz-A1-4-KW-DT-2005	1,02
Holz-Altholz-A1-4-KW-DT-2010	1,14
Deponiegas-BHKW-GM 1 MW-2005/brutto	0,162
Klärgas-BHKW-GM 200-OxKat-2010/en	0,16
Palmöl-BHKW-gross-DE-2010/en	0,16
Biogas-Biomüll-BHKW-GM 500-2010/brutto	0,10
Biogas-Gülle-BHKW-GM 500-DE-2005/brutto	0,27
Biogas-Gülle-BHKW-GM 500-DE-2010/brutto	0,77
Biogas-Mais-BHKW-GM 500-OxKat-2005/brutto	0,75
Biogas-Mais-0LUC-BHKW-500 kW 2010/brutto	0,05

Tabelle 42: Anteile der Kraftwerke im deutschen Strom-Mix³⁰⁷

³⁰⁷ Fritsche et. al. (2013), eigene Darstellung

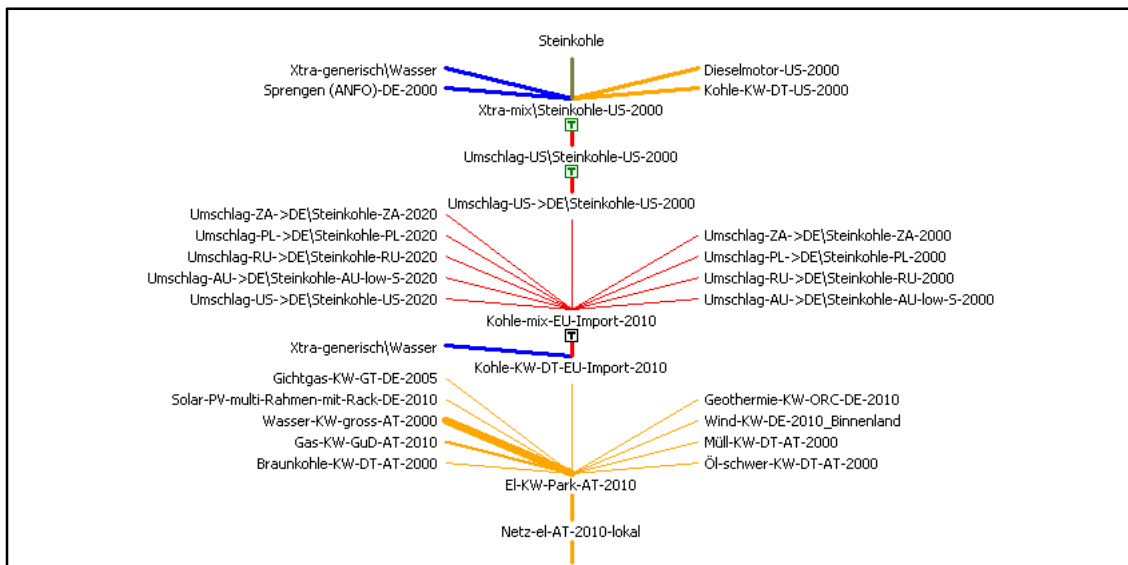


Abbildung 63: Prozesskette für den österreichischen Strom-Mix³⁰⁸

Lieferant	Anteil in %
Kohle-KW-DT-EU-Import-2010	9,27
Braunkohle-KW-DT-AT-2000	0
Öl-schwer-KW-DT-AT-2000	1,35
Gas-KW-GuD-AT-2010	19,92
Müll-KW-DT-AT-2000	4,85
Wasser-KW-gross-AT-2000	59,27
Wind-KW-DE-2010_Binnenland	4
Solar-PV-multi-Rahmen-mit-Rack-DE-2010	0,08
Geothermie-KW-ORC-DE-2010	0,02
Gichtgas-KW-GT-DE-2005	1,26

Tabelle 43: Anteile der Kraftwerke im österreichischen Strom-Mix³⁰⁹

³⁰⁸ Fritsche et. al. (2013)

³⁰⁹ Fritsche et. al. (2013), eigene Darstellung

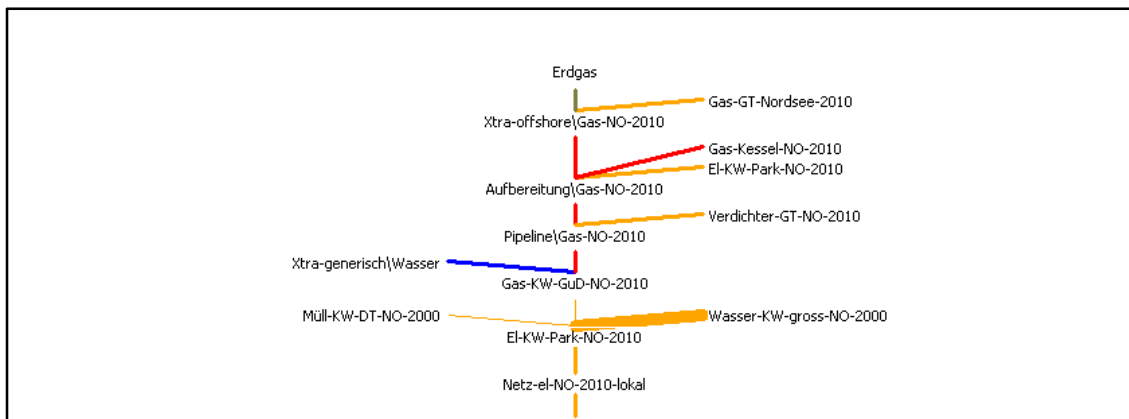


Abbildung 64: Prozesskette für den norwegischen Strom-Mix³¹⁰

Lieferant	Anteil in %
Gas-KW-GuD-NO-2010	5,5
Müll-KW-DT-NO-2000	1,1
Wasser-KW-gross-NO-2000	93,4

Tabelle 44: Anteile der Kraftwerke im norwegischen Strom-Mix³¹¹

³¹⁰ Fritsche et. al. (2013)

³¹¹ Fritsche et. al. (2013), eigene Darstellung

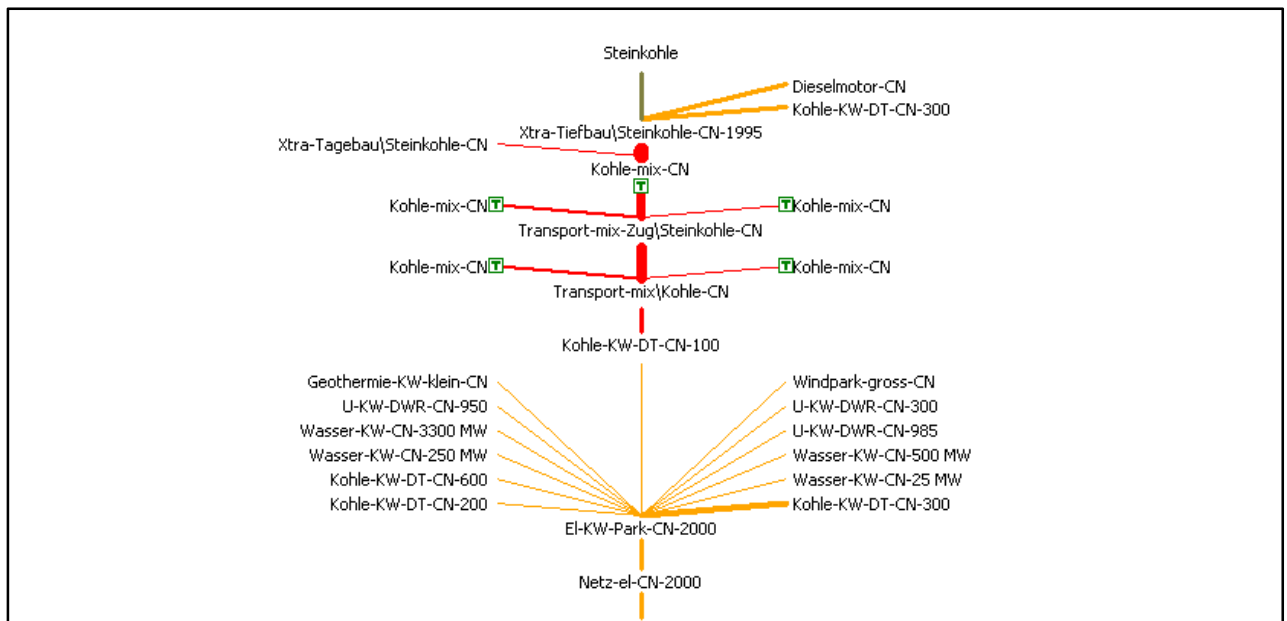


Abbildung 65: Prozesskette für den chinesischen Strom-Mix³¹²

Liefertant	Anteil in %
Kohle-KW-DT-CN-100	12,94
Kohle-KW-DT-CN-200	11,8
Kohle-KW-DT-CN-300	37,4
Kohle-KW-DT-CN-600	12,85
Wasser-KW-CN-25 MW	7,72
Wasser-KW-CN-250 MW	4,12
Wasser-KW-CN-500 MW	8,93
Wasser-KW-CN-3300 MW	2,43
U-KW-DWR-CN-985	0,84
U-KW-DWR-CN-950	0,81
U-KW-DWR-CN-300	0,13
Geothermie-KW-klein-CN	0,01
Windpark-gross-CN	0,002

Tabelle 45: Anteile der Kraftwerke im chinesischen Strom-Mix³¹³

³¹² Fritsche et. al. (2013)

³¹³ Fritsche et. al. (2013), eigene Darstellung

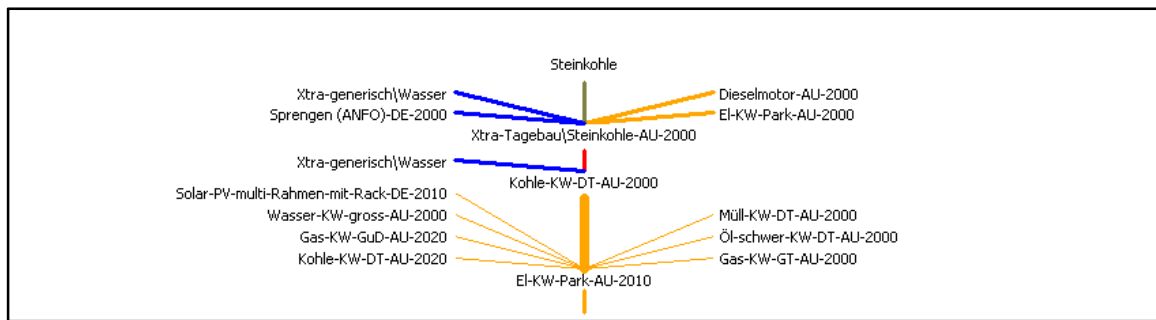


Abbildung 66: Prozesskette für den australischen Strom-Mix³¹⁴

Liefertant	Anteil in %
Kohle-KW-DT-AU-2000	69,5
Kohle-KW-DT-AU-2020	7,72
Gas-KW-GT-AU-2000	10,97
Gas-KW-GuD-AU-2020	3,28
Öl-schwer-KW-DT-AU-2000	0,55
Wasser-KW-gross-AU-2000	5,49
Müll-KW-DT-AU-2000	0,96
Solar-PV-multi-Rahmen-mit-Rack-DE-2010	1,53

Tabelle 46: Anteile der Kraftwerke im australischen Strom-Mix³¹⁵

³¹⁴ Fritsche et. al. (2013)

³¹⁵ Fritsche et. al. (2013), eigene Darstellung

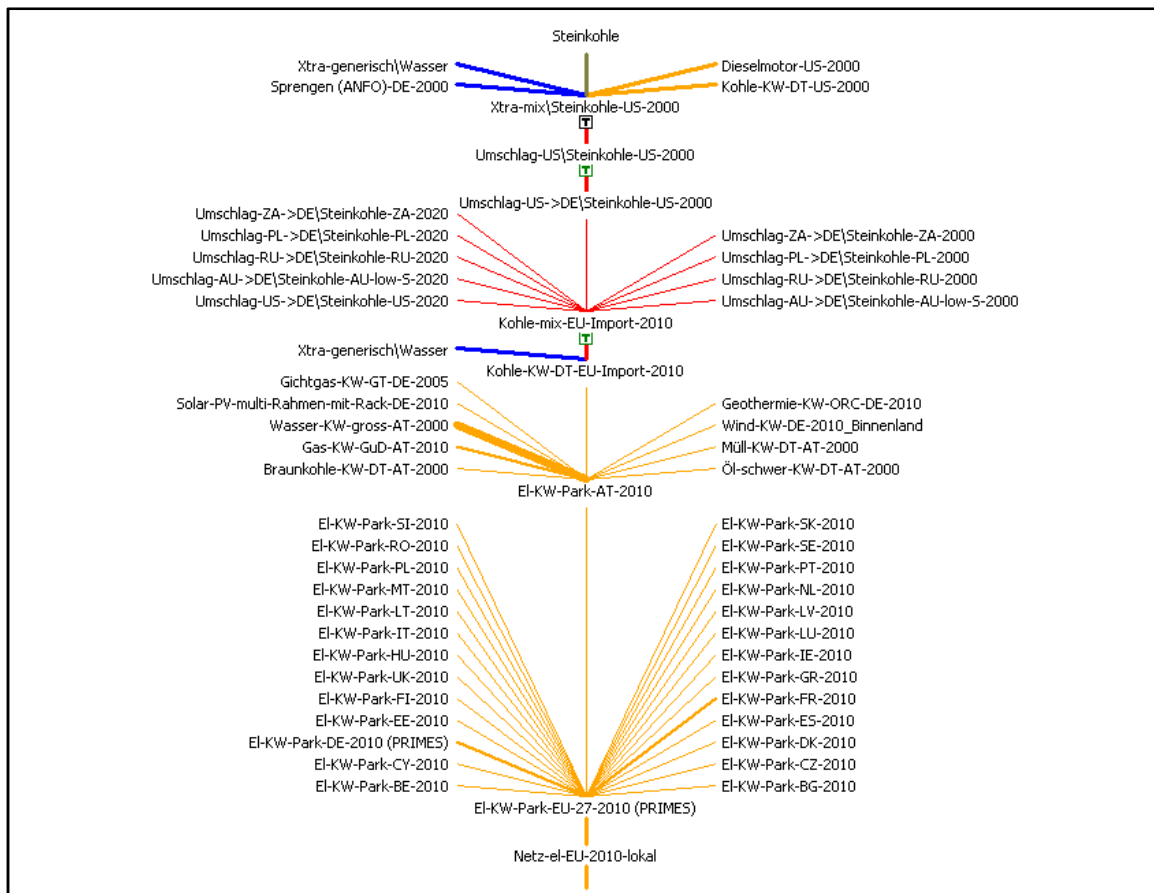


Abbildung 67: Prozesskette für den europäischen Strom-Mix³¹⁶

Lieferant	Anteil in %
EI-KW-Park-AT-2010	1,92
EI-KW-Park-BE-2010	2,56
EI-KW-Park-BG-2010	1,20
EI-KW-Park-CY-2010	142,40*10 ⁻³
EI-KW-Park-CZ-2010	2,42
EI-KW-Park-DE-2010 (PRIMES)	19,11
EI-KW-Park-DK-2010	1,10
EI-KW-Park-EE-2010	323,57*10 ⁻³
EI-KW-Park-ES-2010	8,93
EI-KW-Park-FI-2010	2,39
EI-KW-Park-FR-2010	17,14
EI-KW-Park-UK-2010	11,81
EI-KW-Park-GR-2010	1,85

³¹⁶ Fritsche et. al. (2013)

EI-KW-Park-HU-2010	1,14
EI-KW-Park-IE-2010	804,95*10 ⁻³
EI-KW-Park-IT-2010	9,07
EI-KW-Park-LU-2010	105,10*10 ⁻³
EI-KW-Park-LT-2010	194,06*10 ⁻³
EI-KW-Park-LV-2010	176,07*10 ⁻³
EI-KW-Park-MT-2010	65,496*10 ⁻³
EI-KW-Park-NL-2010	3,15
EI-KW-Park-PL-2010	4,91
EI-KW-Park-PT-2010	1,39
EI-KW-Park-RO-2010	1,85
EI-KW-Park-SE-2010	4,70
EI-KW-Park-SI-2010	489,74*10 ⁻³
EI-KW-Park-SK-2010	966,15*10 ⁻³

Tabelle 47: Anteile der nationalen Strom-Mixe im europäischen Strom-Mix³¹⁷

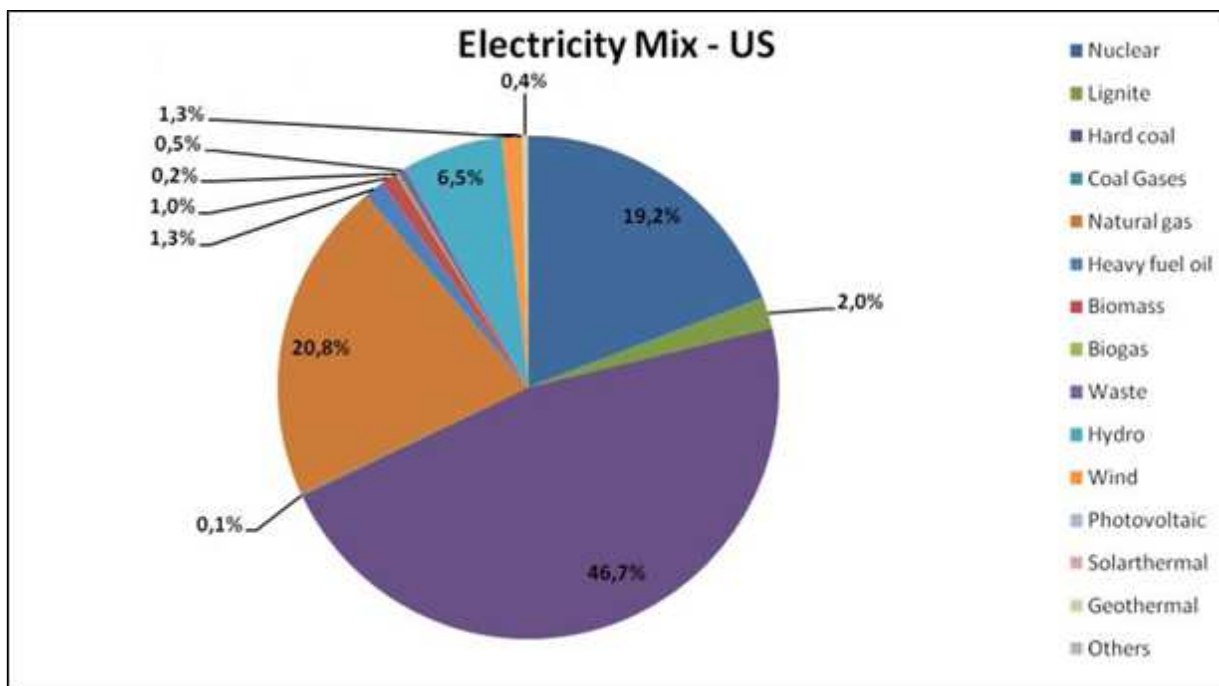
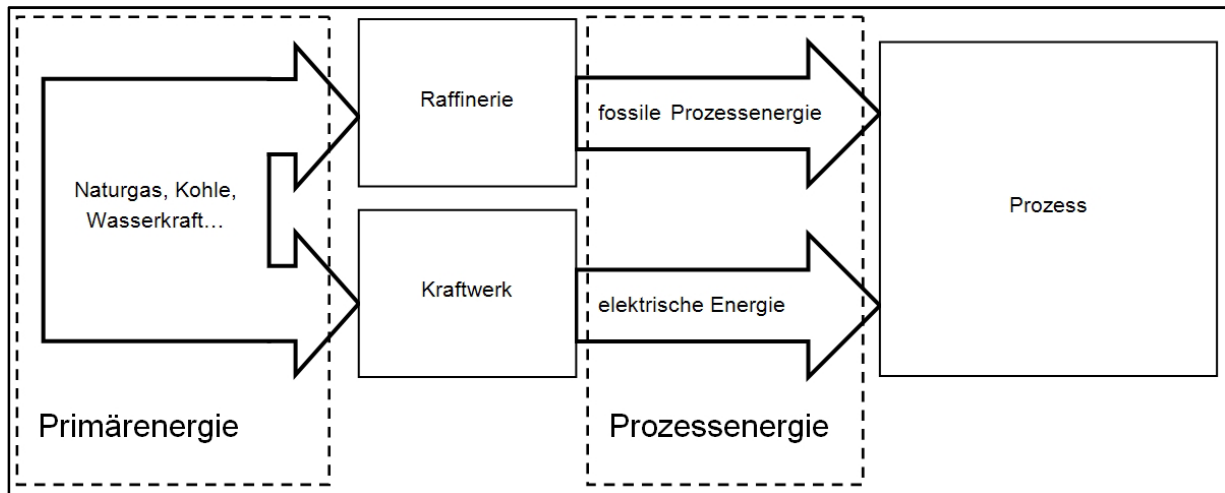


Abbildung 68: Anteile der Kraftwerke im US-Strom-Mix³¹⁸

³¹⁷ Fritsche et. al. (2013), eigene Darstellung

³¹⁸ PE International AG (2014)

Anhang B

Abbildung 69: Energiefluss der Primär- und Prozessenergie³¹⁹

$$E_{pri} = E_{pro} - E_{el} + E_{pri-el}$$

E_{pri} ...Primärenergie [kWh]

E_{pro} ...Prozessenergie [kWh]

E_{pri-el} ... Primärenergie der zur Herstellung der elektrischen Energie nötig ist [kWh]

Formel 6: Primärenergie³²⁰

$$E_{el} = E_{pro} * E_{el\%}$$

E_{el} ...elektrische Energie [kWh]

$E_{el\%}$...Prozentsatz der elektrischen Energie an der Prozessenergie [%]

E_{pro} ...Prozessenergie [kWh]

Formel 7: Elektrische Energie³²¹

³¹⁹ Eigene Darstellung

³²⁰ ibidem

³²¹ ibidem

$$E_{pri-el} = KEA * E_{el}$$

E_{pri-el} ... Primärenergie der zur Herstellung der elektrischen Energie nötig ist [kWh]

KEA...kumulierter Energieaufwand [$\frac{kWh}{kWh}$]

$E_{el\%}$...Prozentsatz der elektrischen Energie an der Prozessenergie [%]

Formel 8: Anteil der Primärenergie der zur Herstellung elektrischer Energie nötig ist³²²

Geg: $E_{pri}=5,97kWh/kg$, $E_{el\%}=18\%$, $KEA=2,84$

Ges: E_{pro} , E_{el}

Eingesetzt und auf E_{pro} umgeformt ergibt das:

$$E_{pro} = \frac{E_{pri}}{1 - E_{el\%}(1 - KEA)} = 4,48kWh/kg$$

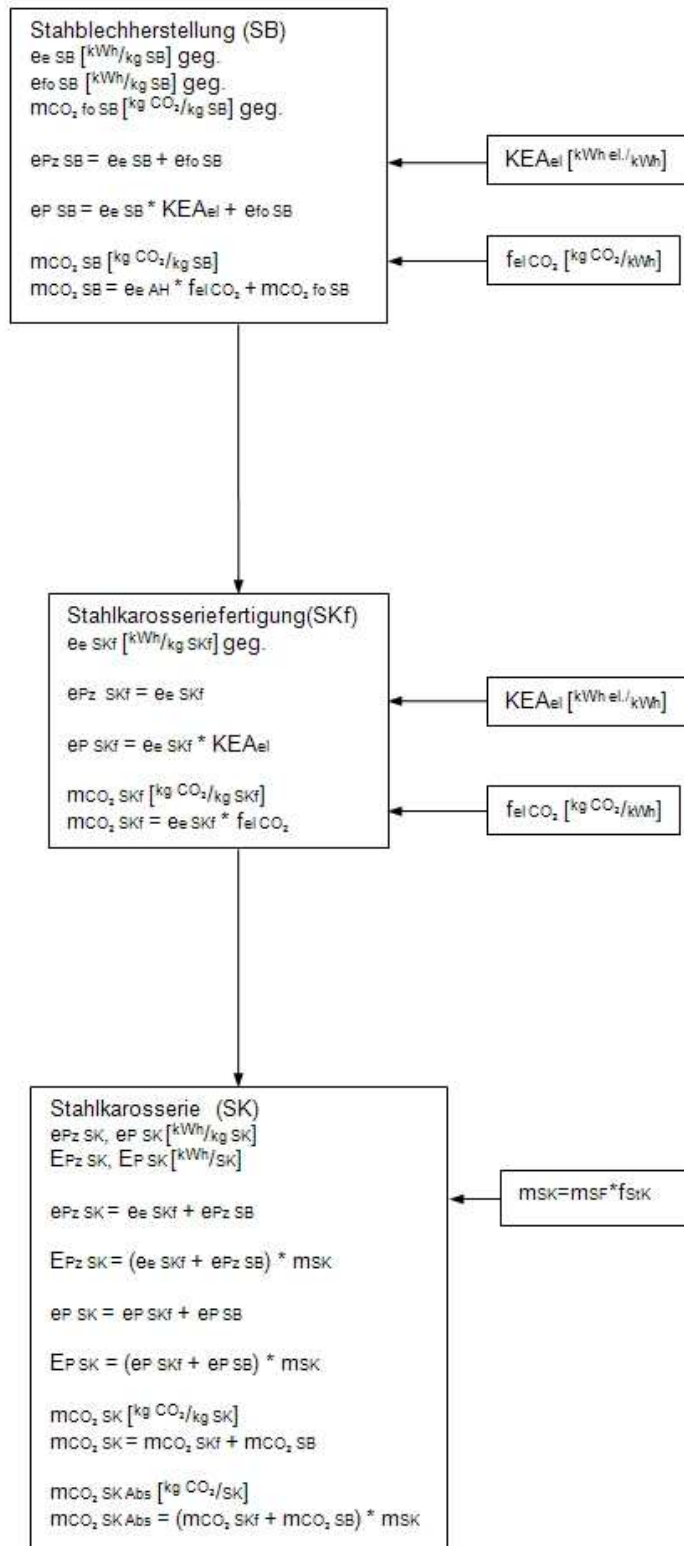
E_{el} errechnet sich durch rückerinsetzen.

$$E_{el} = E_{pro} * E_{el\%} = 0,81 kWh/kg$$

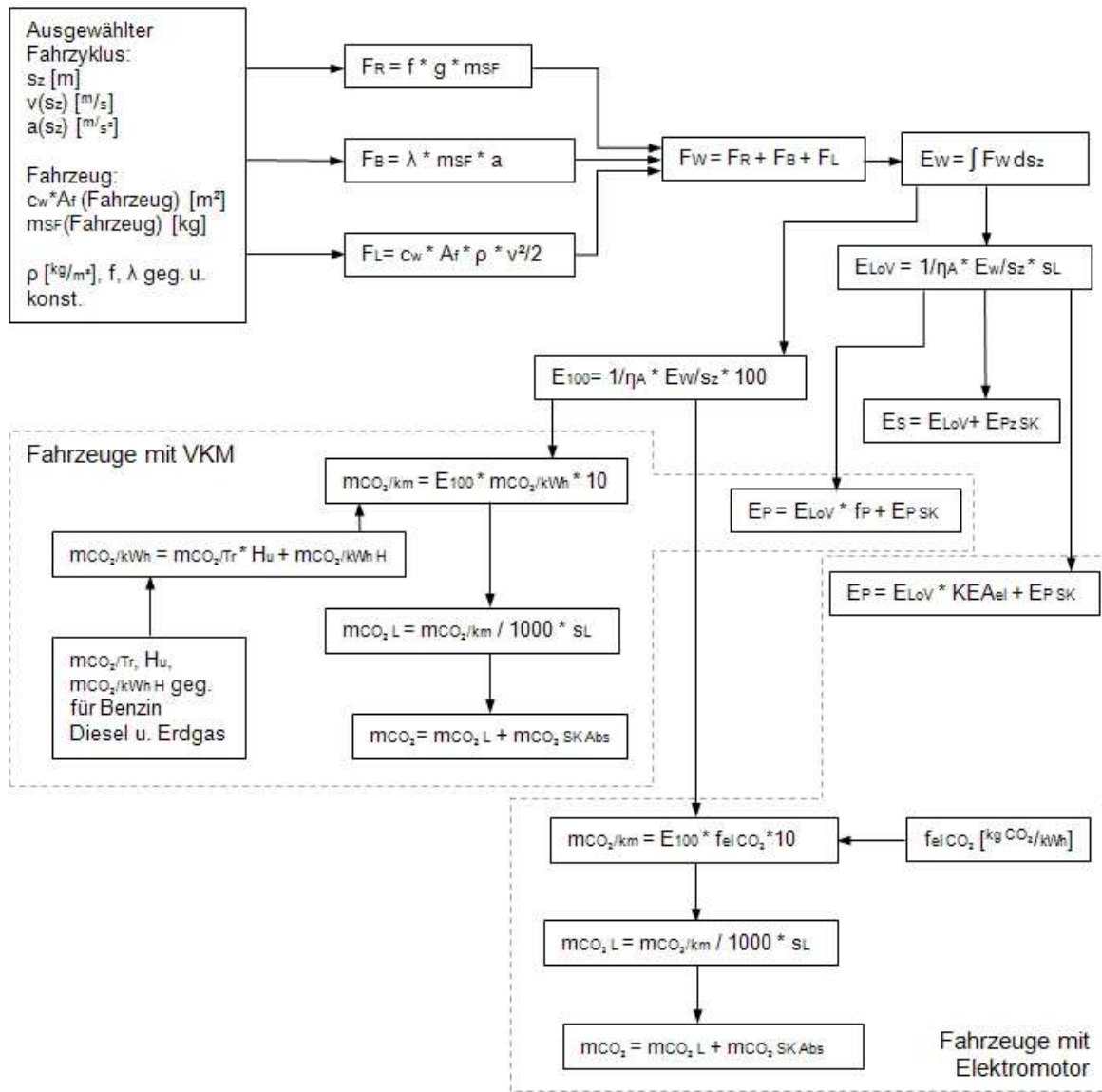
³²² Eigene Darstellung

Anhang C

Berechnungsschema: Stahlkarosserieherstellung



Berechnungsschema: Nutzungsdauer, Fahrzeug mit Stahlkarosserie



Formelzeichen:

$f_{el CO_2}$...Faktor: Kohlendioxidausstoß bezogen auf eine Kilowattstunde elektrischen Stroms. Wert ist Länderspezifisch. [$kg CO_2/kWh$]

KEA_{el} ...kumulierter Energieaufwand: Primärenergieverbrauch bezogen auf eine Kilowattstunde elektrischen Stroms. Wert ist Länderspezifisch. [kWh_{el}/kWh]

Stahlblechherstellung

$e_{e SB}$...elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Stahlblech [$kWh/kg SB$]

$e_{fo SB}$...fossile Energie bezogen auf ein Kilogramm Stahlblech [$kWh/kg SB$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ fo SB}}$...Masse Kohlendioxid aus fossilen Energieträgern bezogen auf ein Kilogramm Stahlblech [$\text{kg CO}_2/\text{kg SB}$]

$e_{\text{Pz SB}}$...Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Stahlblech [$\text{kWh}/\text{kg SB}$]

$e_{\text{P SB}}$...Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Stahlblech [$\text{kWh}/\text{kg SB}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ SB}}$...Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Stahlblech [$\text{kg CO}_2/\text{kg SB}$]

Stahlkarosseriefertigung

$e_{\text{e SKf}}$...elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Karosserie in der Fertigung [$\text{kWh}/\text{kg SKf}$]

$e_{\text{Pz SKf}}$...Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Karosserie in der Fertigung [$\text{kWh}/\text{kg SKf}$]

$e_{\text{P SKf}}$...Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Karosserie in der Fertigung [$\text{kWh}/\text{kg SKf}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ SKf}}$...Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Karosserie in der Fertigung [$\text{kg CO}_2/\text{kg SKf}$]

Stahlkarosserie

m_{SF} ...Masse des Fahrzeuges mit Stahlkarosserie [kg]

f_{StK} ...Faktor: Massen der Stahlkarosserie am Fahrzeug [%]

m_{SK} ...Masse der Stahlkarosserie [kg]

$e_{\text{Pz SK}}$...Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Karosserie [$\text{kWh}/\text{kg SK}$]

$E_{\text{Pz SK}}$...aufsummierte Prozessenergie bezogen auf eine Karosserie [kWh/SK]

$e_{\text{P SK}}$...Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Karosserie [$\text{kWh}/\text{kg SK}$]

$E_{\text{P SK}}$...aufsummierte Primärenergie bezogen auf eine Karosserie [kWh/SK]

$m_{\text{CO}_2 \text{ SK}}$...Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Karosserie [$\text{kg CO}_2/\text{kg SK}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ SK Abs}}$...aufsummierte Masse Kohlendioxid bezogen auf eine Karosserie [$\text{kg CO}_2/\text{SK}$]

Nutzungsdauer Simulation

s_z ...Länge des simulierten Fahrzyklus [m]

$v(s_z)$...Fahrzeuggeschwindigkeit über die Länge des simulierten Fahrzyklus [m/s]

$a(s_z)$...Fahrzeugbeschleunigung über die Länge des simulierten Fahrzyklus [m/s^2]

c_w ...Luftwiderstandsbeiwert

A_f (Fahrzeug)...Projizierte Fahrzeugfläche in Fahrtrichtung [m^2]

m_{SF} ...Masse des Fahrzeuges mit Stahlkarosserie [kg]

ρ ...Dichte der Luft [kg/m^3]

f ...Rollwiderstandsbeiwert

g ...Erdbeschleunigung [m/s^2]

λ ... Drehmassenzuschlag

F_W ... Gesamter Fahrwiderstand [N]

F_R ... Rollwiderstand [N]

F_B ... Beschleunigungswiderstand [N]

F_L ... Luftwiderstand [N]

E_W ... gesamter Energiebedarf über die Länge des simulierten Fahrzyklus [J]

s_L ...Wegstrecke über die Nutzungsdauer [m]

η_A ...Wirkungsgrad des

E_{LoV} ...Energie über die Nutzungsdauer [kWh]

E_{100} ...Energie über 100 Kilometer [$\text{kWh}/100 \text{ km}$]

E_S ... gesamte Energie aus Prozessenergie und Treibstoffenergie ohne Vorkette über den Lebenszyklus [kWh]

Fahrzeuge mit VKM

f_P ... Primärenergiefaktor für Benzin, Diesel und Erdgas [kWh/kWh]

$m_{\text{CO}_2/\text{Tr}}$... CO_2 -Ausstoß pro Kilogramm (Diesel/Benzin) oder pro Kubikmeter (Erdgas) Kraftstoff [kg/m^3], [kg/kg]

H_U ...Spezifischer Heizwert des Kraftstoffes in [kWh/m^3], [kWh/kg]

$m_{\text{CO}_2/\text{kWh H}}$... CO_2 -Ausstoß in der Herstellung des Treibstoffes [$\text{kg CO}_2/\text{kWh}$]

$m_{\text{CO}_2/\text{kWh}}$... gesamter CO_2 -Ausstoß pro Kilometer [$\text{g CO}_2/\text{km}$]

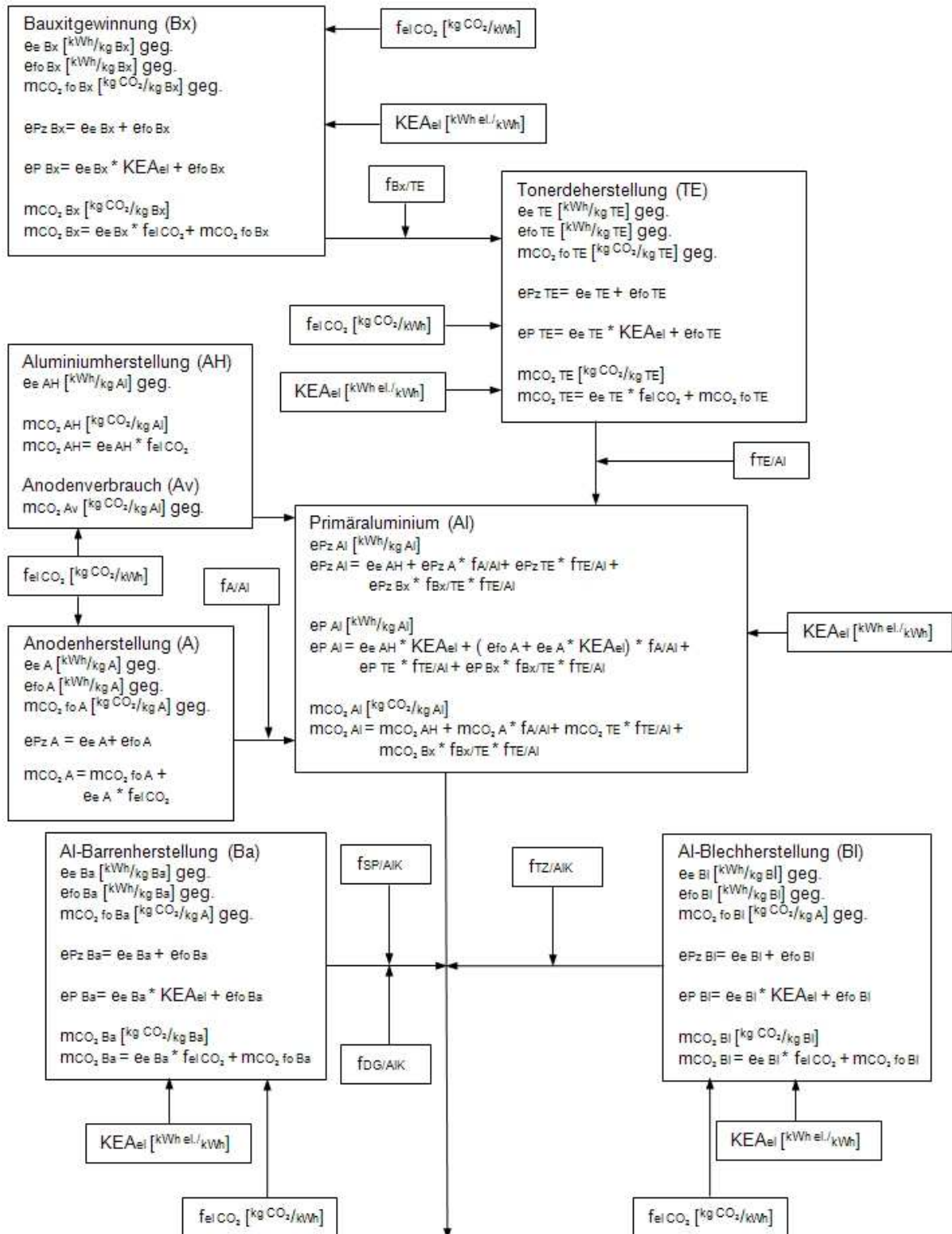
$m_{\text{CO}_2 L}$... gesamter CO_2 -Ausstoß über die Nutzungsdauer [kg CO_2]

m_{CO_2} ... gesamter CO_2 -Ausstoß über den Lebenszyklus [kg CO_2]

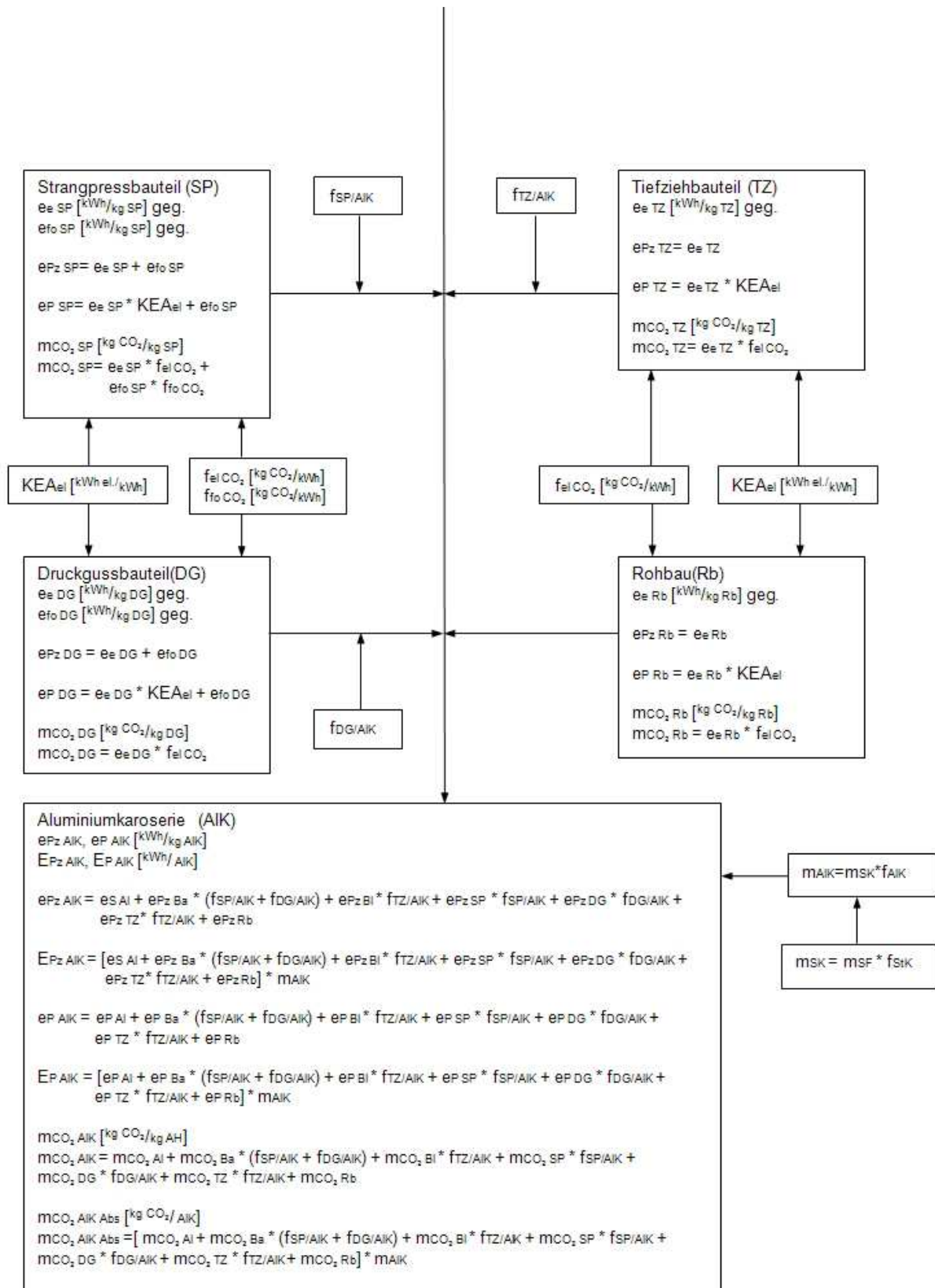
E_P ... gesamter Primärenergie über den Lebenszyklus [kWh]

Anhang D

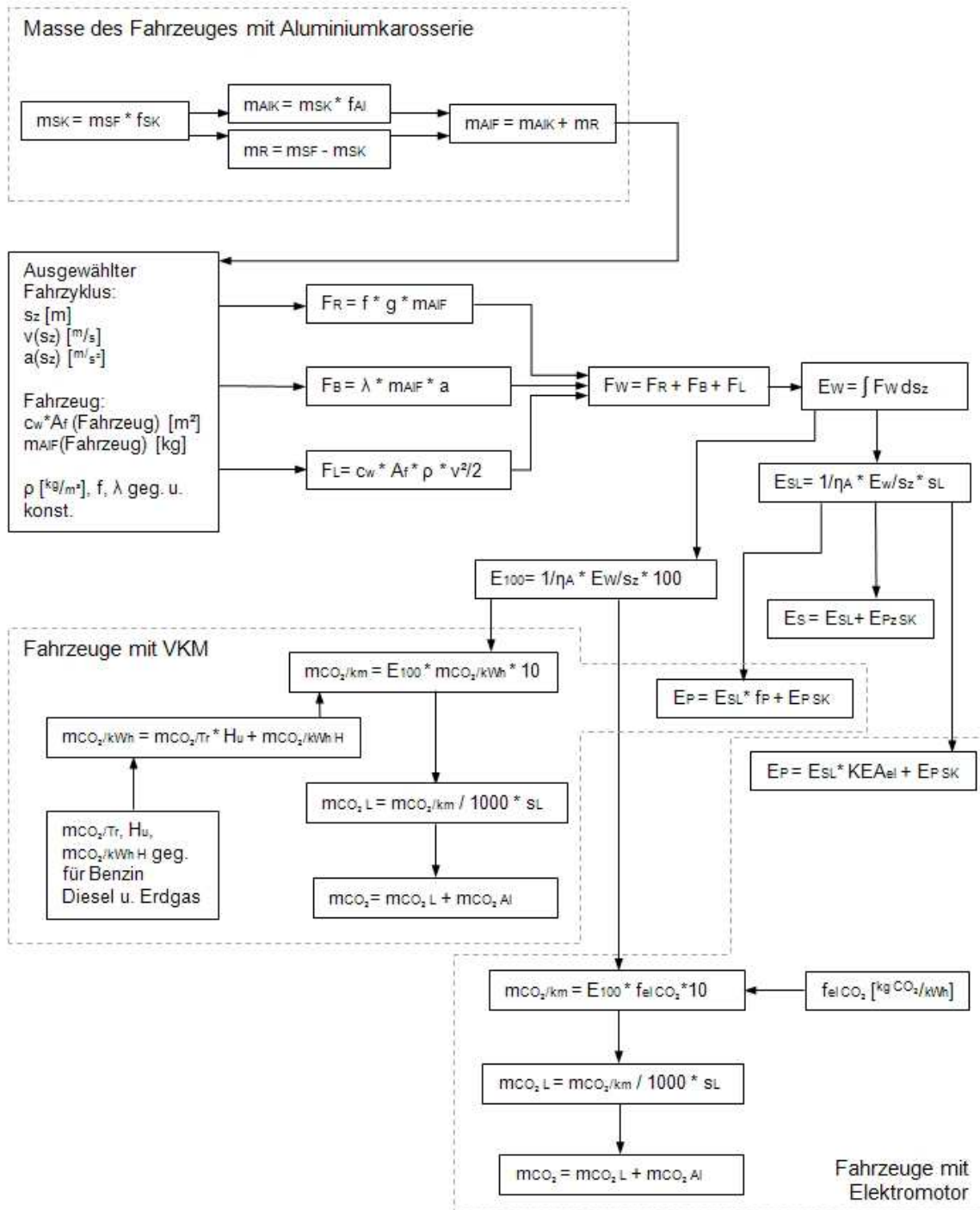
Berechnungsschema: Aluminiumkarosserieherstellung



Fortsetzung des Berechnungsschema: Aluminiumkarosserieherstellung



Berechnungsschema: Nutzungsdauer, Fahrzeug mit Aluminiumkarosserie



Formelzeichen:

$f_{el\ CO_2}$... Faktor: Kohlendioxidausstoß bezogen auf eine Kilowattstunde elektrischen Stroms. Wert ist Länderspezifisch [$kg\ CO_2/kWh$]

KEA_{el} ... kumulierter Energieaufwand: Primärenergieverbrauch bezogen auf eine Kilowattstunde elektrischen Stroms. Wert ist Länderspezifisch [kWh_{el}/kWh]

Bauxitgewinnung

$e_{e\ Bx}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Bauxit [$kWh/kg\ Bx$]

$e_{fo\ Bx}$... fossile Energie bezogen auf ein Kilogramm Bauxit [$kWh/kg\ Bx$]

$e_{Pz\ Bx}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Bauxit [$kWh/kg\ Bx$]

$e_{P\ Bx}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Tonerde [$kWh/kg\ Bx$]

$m_{CO_2\ P\ Bx}$... Masse Kohlendioxid aus fossilen Energieträgern bezogen auf ein Kilogramm Bauxit [$kg\ CO_2/kg\ Bx$]

$f_{Bx/TE}$... Faktor: Kilogramm Bauxit die zur Herstellung eines Kilograms Tonerde benötigt werden [$kg\ Bx/kg\ TE$]

Toneredeherstellung

$e_{e\ TE}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Tonerde [$kWh/kg\ TE$]

$e_{fo\ TE}$... fossile Energie bezogen auf ein Kilogramm Bauxit [$kWh/kg\ TE$]

$e_{Pz\ TE}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Tonerde [$kWh/kg\ TE$]

$e_{P\ TE}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Tonerde [$kWh/kg\ TE$]

$m_{CO_2\ fo\ TE}$... Masse Kohlendioxid aus fossilen Energieträgern bezogen auf ein Kilogramm Tonerde [$kg\ CO_2/kg\ TE$]

$m_{CO_2\ TE}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Tonerde [$kg\ CO_2/kg\ Bx$]

$f_{TE/Al}$... Faktor: Kilogramm Tonerde die zur Herstellung eines Kilograms Aluminium benötigt werden [$kg\ TE/kg\ Al$]

Anodenherstellung

$e_{e\ A}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Anode [$kWh/kg\ A$]

$e_{Pz\ A}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Anode [$kWh/kg\ A$]

$f_{A/Al}$... Faktor: Kilogramm Anode die zur Herstellung eines Kilograms Aluminium benötigt werden [$kg\ A/kg\ Al$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ A}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Anode [$\text{kg CO}_2/\text{kg A}$]

Aluminiumherstellung

$m_{\text{CO}_2 \text{ Av}}$... Masse Kohlendioxid des Anodenverbrauchs bezogen auf ein Kilogramm Aluminium [$\text{kg CO}_2/\text{kg Al}$]

$e_{\text{e AH}}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Aluminium in der Herstellung [$\text{kWh}/\text{kg A}$]

$e_{\text{Pz Al}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Primäraluminium [$\text{kWh}/\text{kg Al}$]

$e_{\text{P Al}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Primäraluminium [$\text{kWh}/\text{kg Al}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ Al}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Primäraluminium [$\text{kg CO}_2/\text{kg Al}$]

Aluminiumbarrenherstellung

$e_{\text{e Ba}}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumbaren [$\text{kWh}/\text{kg Ba}$]

$e_{\text{fo Ba}}$... fossiler Energie bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumbaren [$\text{kWh}/\text{kg Ba}$]

$e_{\text{Pz Ba}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumbaren [$\text{kWh}/\text{kg Ba}$]

$e_{\text{P Ba}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumbaren [$\text{kWh}/\text{kg Ba}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ Ba}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumbaren [$\text{kg CO}_2/\text{kg Ba}$]

Aluminiumblechherstellung

$e_{\text{e Bl}}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumblech [$\text{kWh}/\text{kg Bl}$]

$e_{\text{fo Bl}}$... fossiler Energie bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumblech [$\text{kWh}/\text{kg Bl}$]

$e_{\text{Pz Bl}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumblech [$\text{kWh}/\text{kg Bl}$]

$e_{\text{P Bl}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumblech [$\text{kWh}/\text{kg Bl}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ Ba}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumblech [$\text{kg CO}_2/\text{kg Bl}$]

Strangpressbauteil

$e_{\text{e SP}}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Strangpressbauteil [$\text{kWh}/\text{kg SP}$]

$e_{\text{fo SP}}$... fossiler Energie bezogen auf ein Kilogramm Strangpressbauteil [$\text{kWh}/\text{kg SP}$]

$e_{\text{Pz SP}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Strangpressbauteil [$\text{kWh}/\text{kg SP}$]

$e_{\text{P SP}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Strangpressbauteil [$\text{kWh}/\text{kg SP}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ SP}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Strangpressbauteil [$\text{kg CO}_2/\text{kg SP}$]

Druckgussbauteil

$e_{e\text{ DG}}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Druckgussbauteil [$\text{kWh}/\text{kg DG}$]

$e_{fo\text{ DG}}$... fossiler Energie bezogen auf ein Kilogramm Druckgussbauteil [$\text{kWh}/\text{kg DG}$]

$e_{Pz\text{ DG}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Druckgussbauteil [$\text{kWh}/\text{kg DG}$]

$e_{P\text{ DG}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Druckgussbauteil [$\text{kWh}/\text{kg DG}$]

$m_{\text{CO}_2\text{ DG}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Druckgussbauteil [$\text{kg CO}_2/\text{kg DG}$]

Tiefziehbauteil

$e_{e\text{ TZ}}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Tiefziehbauteil [$\text{kWh}/\text{kg TZ}$]

$e_{Pz\text{ TZ}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Tiefziehbauteil [$\text{kWh}/\text{kg TZ}$]

$e_{P\text{ TZ}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Tiefziehbauteil [$\text{kWh}/\text{kg TZ}$]

$m_{\text{CO}_2\text{ TZ}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Tiefziehbauteil [$\text{kg CO}_2/\text{kg TZ}$]

Rohbau

$e_{e\text{ Rb}}$... elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Rohbau [$\text{kWh}/\text{kg Rb}$]

$e_{Pz\text{ Rb}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Rohbau [$\text{kWh}/\text{kg Rb}$]

$e_{P\text{ Rb}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Rohbau [$\text{kWh}/\text{kg Rb}$]

$m_{\text{CO}_2\text{ Rb}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Rohbau [$\text{kg CO}_2/\text{kg Rb}$]

Aluminiumkarosserie

m_{SF} ...Masse des Fahrzeuges mit Stahlkarosserie [kg]

f_{Stk} ...Faktor: Massen der Stahlkarosserie am Fahrzeug [%]

m_{SK} ...Masse der Stahlkarosserie [kg]

f_{Al} ... Faktor: Massenreduktion gegenüber der Stahlkarosserie [%]

m_{AIK} ... Masse der Aluminiumkarosserie [kg]

$e_{Pz\text{ AIK}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumkarosserie [$\text{kWh}/\text{kg AIK}$]

$e_{P\text{ AIK}}$... Primärenergie bezogen auf ein Aluminiumkarosserie [$\text{kWh}/\text{kg AIK}$]

$E_{Pz\text{ AIK}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Aluminiumkarosserie [kWh/AIK]

$E_{P\text{ AIK}}$... Primärenergie bezogen auf ein Aluminiumkarosserie [kWh/AIK]

$m_{\text{CO}_2\text{ AIK}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Aluminiumkarosserie [$\text{kWh}/\text{kg AIK}$]

Fahrzeugmasse mit Aluminiumkarosserie

m_{SF} ...Masse des Fahrzeuges mit Stahlkarosserie [kg]

f_{StK} ...Faktor: Massen der Stahlkarosserie am Fahrzeug [%]

m_{SK} ...Masse der Stahlkarosserie [kg]

m_R ...Masse der restlichen Baugruppen [kg]

f_{Al} ... Faktor: Massenreduktion gegenüber der Stahlkarosserie [%]

m_{AlK} ... Masse der Aluminiumkarosserie [kg]

m_{AlF} ...Masse des Fahrzeuges mit Aluminiumkarosserie [kg]

Nutzungsdauer Simulation

s_z ...Länge des simulierten Fahrzyklus [m]

$v(s_z)$...Fahrzeuggeschwindigkeit über die Länge des simulierten Fahrzyklus [m/s]

$a(s_z)$...Fahrzeugbeschleunigung über die Länge des simulierten Fahrzyklus [m/s^2]

c_w ...Luftwiderstandsbeiwert

A_f (Fahrzeug)...Projizierte Fahrzeugfläche in Fahrtrichtung [m^2]

ρ ...Dichte der Luft [kg/m^3]

f ...Rollwiderstandsbeiwert

g ...Erdbeschleunigung [m/s^2]

λ ... Drehmassenzuschlag

F_W ... Gesamter Fahrwiderstand [N]

F_R ... Rollwiderstand [N]

F_B ... Beschleunigungswiderstand [N]

F_L ... Luftwiderstand [N]

E_W ... gesamter Energiebedarf über die Länge des simulierten Fahrzyklus [J]

s_L ...Wegstrecke über die Nutzungsdauer [m]

η_A ...Wirkungsgrad des

E_{LoV} ...Energie über die Nutzungsdauer [kWh]

E_{100} ...Energie über 100 Kilometer [$kWh/100\text{ km}$]

E_S ... gesamte Energie aus Prozessenergie und Treibstoffenergie ohne Vorkette über den Lebenszyklus [kWh]

Fahrzeuge mit VKM

f_P ... Primärenergiefaktor für Benzin, Diesel und Erdgas [kWh/kWh]

$m_{\text{CO}_2/\text{Tr}}$... CO_2 -Ausstoß pro Kilogramm (Diesel/Benzin) oder pro Kubikmeter (Erdgas) Kraftstoff [kg/m^3], [kg/kg]

H_U ... Spezifischer Heizwert des Kraftstoffes in [kWh/m^3], [kWh/kg]

$m_{\text{CO}_2/\text{kWh H}}$... CO_2 -Ausstoß in der Herstellung des Treibstoffes [$\text{kg CO}_2/\text{kWh}$]

$m_{\text{CO}_2/\text{kWh}}$... gesamter CO_2 -Ausstoß pro Kilometer [$\text{g CO}_2/\text{km}$]

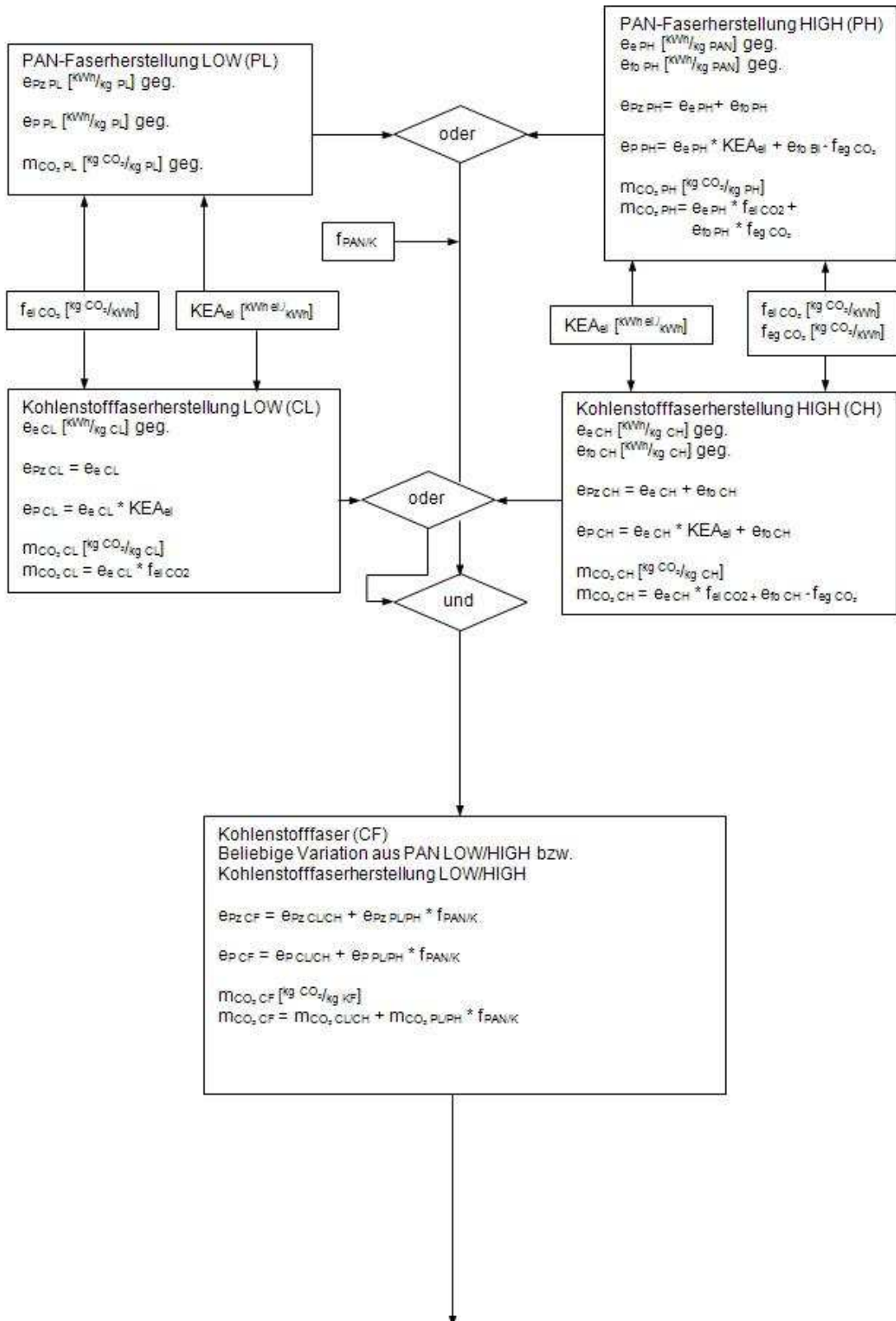
$m_{\text{CO}_2 L}$... gesamter CO_2 -Ausstoß über die Nutzungsdauer [kg CO_2]

m_{CO_2} ... gesamter CO_2 -Ausstoß über den Lebenszyklus [kg CO_2]

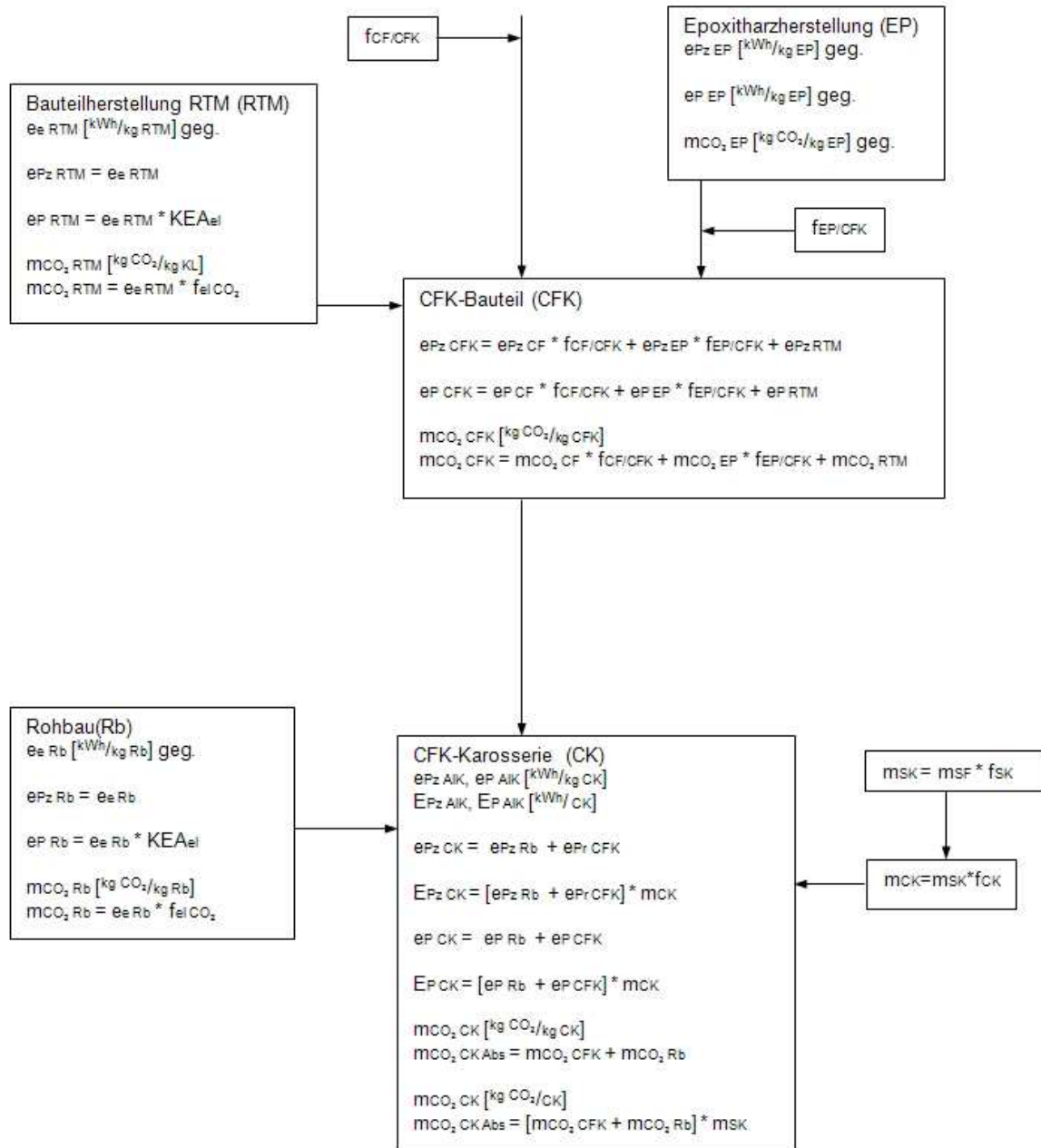
E_P ... gesamter Primärenergie über den Lebenszyklus [kWh]

Anhang E

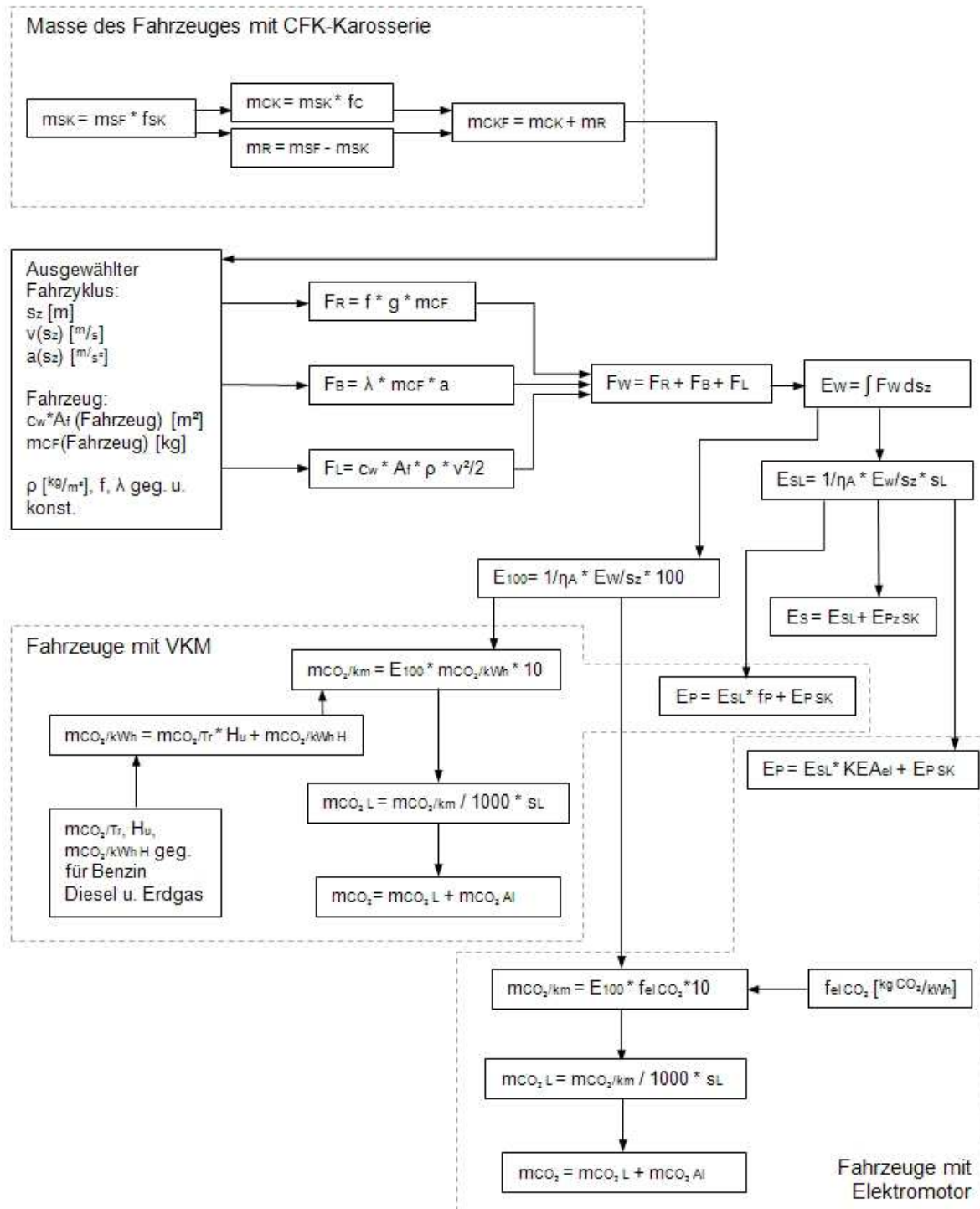
Berechnungsschema: CFK-Karosserieherstellung



Fortsetzung des Berechnungsschema: CFK-Karosserieherstellung



Berechnungsschema: Nutzungsdauer, Fahrzeug mit CFK-Karosserie



Formelzeichen:

$f_{el\ CO_2}$... Faktor: Kohlendioxidausstoß bezogen auf eine Kilowattstunde elektrischen Stroms. Wert ist Länderspezifisch [$kg\ CO_2/kWh$]

KEA_{el} ... kumulierter Energieaufwand: Primärenergieverbrauch bezogen auf eine Kilowattstunde elektrischen Stroms. Wert ist Länderspezifisch [kWh_{el}/kWh]

PAN-Faserherstellung (LOW)

$e_{Pz\ PL}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm PAN-Faser [$kWh/kg\ PL$]

$e_{P\ PL}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm PAN-Faser [$kWh/kg\ PL$]

$m_{CO_2\ PL}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm PAN-Faser [$kg\ CO_2/kg\ PL$]

PAN-Faserherstellung (HIGH)

$e_{e\ PH}$...elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm PAN-Faser [$kWh/kg\ PH$]

$e_{fo\ PH}$... fossile Energie bezogen auf ein Kilogramm PAN-Faser [$kWh/kg\ PH$]

$e_{Pz\ PH}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm PAN-Faser [$kWh/kg\ PH$]

$f_{eg\ CO_2}$... Faktor: Masse Kohlendioxid aus Erdgas PAN-Faser [$kg\ CO_2/kWh$]

$e_{P\ PH}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm PAN-Faser [$kWh/kg\ PH$]

$m_{CO_2\ PH}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm PAN-Faser [$kg\ CO_2/kg\ PH$]

$f_{PAN/K}$... Faktor: Kilogramm PAN-Faser die zur Herstellung eines Kilograms Kohlenstofffaser benötigt werden [$kg\ PL/PH/kg\ CL/CH$]

Kohlenstofffaserherstellung (LOW)

$e_{e\ CL}$...elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$kWh/kg\ CL$]

$e_{Pz\ CL}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$kWh/kg\ CL$]

$e_{P\ CL}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$kWh/kg\ CL$]

$m_{CO_2\ CL}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$kg\ CO_2/kg\ CL$]

Kohlenstofffaserherstellung (HIGH)

$e_{e\ CH}$...elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$kWh/kg\ CH$]

$e_{fo\ CH}$... fossile Energie bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$kWh/kg\ CH$]

$e_{Pz\ CH}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$kWh/kg\ CH$]

$e_{P\ CH}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$kWh/kg\ CH$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ CH}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$\text{kg CO}_2/\text{kg CH}$]

Kohlenstofffaser (CF): Beliebige Variation aus PAN LOW/HIGH bzw. Kohlenstofffaserherstellung LOW/HIGH

$e_{\text{PZ CF}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$\text{kWh}/\text{kg CF}$]

$e_{\text{P CF}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$\text{kWh}/\text{kg CF}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ CF}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Kohlenstofffaser [$\text{kg CO}_2/\text{kg CF}$]

Epoxidharzherstellung

$e_{\text{PZ EP}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Epoxidharz [$\text{kWh}/\text{kg EP}$]

$e_{\text{P EP}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Epoxidharz [$\text{kWh}/\text{kg EP}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ EP}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Epoxidharz [$\text{kg CO}_2/\text{kg EP}$]

Bauteilherstellung RTM

$e_{\text{e RTM}}$...elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm Bauteil [$\text{kWh}/\text{kg RTM}$]

$e_{\text{PZ RTM}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm Bauteil [$\text{kWh}/\text{kg RTM}$]

$e_{\text{P RTM}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm Bauteil [$\text{kWh}/\text{kg RTM}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ RTM}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm Bauteil [$\text{kg CO}_2/\text{kg RTM}$]

$f_{\text{CF/CFK}}$... Faktor: Kilogramm Kohlenstofffaser die zur Herstellung eines Kilograms CFK-Bauteils benötigt werden [$\text{kg CF}/\text{kg CFK}$]

$f_{\text{EP/CFK}}$... Faktor: Kilogramm Epoxidharz die zur Herstellung eines Kilograms CFK-Bauteils benötigt werden [$\text{kg EP}/\text{kg CFK}$]

CFK-Bauteil

$e_{\text{PZ CFK}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm CFK-Bauteil [$\text{kWh}/\text{kg CFK}$]

$e_{\text{P CFK}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm CFK-Bauteil [$\text{kWh}/\text{kg CFK}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ CFK}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm CFK-Bauteil [$\text{kg CO}_2/\text{kg CFK}$]

Rohbau

$e_{\text{e Rb}}$...elektrische Energie bezogen auf ein Kilogramm CFK-Bauteil [$\text{kWh}/\text{kg Rb}$]

$e_{\text{PZ Rb}}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm CFK-Bauteil [$\text{kWh}/\text{kg Rb}$]

$e_{\text{P Rb}}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm CFK-Bauteil [$\text{kWh}/\text{kg Rb}$]

$m_{\text{CO}_2 \text{ Rb}}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm CFK-Bauteil [$\text{kg CO}_2/\text{kg Rb}$]

CFK-Karosserie

m_{SF} ...Masse des Fahrzeuges mit Stahlkarosserie [kg]

f_{Stk} ...Faktor: Massen der Stahlkarosserie am Fahrzeug [%]

m_{SK} ...Masse der Stahlkarosserie [kg]

f_{CK} ... Faktor: Massenreduktion gegenüber der Stahlkarosserie [%]

m_{CK} ... Masse der CFK-Karosserie [kg]

$e_{Pz\ AIK}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm CFK-Karosserie [$^{kWh}/kg\ CK$]

$E_{Pz\ AIK}$... Prozessenergie bezogen auf ein Kilogramm CFK-Karosserie [$^{kWh}/CK$]

$e_{P\ AIK}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm CFK-Karosserie [$^{kWh}/kg\ CK$]

$E_{P\ AIK}$... Primärenergie bezogen auf ein Kilogramm CFK-Karosserie [$^{kWh}/CK$]

$m_{CO_2\ CK}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm CFK-Karosserie [$^{kg\ CO_2}/kg\ CK$]

$m_{CO_2\ CK}$... Masse Kohlendioxid bezogen auf ein Kilogramm CFK-Karosserie [$^{kg\ CO_2}/CK$]

Fahrzeugmasse mit CFK-Karosserie

m_{SF} ...Masse des Fahrzeuges mit Stahlkarosserie [kg]

f_{Stk} ...Faktor: Massen der Stahlkarosserie am Fahrzeug [%]

m_{SK} ...Masse der Stahlkarosserie [kg]

m_R ...Masse der restlichen Baugruppen [kg]

f_{CK} ... Faktor: Massenreduktion gegenüber der Stahlkarosserie [%]

m_{CK} ... Masse der CFK-Karosserie [kg]

m_{CKF} ...Masse des Fahrzeuges mit CFK-Karosserie [kg]

Nutzungsdauer Simulation

s_z ...Länge des simulierten Fahrzyklus [m]

$v(s_z)$...Fahrzeuggeschwindigkeit über die Länge des simulierten Fahrzyklus [$^m/s$]

$a(s_z)$...Fahrzeugbeschleunigung über die Länge des simulierten Fahrzyklus [$^{m/s^2}$]

c_w ...Luftwiderstandsbeiwert

A_f (Fahrzeug)...Projizierte Fahrzeugfläche in Fahrtrichtung [m^2]

ρ ...Dichte der Luft [$^{kg}/m^3$]

f ...Rollwiderstandsbeiwert

g ... Erdbeschleunigung [m/s^2]

λ ... Drehmassenzuschlag

F_W ... Gesamter Fahrwiderstand [N]

F_R ... Rollwiderstand [N]

F_B ... Beschleunigungswiderstand [N]

F_L ... Luftwiderstand [N]

E_W ... gesamter Energiebedarf über die Länge des simulierten Fahrzyklus [J]

s_L ... Wegstrecke über die Nutzungsdauer [m]

η_A ... Wirkungsgrad des

E_{LoV} ... Energie über die Nutzungsdauer [kWh]

E_{100} ... Energie über 100 Kilometer [$\text{kWh}/100 \text{ km}$]

E_S ... gesamte Energie aus Prozessenergie und Treibstoffenergie ohne Vorkette über den Lebenszyklus [kWh]

Fahrzeuge mit VKM

f_P ... Primärenergiefaktor für Benzin, Diesel und Erdgas [kWh/kWh]

$m_{\text{CO}_2/\text{Tr}}$... CO_2 -Ausstoß pro Kilogramm (Diesel/Benzin) oder pro Kubikmeter (Erdgas) Kraftstoff [kg/m^3], [kg/kg]

H_U ... Spezifischer Heizwert des Kraftstoffes in [kWh/m^3], [kWh/kg]

$m_{\text{CO}_2/\text{kWh H}}$... CO_2 -Ausstoß in der Herstellung des Treibstoffes [$\text{kg CO}_2/\text{kWh}$]

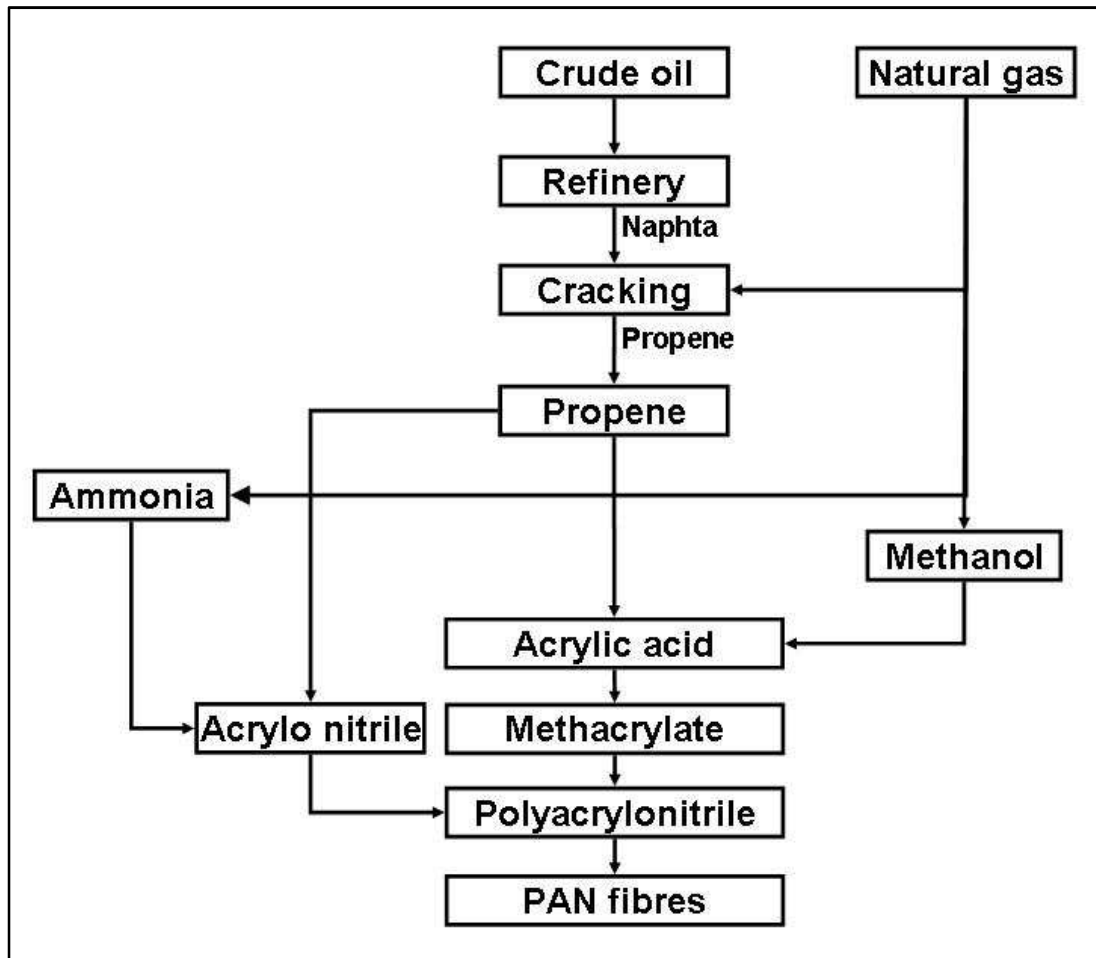
$m_{\text{CO}_2/\text{kWh}}$... gesamter CO_2 -Ausstoß pro Kilometer [$\text{g CO}_2/\text{km}$]

$m_{\text{CO}_2 L}$... gesamter CO_2 -Ausstoß über die Nutzungsdauer [kg CO_2]

m_{CO_2} ... gesamter CO_2 -Ausstoß über den Lebenszyklus [kg CO_2]

E_P ... gesamter Primärenergie über den Lebenszyklus [kWh]

Anhang F

Abbildung 70: Prozesse und Zwischenprodukte der PAN-Faserherstellung³²³

³²³ PE International AG (2014)

Anhang G

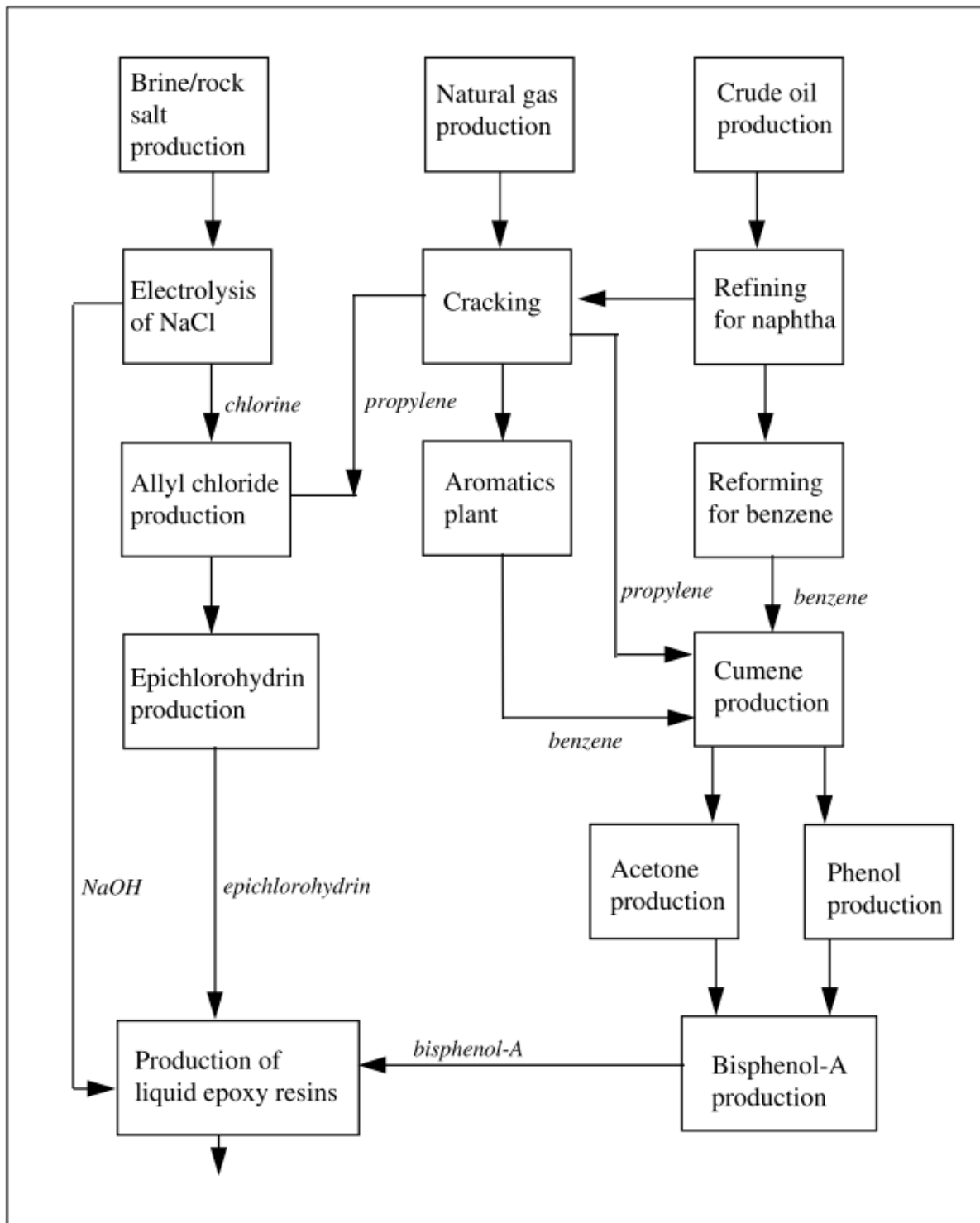


Abbildung 71: Gliederung der Prozessschritte die erforderlich sind um flüssige Epoxidharze aus Rohstoffen herzustellen³²⁴

³²⁴ Boustead (2005), S. 7

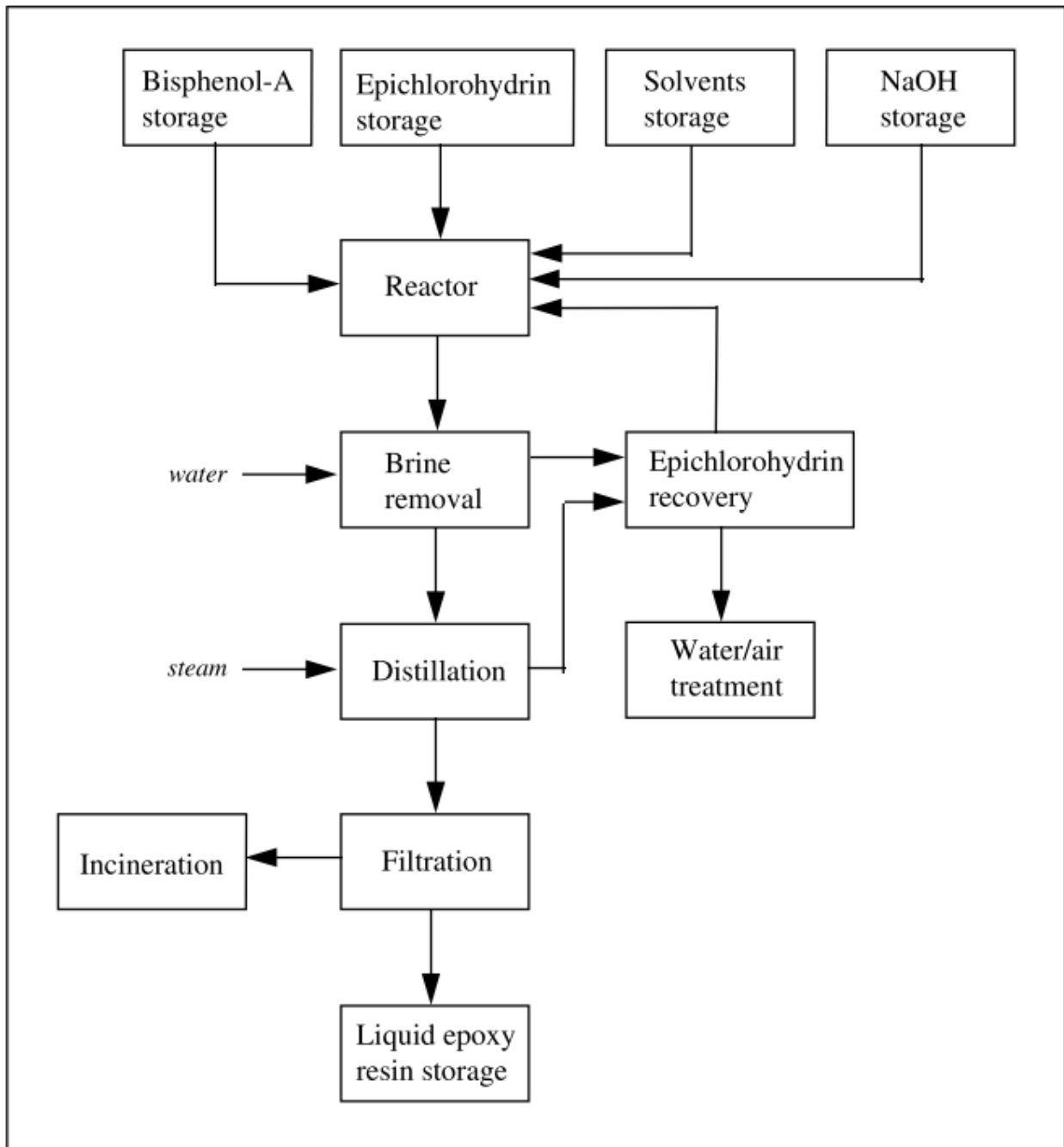


Abbildung 72: Gliederung des Epoxidharzherstellungsprozesses aus Zwischenprodukten³²⁵

³²⁵ Boustead (2005), S. 8

Anhang H

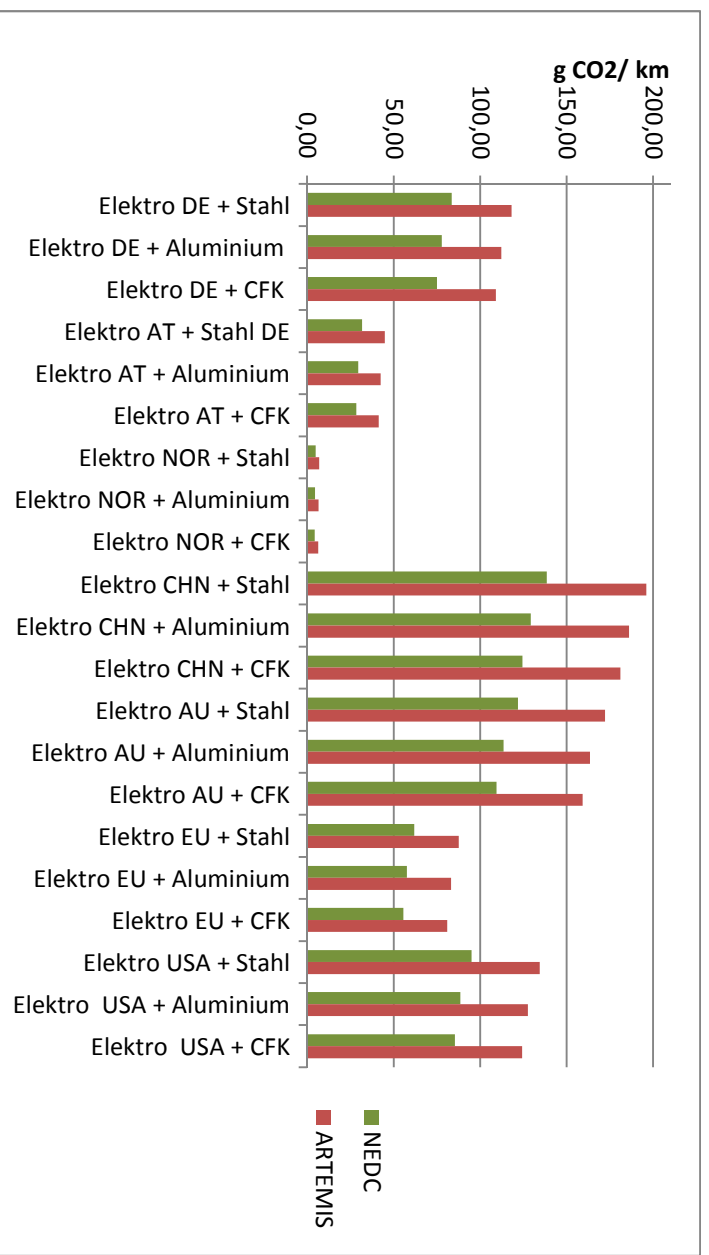


Abbildung 73: CO₂-Ausstoß in den Fahrzyklen NEDC und ARTEMIS für alle Elektrofahrzeug-Karosserie-Kombinationen in allen untersuchten Ländern