

Philipp Maurer

# Life Cycle-Analyse von Antriebsstrangkomponenten für den Verkehrssektor

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Titels Diplomingenieur

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Betreuer:

Hirz, Mario, Dipl.-Ing. Dr.techn. Univ.-Doz., Institut für Fahrzeugtechnik

Brunner, Helmut, Dipl.-Ing., Institut für Fahrzeugtechnik

Graz, 2013

**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 entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

(Unterschrift)

**STATUTORY DECLARATION**

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.

.....

date

.....

(signature)

## Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Analyse verschiedener Antriebsstrangkonzeppte von Personenkraftwagen hinsichtlich ihres Energieaufwandes und den anfallenden Treibhausgasemissionen sowohl in der Herstellung als auch während des Betriebes. Diese Analyse orientiert sich in ihrer Struktur an der Methode des Life-Cycle Assessments (LCA), deren Erläuterung auch das erste Kapitel umfasst.

Um eine Übersicht der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten von Hybridantriebskonzepten zu erhalten, werden die möglichen Antriebstopologien anhand von Kriterien wie der Leistung des Elektromotors oder des Aufbaus des Hybridkonzeptes strukturiert. Dies ermöglicht in der Phase der Datenauswertung rasche Orientierung und schafft Trennung zwischen den behandelten Konzepten.

Am Beginn der Datenerfassung steht die Energiegewinnung, da sie Einfluss auf alle folgenden Schritte nimmt. Daher werden verschiedene Energieträger beschrieben und ihre Umweltauswirkungen, insbesondere die Treibhausgasemissionen, ermittelt. Es werden die Emissionen der Energieumwandlung in elektrischen Strom anhand der eingesetzten Energieträger diverser Länder festgesetzt. Dabei werden Länder verwendet, die einerseits führende Rollen in der Produktion von im Automobilbau verwendeten Werkstoffen oder Bauteilen innehaben, andererseits wird versucht, das Spektrum an freigesetzten Treibhausgasemissionen adäquat darzustellen.

Als nächster Schritt werden die zuvor ausgewählten Umwelteinflüsse der Werkstoffindustrie ermittelt. Die klassischen Materialien des Automobilbaus – Stahl, Eisen, Aluminium, Kupfer – sind ebenso Teil der Betrachtung wie Lithium für Akkumulatoren und Edelmetalle, die in der Abgasnachbehandlung eingesetzt werden.

Darauf folgend werden Antriebskomponenten wie Motoren, Getriebe und Energiespeicher auf die in ihnen verwendeten Materialien untersucht sowie der Aufwand der Produktion ermittelt. Dies ebnet den Weg für die nachfolgende Analyse der Betriebsphase hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen. Dazu wird anhand einer Fahrwiderstandssimulation der ideale Energieverbrauch in genormten Testzyklen ermittelt, welcher sich mit in Wirkungsgraden aus der Fachliteratur in einen Realverbrauch umrechnen lässt. Das abschließende Kapitel kombiniert die Produktionsphase mit der Betriebsphase und liefert zusammengesetzte Werte für Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen. Dabei werden Nutzungsunterschiede, Materialherkunft (Recycling) und die Verteilung der Energieträger im verwendeten Strommix berücksichtigt.

## Abstract

This thesis deals with analysis of various concepts of drivetrains in passenger cars regarding the energy demand and emission of greenhouse gases both in the production phase as in the use phase. The analysis is based on the method of Life Cycle Assessment, whose explanation is contained in the first chapter.

To give an overview of the numerous variants of hybrid drivetrains, a structure is built regarding the power of the electric motor and the implementation of the electric part of the drivetrain.

Data acquisition starts with energy conversion, for it influences all further steps. Therefore, energy sources are described and their environmental impact, particularly the greenhouse gas emissions, is determined. The emissions of energy conversion are identified alongside the use of energy carriers of various countries. Therein, countries are used that have significance in automotive (material) production and that give an overview of the bandwidth of greenhouse gas emissions.

The next step is determining the previously selected environmental impacts of the material industry. The long-approved materials of automotive engineering, i.e. steel, copper, aluminium, are as much part of the scope as are materials like lithium for batteries and noble metals for exhaust after-treatment.

Components of the drivetrain are inspected regarding the materials used within them as well as the energy demand for their production. This paves the way for the following analysis of the use phase regarding its environmental effects. A simulation of driving resistances is used to determine the optimal energy consumption in pre-set drive cycles. Real energy demand is calculated with efficiency factors from literature. The final chapter combines production and use phase and presents combined values of energy consumption and greenhouse gas emissions. For that, differences in use, material production (recycling) and the distribution of energy carriers in the used energy mix are considered.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ziele.....	1
1.2	Vorgehensweise.....	1
2	Bedeutung der Life-Cycle Analyse.....	3
2.1	Geschichtliche Entwicklung.....	3
2.2	Begriffsdefinitionen.....	5
2.3	Struktur der Ökobilanz.....	7
2.3.1	Struktur nach SETAC.....	7
2.3.2	Struktur nach ISO.....	7
2.4	Beschreibung der Phasen.....	9
2.4.1	Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens.....	9
2.4.2	Sachbilanz.....	10
2.4.3	Wirkungsabschätzung.....	11
2.4.4	Auswertung.....	13
3	Antriebskonzepte.....	15
3.1	Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen.....	15
3.2	Hybridfahrzeuge.....	16
3.2.1	Unterteilung nach Leistungsfähigkeit des Elektromotors.....	17
3.2.2	Unterteilung nach Bauweise.....	18
3.3	Elektrofahrzeug.....	20
4	Energiebedarf und Treibhausgasemission.....	21
4.1	Verwendung fossiler Energieträger.....	22
4.1.1	Erdöl.....	22
4.1.2	Erdgas.....	22
4.1.3	Strom.....	22
5	Rohstoffgewinnung.....	25
5.1	Stahl.....	25
5.1.1	Primärstahl.....	25
5.1.2	Sekundärstahl.....	28
5.2	Aluminium.....	30
5.2.1	Primäres Aluminium.....	30
5.2.2	Sekundäraluminium.....	35
5.3	Kupfer.....	37

5.3.1	Primärkupfer .....	37
5.3.2	Sekundärkupfer.....	39
5.4	Edelmetalle.....	41
5.4.1	Gewinnung.....	41
5.4.2	Platin.....	41
5.4.3	Rhodium .....	43
5.5	Lithiumoxide .....	44
5.6	Zusammenfassung.....	47
6	Umweltauswirkungen verschiedener Fertigungsprozesse.....	49
6.1	Gießen.....	49
6.2	Schmieden .....	50
7	Komponenten .....	51
7.1	Verbrennungsmotoren.....	52
7.1.1	Gewicht.....	52
7.1.2	Materialbeschaffenheit.....	54
7.1.3	Energieverbrauch und Emissionen für die Produktion .....	55
7.2	Getriebe.....	59
7.2.1	Gewicht.....	59
7.2.2	Materialbeschaffenheit.....	60
7.2.3	Energieaufwand und Emissionen für die Produktion.....	61
7.3	Energiespeicher .....	66
7.3.1	Aufbau und Funktionsweise der Li-Ion-Traktionsbatterie .....	66
7.3.2	Energieaufwand und Emissionen für die Produktion.....	67
7.3.3	Zusammenfassung .....	71
7.4	Elektromotoren .....	72
7.4.1	Materialbeschaffenheit.....	72
7.4.2	Energieaufwand und Emissionen der Produktion .....	74
7.5	Druckbehälter.....	75
7.5.1	Stahl tanks .....	75
7.5.2	Tanks aus CFK .....	77
7.6	Abgasnachbehandlung.....	79
7.6.1	Drei-Wege-Katalysator.....	80
7.6.2	Dieselpartikelfilter.....	82
8	Betrieb.....	83
8.1	Fahrzyklen.....	83
8.1.1	<i>New European Driving Cycle (NEDC)</i> .....	83

8.1.2	Artemis-Zyklus (CADC).....	84
8.2	Simulation des Fahrbetriebes.....	85
8.2.1	Vorgehensweise der Simulation.....	85
8.2.2	Berechnung des realen Verbrauchs für verschiedene Antriebskonzepte.. .....	86
8.2.3	Weitere Parameter.....	92
9	Analyse mehrerer Konzepte und Vergleich.....	93
9.1	Betrachtung der Einzelfahrzeuge.....	93
9.2	Vergleichende Betrachtung.....	104
10	Conclusio.....	114
11	Literaturverzeichnis.....	i
12	Abbildungsverzeichnis.....	x
13	Tabellenverzeichnis.....	xii
14	Formelverzeichnis.....	xvi
15	Anhang.....	xvii
15.1	Berechnung des Produktionsaufwands des Motors.....	xvii
15.2	Produktionsaufwand Getriebe.....	xx
15.3	Berechnung des Stahl tanks.....	xxii

# 1 Einleitung

## 1.1 Ziele

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Umweltauswirkungen verschiedener Antriebsstrangvarianten von Personenkraftwagen zu erfassen. Dabei sollen Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen, insbesondere Kohlendioxid, analysiert werden. Eine Betrachtung der Rohstoffgewinnung ist dazu ebenso vonnöten wie die Analyse der Einzelkomponenten. Die darauf folgende Simulation des Fahrbetriebs liefert die Grundlage zur Erarbeitung der Umweltauswirkungen während der Verwendung des Fahrzeugs.

Es sollen Energieaufwand und Treibhausgasemissionen verschiedener Antriebsstrangkonzeppte untersucht werden. Dies betrifft die Fertigung und den Betrieb im KFZ. Dazu wird auch die Vorkette der verwendeten Rohstoffe – Abbau, Gewinnung, Bereitstellung – ebenfalls miteinbezogen. Dabei sollen die betrachteten Einzelkomponenten verschiedener Antriebsstrangtopologien in Bezug auf die Verteilung der verwendeten Materialien analysiert werden, um auf Werte für die Materialgewinnung rückrechnen zu können.

## 1.2 Vorgehensweise

Als Zwischenziel soll am Ende der Komponentenherstellung eine „Cradle-to-Gate“ Analyse erhalten werden. Diese analysiert den Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen von der Rohstoffgewinnung bis zum fertigen Produkt; also bis zum Verlassen des Werksgeländes. Dazu werden zuerst die an Rohstoffabbau und -gewinnung beteiligten Länder in Hinblick auf die Stromerzeugung betrachtet. Die jeweiligen verwendeten Energieträger werden im Strommix des Landes abgebildet und geben Rückschluss auf die bei der Erzeugung elektrischer Energie anfallenden Emissionen. Am Beispiel Österreich wird zuvor durch den Vergleich mit offiziellen Angaben die Verwendung einer Software zur Erstellung von Ökobilanzen gerechtfertigt.

Anschließend wird die Gewinnung und Produktion von technischen Werkstoffen analysiert. Dabei werden die häufigsten Werkstoffe berücksichtigt, ebenso wie solche, die trotz ihrer geringen benötigten Menge signifikanten Herstellungsaufwand besitzen. Um Recycling in diesen Abschnitt zu inkludieren, wird die Gewinnung aus Erzen, die sogenannte Primärgewinnung, ebenso untersucht wie die Erzeugung sekundärer Rohstoffe rein aus Schrott. Die Art und Menge der benötigten Energie dient als Grundlage zur Ermittlung der anfallenden Emissionen.

Folgend wird die Fertigung der Elemente des konventionellen Antriebsstrangs mit Verbrennungskraftmaschine in Hinsicht auf Energieaufwand und Emissionen bei deren Herstellung betrachtet, anschließend die zusätzlichen Hauptelemente innovativer Antriebe wie Elektromotoren, Batterien und Druckgasspeicher. Dies geschieht im Baukastenprinzip, d.h. es werden die Komponenten für sich bewertet und dann zu den gewünschten Konzepten zusammengefasst.

Die Vorgehensweise dazu fußt auf der Erlangung von Werten der Energieverbräuche und Schadstoffausstöße diverser Prozesse, von der Stromerzeugung bis zu Fertigungsschritten wie z.B. Edelmetallabbau, mechanische Bearbeitung oder Sintern von Keramikträgern für Katalysatoren. Dabei werden zur Unterstützung der recherchierten Werte Programme zur Berechnung von Ökobilanzen herangezogen. Als freie Variante soll das GEMIS- Programm (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) des internationalen Instituts für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien erwähnt werden [1]. Ein zweites verwendetes Programm für das gleiche Einsatzgebiet ist GaBi, das als Educational Version ebenfalls frei zu beziehen war [2]. Die Ecoinvent-Datenbank des Swiss Centre for Life Cycle Inventories [3] liefert ebenfalls Ökobilanzdaten, kommt im Rahmen dieser Arbeit aber nur als Metareferenz vor, wenn sich verwendete Quellen darauf beziehen.

Um eine Bilanz über die Nutzungsdauer ziehen zu können, werden der Energiebedarf und die resultierenden Treibhausgasemissionen während des Betriebs der Komponenten analysiert. Dafür werden mehrere Szenarien erstellt, die, je nach Art der Nutzung und des Fahrzeuges, den Energiekonsum und die Treibhausgasemissionen über eine festgelegte Lebensdauer ausdrücken können. Zusätzlich wird mit einer Fahrwiderstandssimulation in Matlab [4] der Verbrauch errechnet. Abschließend werden die gesamten erhaltenen Daten zusammengefasst, um Produktion und Betrieb der Fahrzeugkonfigurationen gemeinsam abzubilden.

## 2 Bedeutung der Life-Cycle Analyse

Jedes Produkt - seien es beispielsweise landwirtschaftliche Güter, Konsumgüter oder im weiteren Sinn auch Dienstleistungen - durchläuft auf dem Weg zum fertigen Produkt mehrere Herstellungs- und Verarbeitungsschritte. Um diese Schritte in Bezug auf ihre Umwelteinflüsse gewichten zu können und gegebenenfalls mit anderen Abfolgen von Schritten, die zum gleichen Produkt führen, zu vergleichen, ist es notwendig, diese Prozessmodule zu analysieren. Um diese Analysen zu vereinheitlichen, entwickelte sich, angefangen in den 1970er Jahren, eine Methode, die diesen Bewertungen einen normierten Rahmen bietet.

Die Ökobilanz, englisch Life Cycle Assessment, ist eine standardisierte Methode zur Analyse von Umwelteinflüssen und –aspekten von Produktsystemen. Als solches bezeichnet man die miteinander verbundenen Module eines Prozesses (Verweis Abbildung 2.1), auch als Lebensweg oder Produktbaum benannt [5].

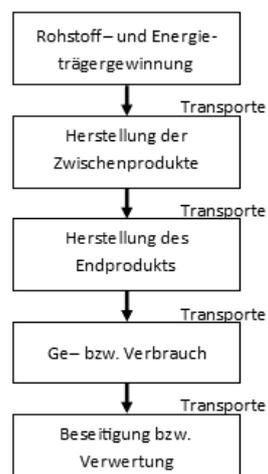


Abbildung 2.1: Stark vereinfachter Lebensweg eines (materiellen) Produkts

### 2.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Ökobilanz ist eine relativ junge Methode. Die ersten Ansätze finden sich um 1880 in Schottland, wo ein bilanzähnliches Verfahren entwickelt wurde, dessen Hauptaugenmerk auf der Versorgung mit Energie, insbesondere der Steinkohle lag.

Um 1970 begann das Midwest Research Institute in Kansas City (MO, USA) damit, Vorläufer der heute unter Ökobilanz bekannten Methode durchzuführen. Die damalige Bezeichnung lautete „Resource and Environmental Profile Analysis“ (REPA). Diese Studien befassten sich mit dem Ressourcenverbrauch und Emissionen und ließen Wirkungsabschätzung und Optimierungspotential außer Acht [6].

Weitere, als „proto-LCAs“ benannte Vorgänger kamen aus Großbritannien, Deutschland, Schweden und der Schweiz, wobei des Öfteren und aufeinander aufbauend auf Getränkeverpackungen eingegangen wurde. In den 1980er Jahren entwickelte das Öko-Institut Freiburg die Produktlinienanalyse, die über den Rahmen der LCA hinausgeht, da zusätzlich eine Untersuchung des Bedarfs vorangestellt wird und die LCA mit Analysen der ökonomischen und sozialen Aspekte ergänzt wird [6].

Als Namensspender und Strukturgeber der heutigen LCA gilt die *Society for Environmental Technology and Chemistry* (SETAC), die 1990 das LCA-Dreieck konzipierte (siehe Abbildung 2.4).

## 2.2 Begriffsdefinitionen

Die hier angeführten Begriffsdefinitionen dienen zum besseren Verständnis der Arbeit und wurden aus den ISO Normen 14040 [5] und 14044 [7] entnommen.

### *Produkt*

Jede Ware oder Dienstleistung.

### *Prozessmodul*

Kleinster in der Sachbilanz berücksichtigter Bestandteil, für den Input- und Outputdaten quantifiziert wurden.

### *Koppelprodukt*

Eines von zwei oder mehreren Produkten aus demselben Prozessmodul oder Produktsystem.

### *Produktsystem*

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

Das untersuchte Produktsystem, oder im Fall von vergleichenden Ökobilanzen die beteiligten Systeme, müssen eindeutig beschrieben werden. Durch die Übersichtlichkeit und einfache Darstellungsmöglichkeit hat sich zur Illustration das Systemfließbild eingebürgert, wie in Abbildung 2.2 zur Veranschaulichung gezeigt wird. Darin werden die einzelnen Prozessmodule und ihre Beziehungen zueinander abgebildet. Um Komplexität zu reduzieren, soll das System möglichst linear definiert werden. Verzweigungen bei mehreren Inputs für ein folgendes Modul oder bei mehreren Ausgangsmodulen (z.B. bei Recycling-Prozessen) kommen natürlich vor, allerdings sollen Vernetzungen vermieden werden. In der Abfallbehandlung wird das dadurch erreicht, dass die Systemgrenze in einer Weise gesetzt wird, in der Verzweigungen und Koppelprodukte außerhalb des Systems liegen.

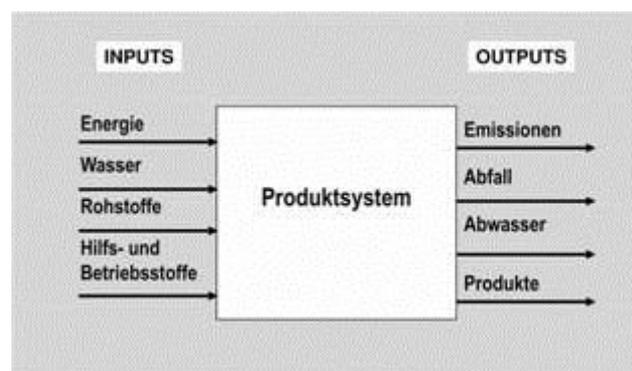


Abbildung 2.2: Stoff- und Energieflüsse eines Produktsystems

### *Systemgrenze*

Ein Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind.

Das Festlegen der Systemgrenze wird als der wichtigste Schritt der Ökobilanz betrachtet. Sie legt fest, welche Prozessmodule in der Ökobilanz enthalten sein müssen und muss mit dem definierten Ziel kongruieren. Weitere Zusammenhänge bestehen mit dem

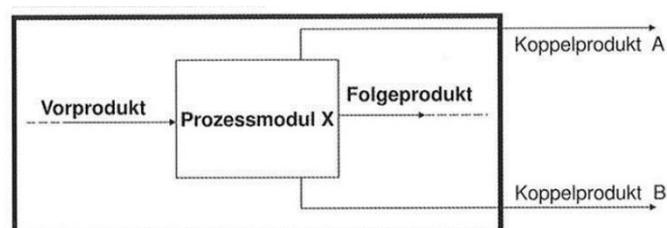
Untersuchungsrahmen, der geplanten Anwendung der Studie, der Zielgruppe, Beschränkung von Kosten und Daten und den unterhalb erklärten Abschneidekriterien. Damit werden Prozessmodule ausgegrenzt, die nicht betrachtet werden sollen oder müssen. In [6] wird in mehrere Arten von Grenzen unterschieden: technische, geografische und zeitliche Systemgrenzen.

Technische Systemgrenzen beziehen sich allgemein auf Prozesse und Prozessmodule, die mithilfe von Abschneidekriterien aus dem System ausgegrenzt und mangels Auswirkung nicht berücksichtigt werden. Diese Kriterien nehmen Bezug auf Masse, Energie oder Umweltrelevanz des Prozessmoduls und werden meist als Prozentwert angegeben. Als Beispiel dienen die Edelmetalle in einem Katalysator. Sie sind, bezogen auf das System Katalysator, im Massenanteil gering, aber müssen aufgrund des hohen Herstellungsaufwands hinsichtlich Energie jedenfalls berücksichtigt werden.

### *Allokation*

Zuordnung der Input- oder Outputflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen.

Abbildung 2.3 zeigt ein Prozessmodul, bei dem die Koppelprodukte A und B das System verlassen. Das macht eine Zuordnung der Outputströme zu den ausgehenden Produkten notwendig.



*Abbildung 2.3: Situation, die Allokation erfordert*

## 2.3 Struktur der Ökobilanz

Das Life Cycle Assessment hat aufgrund seiner zahlreichen Ursprünge mehrere Versuche zur Strukturierung erfahren. Die relevantesten sind jene der SETAC [8] und der International Organization for Standardization (ISO) [9]. Diese beiden Strukturen werden hier vorgestellt.

### 2.3.1 Struktur nach SETAC

Der Aufbau einer Ökobilanz ist durch das SETAC-Dreieck beschrieben, welches in der folgenden Abbildung 2.4 links dargestellt ist. Die rechte Abbildung zeigt zusätzlich die Ergänzung von 1993, in der man von Wirkungsbilanz zu Wirkungsabschätzung übergang und den Bereich der Improvement Analysis zu Improvement Assessment umbenannte. Dieser Bereich wird auf Deutsch Auswertung genannt.

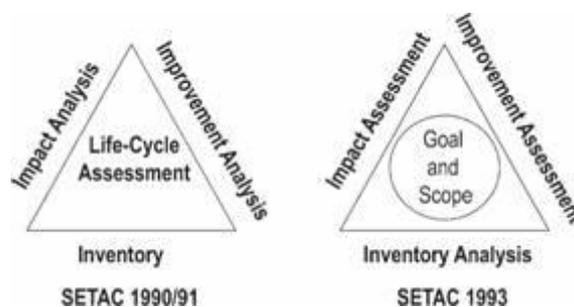


Abbildung 2.4: Das SETAC-Dreieck und dessen Erweiterung in den LCA-Guidelines

In dieser Struktur beinhaltet eine Ökobilanz die folgenden drei Punkte:

- Sachbilanz (Life Cycle Inventory)
- Wirkungsabschätzung (Impact Assessment)
- Auswertung (Improvement Assessment)

### 2.3.2 Struktur nach ISO

Die Ökobilanz basiert auf den Normen ISO 14040 [5] und ISO 14044 [7], wobei die erste die Grundsätze und Rahmenbedingungen definiert und die zweite Anforderungen und Anleitungen darlegt.

Nach ISO 14040 muss eine Ökobilanz-Studie diese vier Phasen umfassen:

- Die Phase der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Die Sachbilanz-Phase
- Die Phase der Wirkungsabschätzung
- Die Phase der Auswertung

Die Unterart der Sachbilanz-Studien kommt ohne die Wirkungsabschätzung aus. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 2.5 die Struktur der Ökobilanz nach ISO.



Abbildung 2.5: Phasen und Anwendungen einer Ökobilanz nach ISO 14040

## 2.4 Beschreibung der Phasen

Die zuvor erwähnten vier Phasen (Zielfestlegung, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Auswertung) bilden die Grundstruktur der Ökobilanz. Im folgenden Abschnitt wird detaillierter auf sie eingegangen.

### 2.4.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

#### *Festlegung des Ziels*

In der ersten Phase der Ökobilanz wird festgelegt wie die spezifische Studie gestaltet wird. Zur Zieldefinition gehören die Festlegung auf den Anwendungsbereich, die Gründe für die Durchführung, die Zielgruppe und ob Publikation für vergleichende Aussagen geplant ist. Damit ist ein Maßstab für die Genauigkeit der Studie generiert und die Anpassung der Methodik an die Aufgabenstellung folgt im nächsten Abschnitt.

#### *Festlegung des Untersuchungsrahmens*

Dazu gehören eine Beschreibung des Produktsystems oder bei vergleichenden LCAs der Produktsysteme. Diese Darstellung kann am besten als Flussdiagramm mit den Prozessmodulen und deren Verbindungen gezeigt werden. Da Produkte meist aus Prozessmodulen bestehen, die im Laufe des Lebensweges kombiniert werden, verjüngt sich das Fließbild des Systems nach unten, woher auch der Begriff des Produktbaums stammt. Abbildung 2.6 soll diesen Ablauf exemplarisch verdeutlichen. Des Weiteren ist die Festlegung der Systemgrenzen notwendig. Dies kann als einer der wichtigsten Schritte betrachtet werden, da diese Grenzen bei vielen inhaltsähnlichen Studien der Hauptgrund für abweichende Ergebnisse ist.

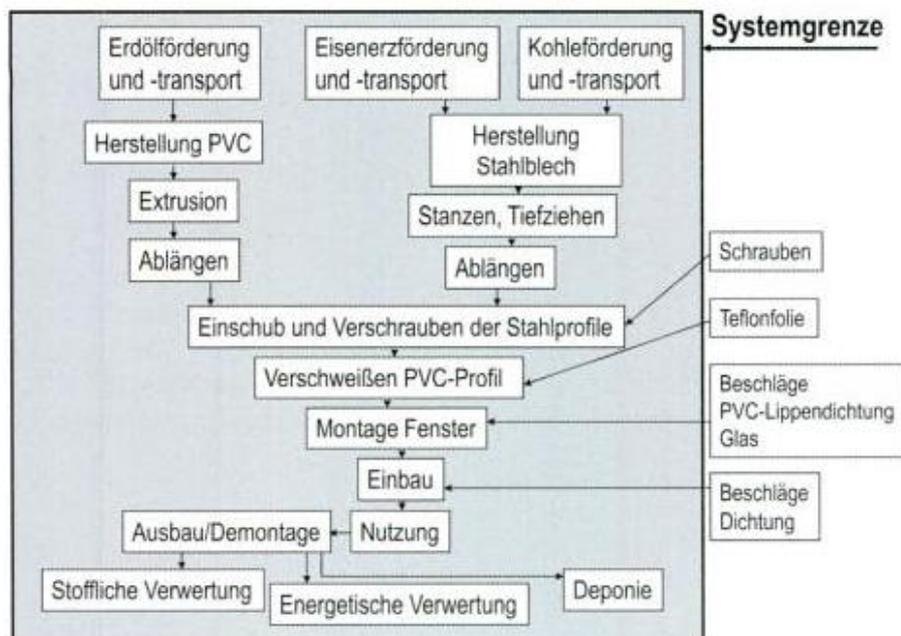


Abbildung 2.6: Beispiel eines Produktbaumes

## 2.4.2 Sachbilanz

Mit Ziel und Untersuchungsrahmen ist der Grundstein für die Sachbilanz gelegt. Diese ist eine Analyse der Stoff- und Energiebilanzen der Systemkomponenten. Dabei werden Daten erhoben und Berechnungen durchgeführt, um für ein Produktsystem die Ströme an Input und Output zu analysieren. Einschränkungen werden hierbei durch die vorherige Zielfestlegung und die Systemgrenzen gemacht. Wird als Ziel beispielsweise der Energieverbrauch in der Fertigungsphase definiert, müssen weder die Rohstoffgewinnung noch die Abgasemissionen berücksichtigt werden.

Je nach Qualität der ermittelten Daten werden die betrachteten Prozesse in Bestandteile zerlegt. Stehen viele Daten zu Verfügung, kann bis zu den einzelnen Prozessmodulen aufgelöst werden, bei schlechterer Ausgangslage werden dementsprechend weniger Unterteilungen gemacht und Module zusammengefasst. Es kann zum Beispiel vorkommen, dass einzelne Fertigungsschritte nicht betrachtet werden, dafür aber können die Daten des Standorts herangezogen werden, an dem der jeweilige Fertigungsschritt durchgeführt wird. Teilweise werden auch im Laufe der Sachbilanz Umstände bekannt, die eine Anpassung des Ziels oder des Untersuchungsrahmens mit sich ziehen können.

Abbildung 2.7 liefert einen Anhaltspunkt zu den in der Sachbilanz durchzuführenden Schritten. Allerdings ist diese Auflistung weder komplett noch bindend.

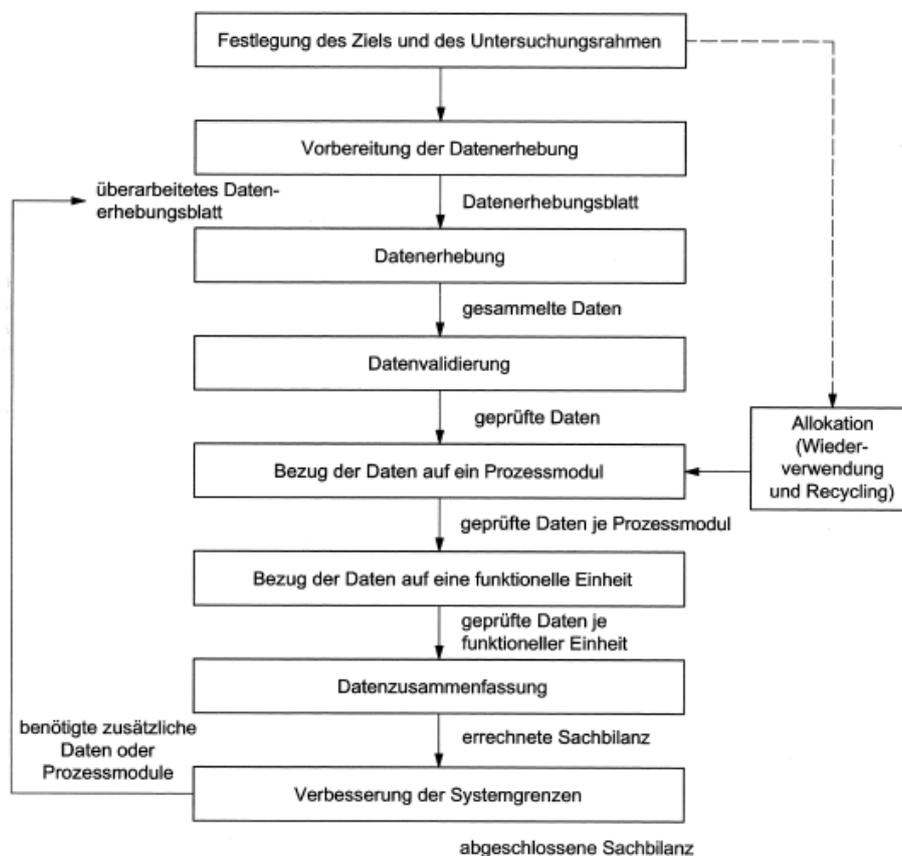


Abbildung 2.7: Vereinfachte Verfahren in der Sachbilanz

### 2.4.3 Wirkungsabschätzung

Mit der Sachbilanz können die Auswirkungen der betrachteten Produktsysteme auf die Umwelt erfasst werden. In der Phase der Wirkungsabschätzung werden die Ergebnisse der Sachbilanz zusammengefasst und nach qualitativen Gesichtspunkten in verschiedenen Wirkungskategorien eingeteilt. So werden häufig der Einfluss auf den Treibhauseffekt, sauren Regen und Nährstoffeintrag (Überdüngung) in Erde und Wasser angegeben.

Allgemein beinhaltet diese Phase folgende Bestandteile (nach ISO 14044):

#### Verbindliche Bestandteile

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

Die Wirkungskategorien sind in den betreffenden Normen nicht enthalten, weder als Vorgabe noch als Empfehlung. Daher liegt es am Verfasser der Ökobilanz, eine Auswahl zu treffen. In Tabelle 2.1 sind mehrere Kategorien aus verschiedenen Quellen zusammengefasst. Dabei werden in den Beispielen auf der rechten Seite „Wirkungskategorien definiert, denen die Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können (*Midpoint Categories*). Diese können anschließend zusammengefasst werden (*Damage Categories*).“ [6, p. 204]

Wirkungskategorie [10]	Wirkungskategorie [11]	
	<i>Midpoint Categories</i>	<i>Damage Categories</i>
Humantoxizität	Humantoxizität	Menschliche Gesundheit
Ökotoxizität	Effekte auf die Atmung	
Eutrophierung (aquatisch)	ionisierende Strahlung	Qualität von Ökosystemen
Eutrophierung (terrestrisch)	Ozonschichtzerstörung	
Naturraumbeanspruchung	photochemische Oxidation	
Ozonbildung (bodennah)	aquatische Ökotoxizität	
Ressourcenbeanspruchung	terrestrische Ökotoxizität	Ressourcen
Ozonabbau (Stratosphäre)	aquatische Versauerung	
Treibhauseffekt	aquatische Eutrophierung	
Versauerung	terrestrische Versauerung und Eutrophierung	Klimaerwärmung
	Landnutzung	
		globale Erwärmung
	nicht erneuerbare Energie	Ressourcen
	Abbau von Mineralien	

Tabelle 2.1: Beispiele zu Wirkungskategorien

In der Klassifizierung werden Positionen der Sachbilanz den Wirkungskategorien zugeordnet, beispielsweise können fossile Rohstoffe der Kategorie Ressourcenbeanspruchung zugeteilt werden. Allerdings ist die Zuteilung nicht immer eindeutig. Stoffe können parallel in mehreren Wirkungskategorien auftreten, wie etwa  $\text{SO}_2$ , das gleichzeitig toxisch wirkt und Säuren bildet. Es existieren auch serielle Wirkmechanismen, bei denen Stoffe verschiedene Kategorien hintereinander durchlaufen.  $\text{NO}_x$  bildet unter Sonnenlichteinfluss Photooxidantien (Sommersmog) und gilt danach als säurebildendes Gas. Die Unterscheidung in parallelen oder seriellen Wirkmechanismus ist nicht immer eindeutig.

Das abschließende Kapitel der Wirkungsabschätzung ist die Charakterisierung. Dabei werden die Ergebnisse der Sachbilanz in gemeinsame Einheiten umgewandelt und in den vorgesehenen Wirkungskategorien zusammengefasst. Die dabei verwendeten Charakterisierungsfaktoren dienen zur Umrechnung und werden wie folgt definiert. „Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird. Anmerkung: Die gemeinsame Einheit erlaubt die Berechnung des Wirkungsindikatorwertes.“ [5, p. 10]

Als Beispiel dient die Wirkungskategorie Klimaänderung. Der Kategorie wurden Massen pro funktioneller Einheit an Treibhausgasen aus der Sachbilanz zugeordnet. Jetzt werden sie mit den spezifischen Charakterisierungsfaktoren (hier: Global Warming Potential GWP, 1 für  $\text{CO}_2$  und 25 für  $\text{CH}_4$ ) in  $\text{CO}_2$ -Äquivalente umgewandelt. Damit wurden die unterschiedlichen Gase mit einer gemeinsamen Einheit versehen ( $\text{kg CO}_2\text{e}$ ). Die  $\text{CO}_2$ -Äquivalenz gibt somit das Potential eines bestimmten Gases zur globalen Erwärmung an. Dabei wird die Menge an  $\text{CO}_2$ , die für denselben Effekt benötigt wird, als vergleichende Einheit verwendet.

### *Optionale Bestandteile*

Optional können in der Phase der Wirkungsabschätzung noch weitere Schritte durchgeführt werden, die hauptsächlich dem Verständnis dienen.

Durch eine Normierung werden die erhaltenen Werte in Relation zu einer Referenz gesetzt. Das ermöglicht ein besseres Verständnis der Größenordnung.

Mit der Gewichtung sollen Klassen gebildet werden, in die die Wirkungskategorien gegliedert werden. Dies kann auch eine Rangordnung beinhalten.

Die Gewichtung ist ein Euphemismus des von der ISO verpönten Begriffes Bewertung. Sie „ist ein Verfahren zur Umwandlung der Indikatorwerte verschiedener Wirkungskategorien unter Verwendung numerischer Faktoren [...]. Sie kann die Zusammenfassung der gewichteten Indikatorwerte einschließen.“ [7]

## 2.4.4 Auswertung

Diese Phase der Ökobilanz dient dazu, die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam zu betrachten. Dabei werden Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen erstellt. Dabei bezieht sich die Auswertung stark auf die Zielsetzung der Ökobilanz. In Abbildung 2.8 sind die Komponenten der Auswertung mit den restlichen Bestandteilen der Ökobilanz abgebildet sowie deren Bezug zueinander [7, p. 32].

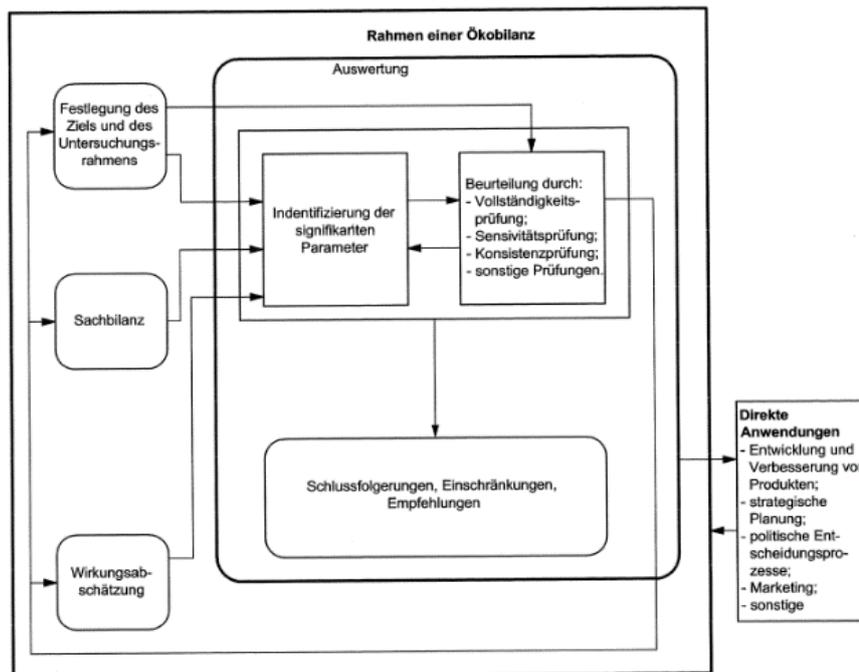


Abbildung 2.8: Einordnung der Auswertung innerhalb der Ökobilanz

Der Identifizierung signifikanter Parameter muss eine Definition der Signifikanz vorausgehen. Da in den Normen keine Angabe über Schwellenwerte gemacht wird, liegt es im Ermessen des Autors der Ökobilanz diese Kriterien festzusetzen. Dabei sollen die Parameter gefunden werden, für die „ein quantitativer Unterschied unter Einbeziehung der Datenunsicherheiten tatsächlich besteht.“ [6, p. 359] Es sollen also jene Parameter gewählt werden, die sich außerhalb des Einflusses dieser Unsicherheiten befinden.

In der Beurteilung soll eine übersichtliche Zusammenfassung des Resultats gegeben werden. Dazu werden in [7, p. 34] folgende Methoden vorgeschlagen:

- Vollständigkeitsüberprüfung
- Sensitivitätsüberprüfung
- Konsistenzprüfung

Die Vollständigkeitsüberprüfung stellt sicher, dass alle relevanten Informationen vorhanden sind, besonders jene die für signifikante Parameter herangezogen werden. Konsequenzen hieraus sind die Nachbesserung der Daten bzw. die Anpassung von Ziel und Untersuchungsrahmen.

Mittels Sensitivitätsüberprüfung wird die Unsicherheit in den Ergebnissen der Ökobilanz eingeschätzt. Die Ursache der Unsicherheiten sind vor allem die Qualität der verwendeten Daten, aber auch die Wahl der Abscheide- und Wirkungskriterien und die Allokation (s. Kapitel 2.2). Diese Überprüfung wird häufig durchgeführt, indem man einen einzelnen Punkt des Szenarios ändert und die Auswirkungen beobachtet. So muss das Resultat immer noch Sinn ergeben, aber der Einfluss des veränderten Punktes kann betrachtet werden. Mögliche Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse sind:

- Eine geringfügige Änderung des Ergebnisses.
- Die Notwendigkeit von detaillierten Überprüfungen.
- Die Gültigkeit der Ergebnisse nur innerhalb einer gewissen Schwankungsbreite.

Die Konsistenzprüfung soll feststellen, „ob sich die Annahmen, Methoden und Daten in Übereinstimmung mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen befinden.“ [6, p. 361] Zusätzlich muss bei vergleichenden Ökobilanzen darauf geprüft werden, ob die Grundlagen ausreichend ähnlich sind.

### 3 Antriebskonzepte

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die aktuell am Markt befindlichen Antriebsarten gegeben werden, wobei besonders auf die verwendeten Komponenten und deren Konfiguration eingegangen wird. Den Anfang machen die Antriebsstränge mit Verbrennungskraftmaschine, darauf folgen die verschiedenen Konfigurationen von Hybriden. Als Abschluss sollen die Bauarten von Elektrofahrzeugen betrachtet werden

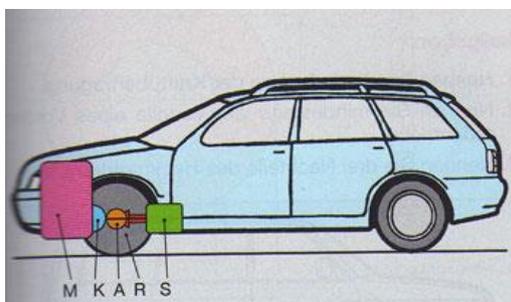
#### 3.1 Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen

Bei Fahrzeugen, die rein von einer Verbrennungskraftmaschine angetrieben werden, gestaltet sich der Aufbau des Antriebsstrangs sehr linear, die Komponenten sind nicht verzweigt. Man versteht unter dem Antriebsstrang all jene Bauteile, die die Antriebsleistung generieren und bis an die Straße weiterleiten.

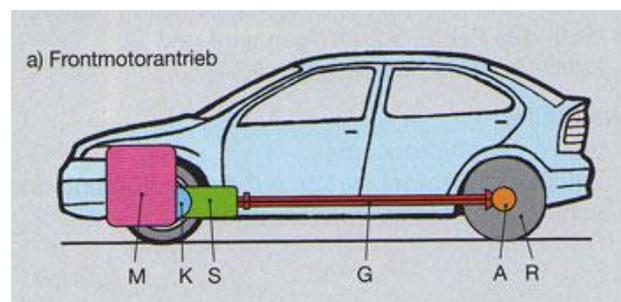
Auf der Seite der Leistungserzeugung steht als Erstes der Motor. Hier wird die chemisch gebundene Energie des Kraftstoffs durch Verbrennung in Wellenarbeit umgewandelt. Als Kraftstoff werden hauptsächlich Benzin und Diesel verwendet. Darauf folgt zwischen Motor und Getriebe die Kupplung, welche bei Betätigung den Kraftfluss unterbricht. Das anschließende Getriebe hat sicherzustellen, dass für die jeweilige Fahrsituation die optimale Motordrehzahl erreichbar ist. Einerseits muss zum Anfahren kurz untersetzt werden, damit genügend Drehmoment vorhanden ist, um das Fahrzeug in Bewegung zu setzen, andererseits ist ein lang übersetzter höchster Gang bei hohen Geschwindigkeiten ökonomisch sinnvoll.

Danach folgen die Antriebswellen und die Räder, beziehungsweise kommen bei heckgetriebenen Fahrzeugen auch Gelenkwellen, Kardanwelle und ein Differential dazu.

Als Beispiele sind in Abbildung 3.1 ein frontgetriebenes und ein heckgetriebenes Fahrzeug dargestellt [12].



M... Motor  
K... Kupplung  
S... Schaltgetriebe



A... Achs- und Ausgleichsgetriebe  
R... treibendes Rad  
G... Gelenkwelle

Abbildung 3.1: Frontantrieb und Heckantrieb

### 3.2 Hybridfahrzeuge

Hybridfahrzeuge sind Fahrzeuge mit mehreren Antriebstechniken. Im Allgemeinen wird darunter die Kombination der Verbrennungskraftmaschine mit einem Elektroantrieb verstanden. Durch die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten haben sich unzählige Kombinationen entwickelt, daher muss eine Einteilung gefunden werden. Einerseits erfolgt dies nach Größe des Elektromotors, also von der elektrischen Anfahrhilfe bis zum vollwertigen Hybridantrieb, andererseits kann nach Aufbau der Hybridkonfiguration (Topologie) kategorisiert werden. Abbildung 3.2 [13, p. 17] stellt dies zur Verdeutlichung dar.

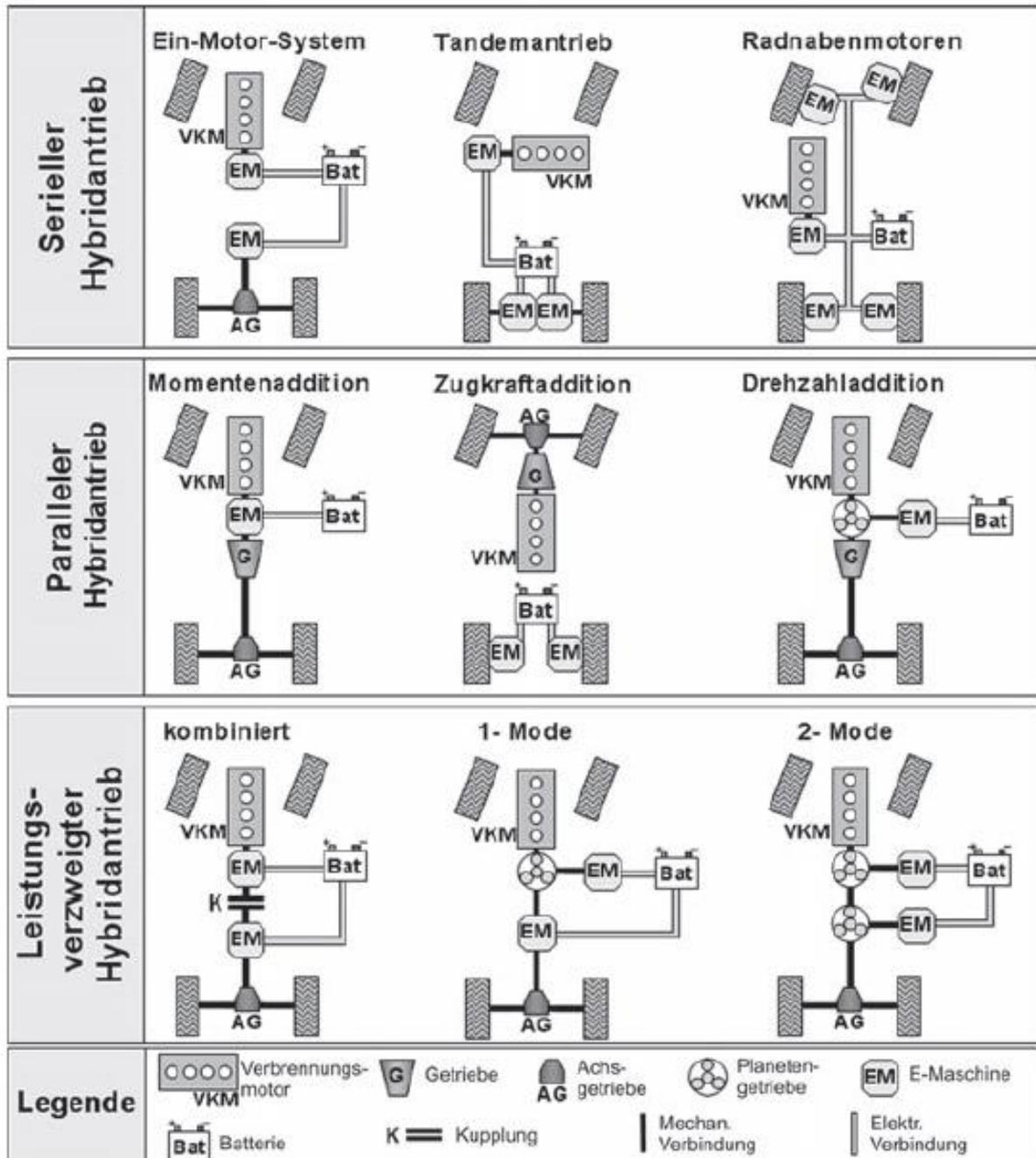


Abbildung 3.2: Topologische Einteilung der Hybridantriebe

### 3.2.1 Unterteilung nach Leistungsfähigkeit des Elektromotors

Beginnt man die Unterteilung mit dem kleinsten Elektromotor, haben sich diese Bezeichnungen etabliert:

- Micro Hybrid
- Mild Hybrid
- Full Hybrid
- (Plug-In Hybrid)

Der Micro Hybrid ist ein herkömmliches Kraftfahrzeug mit geringen Modifikationen. Der Anlasser wird verstärkt oder besser an die VKM angebunden, und es wird damit ermöglicht, den Motor bei kurzen Standphasen wie zum Beispiel Ampelstops abzustellen und beim Anfahren wieder in Gang zu setzen. Zusätzlich ist bei machen Micro Hybriden auch eine Rückgewinnung der Bremsenergie vorhanden.

Zusätzlich zum Micro Hybrid ist im Mild Hybrid die Rekuperation von Bremsenergie eine Standardtechnik und die Auslegung der elektrischen Maschine erlaubt die Unterstützung der VKM wenn benötigt, beispielsweise beim Anfahren oder Beschleunigen.

Der Full Hybrid ermöglicht das Fahren im rein elektrischen Betrieb, rein von der VKM angetrieben, sowie kombiniert. Die elektrische Maschine ist auf eine für das rein elektrische Fahren notwendige Dauerleistung ausgelegt und die Batterie hat eine Spannung von 200-400V.

Der Plug In-Hybrid ist ein Hybridfahrzeug, bei dem die Batterie zusätzlich aus dem Stromnetz geladen werden kann. Damit ist er eine Kombination aus Hybrid- und Elektrofahrzeug. Die Batterie wird größer ausgeführt, um die elektrische Reichweite zu erhöhen. Abbildung 3.3 [13] zeigt einen möglichen Aufbau.

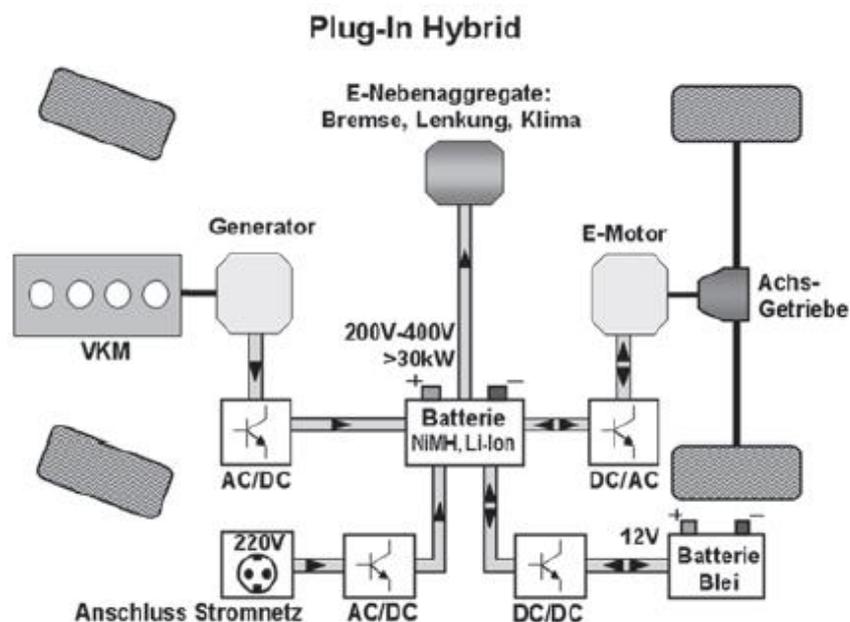


Abbildung 3.3: Beispiel für den elektrischen Aufbau eines Plug-In Hybridfahrzeugs

### 3.2.2 Unterteilung nach Bauweise

#### *Serieller Hybridantrieb*

Der serielle Hybrid zeichnet sich dadurch aus, dass zwischen Verbrennungskraftmaschine und Antriebsachse keine mechanische Verbindung besteht. Der eigentliche Antriebsmotor ist die elektrische Maschine. Die Energieversorgung erfolgt aus der Batterie, die VKM und der Generator dienen dazu, die Batterie zu laden, und können das nicht nur während der Fahrt, sondern auch im Stillstand. Es existieren mehrere Aufbauvarianten, ein Elektromotor mit Differential an der angetriebenen Achse ist ebenso möglich wie zwei Fahrmotoren pro Achse (ohne Differential) oder die Konfiguration mit Radnabenmotoren.

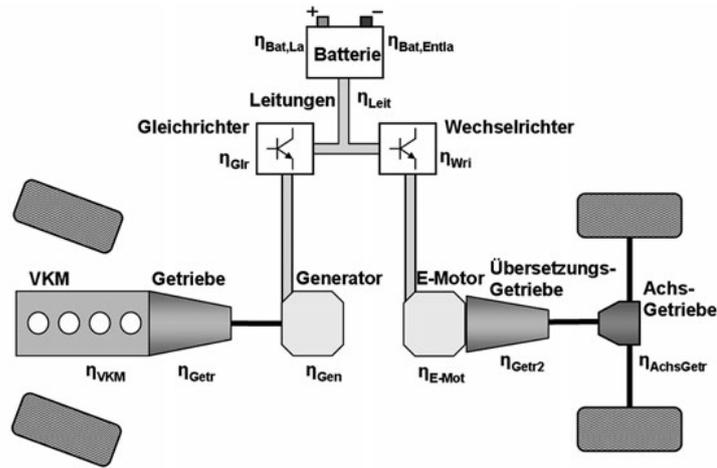
Der serielle Antrieb kann unterschiedlich ausgelegt werden. In der klassischen Konfiguration befinden sich drei Maschinen ähnlicher Leistung im Fahrzeug: VKM, Generator und Fahrmotor. Die Leistung der Maschinen orientiert sich an der Höchstgeschwindigkeit, also muss der elektrische Fahrmotor diese Leistung konstant liefern können, während in der Ladegruppe (VKM und Generator) dieselbe Menge an Energie inklusive späteren Verlusten erzeugt werden muss. Dies führt zu groß dimensionierten Aggregaten, die im Stadtverkehr tief im Teillastbereich bewegt werden. Darunter leidet der Wirkungsgrad und in Folge der Kraftstoffverbrauch.

Der serielle Aufbau ist auch für elektrisch betriebene Fahrzeuge zur Verlängerung der beschränkten Reichweite möglich. Dabei dient nach entleerter Batterie bei längerer Fahrt der Verbrennungsmotor nur zur Erhöhung der Reichweite. Diese VKM werden als „*auxiliary power unit*“ (APU) oder „range extender“ bezeichnet.

Die Möglichkeit, die Ladegruppe unabhängig vom Radantrieb zu regeln, birgt großes Potential und viele Vorteile [13, p. 20]:

- Startet man den Verbrennungsmotor verzögert, können VKM und Katalysator vorgewärmt werden
- Die VKM kann im Bestpunkt betrieben werden
- Quasistationärer Betrieb der VKM möglich
- Strategien für den intermittierenden Betrieb
- Durch die freie Positionierung der Ladegruppe können neue Fahrzeugkonzepte verwirklicht werden (Packaging)

Der größte Nachteil des seriellen Hybridantriebs ist die wiederholte Energieumwandlung. Die chemisch gebundene Energie des Kraftstoffs wird in Wellenleistung umgewandelt, diese in elektrische Energie und wieder zu Wellenleistung. Dies führt zu einer teilweise langen Wirkungsgradkette, wie in Abbildung 3.4 verdeutlicht wird.



$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{VKM}} * \eta_{\text{Getr}} * \eta_{\text{Gen}} * \eta_{\text{Glr}} * \eta_{\text{Leit}} * \eta_{\text{Bat,La}} * \eta_{\text{Bat,Entla}} * \eta_{\text{Wri}} * \eta_{\text{E-Mot}} * \eta_{\text{Getr2}} * \eta_{\text{AchsGetr}}$$

Abbildung 3.4: Wirkungsgradkette eines seriellen Hybridfahrzeugs (Quelle [13])

### Paralleler Hybridantrieb

Wenn die Verbrennungskraftmaschine mechanisch mit dem Antrieb verbunden ist kann der elektrische Zweig ebenfalls Antriebsleistung abgeben. Da die beiden nebeneinander arbeiten, spricht man vom parallelen Hybridantrieb. Mit diesem Aufbau ist es möglich, das Fahrzeug rein elektrisch, mittels VKM oder kombiniert zu betreiben. Die Kombination der Leistungen erfolgt entweder über Drehzahladdition mit einem Planetengetriebe oder mittels Momentenaddition, indem man die Antriebe direkt koppelt. Dies erlaubt viel Variation in der Abgabe der Drehmomente, setzt jedoch die Drehzahlen der Motoren in ein Verhältnis zueinander. Eine weitere Möglichkeit des parallelen Einbaus ist die Zugkraftaddition, dabei wirken die Motoren auf unterschiedliche Achsen. So kann beispielsweise ein VKM-frontgetriebenes Fahrzeug an der Hinterachse elektrisch unterstützt werden.

Eine weitere Unterscheidung kann vorgenommen werden, wenn man die Position der elektrischen Maschine betrachtet. Wirkt sie auf dieselbe Getriebewelle wie die VKM, spricht man von einer Einwellenlösung, bei einer Zweiwellenlösung liegt sie an einer anderen Getriebewelle. Abbildung 3.5 veranschaulicht das.

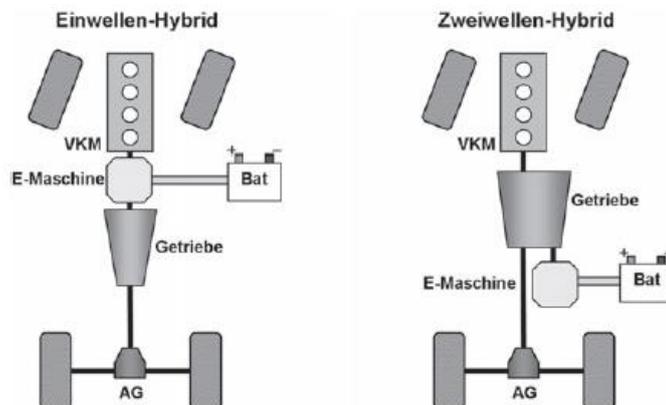


Abbildung 3.5: Einwellen- und Zweiwellen-Parallelhybridsysteme (Quelle [13])

Als Vorteil dieser Fahrzeugkonfiguration gilt, dass Elektromotor und VKM auf verschiedene Betriebsbereiche optimiert werden können. Mit dem Verbrennungsmotor können hohe Geschwindigkeiten im Überlandverkehr erreicht werden und der Elektromotor ist auf Stadtbetrieb ausgelegt. Auch die umgekehrte Konfiguration ist möglich. Von Vorteil ist auch, dass nur mehr eine elektrische Maschine benötigt wird. Somit werden Generator und Fahrmotor zusammengelegt und Gewicht eingespart. Im Vergleich zum seriellen Hybrid ist nachteilig, dass die VKM nicht unabhängig vom Antrieb und daher nicht mehr (quasi-) stationär betrieben werden kann.

### Leistungsverzweigter Hybrid

Leistungsverzweigte Hybridkonfigurationen sind auch unter den Namen „Combined Configuration“ oder „Power Split Hybrid“ bekannt. Bei diesem Aufbau wird die an die Räder zu liefernde Leistung auf einen mechanischen und einen elektrischen Zweig aufgeteilt und über Getriebe wieder zusammengeführt. Toyota hat dieses Prinzip im Prius II umgesetzt.

## 3.3 Elektrofahrzeug

Im Elektrofahrzeug kommen vor den mechanischen Komponenten des Antriebsstrangs im Wesentlichen die folgenden Komponenten vor: Energiespeicher, Stromrichter und die elektrische Maschine, wie in Abbildung 3.6 [14] dargestellt wird. Zur Beschreibung dieser Komponenten wir auf die Kapitel 7.3 und 7.4 verwiesen.

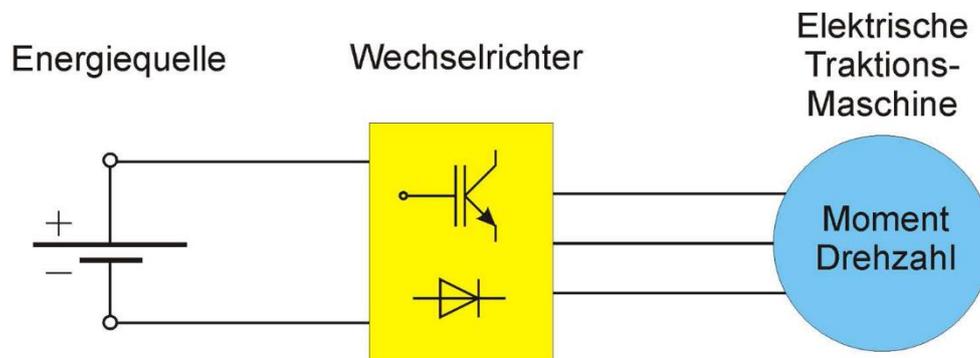


Abbildung 3.6: Elektrische Komponenten im Antriebsstrang des Elektrofahrzeugs

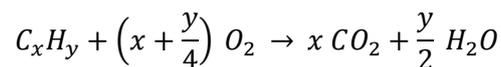
Beispiele für Elektroautos sind die Modelle von Tesla [15] und der BMW i3 [16] als Neuentwicklung bzw. Ford Focus Electric [17] und VW E-up! [18] als Adaption von Serienfahrzeugen.

## 4 Energiebedarf und Treibhausgasemission

Die in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeugkomponenten werden in diversen Ländern weltweit produziert und die dazu verwendeten Rohstoffe haben ebenso Transportwege zwischen Abbau und Verarbeitung zu tragen. In diesem Kapitel sollen die Nutzung fossiler Energieträger, die Stromerzeugung und die damit zusammenhängenden Emissionen betrachtet werden. Um energetische Betrachtungen im Sinne einer Ökobilanz machen zu können, sind vorab einige Begriffe zu definieren.

### CO<sub>2</sub>

Kohlendioxid stellt den Hauptanteil der Verbrennungsabgase dar. Es tritt unweigerlich bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen auf, aus denen fossile Brennstoffe bestehen. Bei Umwandlung mit ausreichend Sauerstoff werden alle Kohlenstoffatome in CO<sub>2</sub>-Molekülen gebunden. Die Verbrennung erfolgt bei ausreichender Luftversorgung wie in der folgenden Reaktionsgleichung dargestellt [19].



*Formel 1: Verbrennung von Kohlenwasserstoffen*

Es ist ein Treibhausgas, das zur globalen Erwärmung beiträgt, indem es in der Atmosphäre Infrarotstrahlung reflektiert, die ansonsten ins Weltall entweicht. Obwohl dieser Vorgang auch auf natürlichem Weg auftritt, nimmt der Anteil der vom Menschen erzeugten Treibhausgasemissionen beständig zu [20]. Eine Reduktion dieser Emissionen ist seit langem ein Ziel globaler Organisationen und wird auch regierungsseitig forciert (Kyoto-Protokoll [21]).

### CO<sub>2</sub>-Äquivalent

Um die Auswirkungen anderer emittierter Gase auf den Treibhauseffekt vergleichbar zu machen, werden sie mit Kohlendioxid in Vergleich gesetzt. Das Treibhauspotential (engl. *global warming potential*, GWP) gibt an, wie viel eine bestimmte Masse eines Treibhausgases im Vergleich zur selben Masse an CO<sub>2</sub> zum Treibhauseffekt beiträgt. Diese Faktoren gelten für unterschiedliche Zeiträume, in der Regel werden 100 Jahre betrachtet. Tabelle 4.1 [22] bietet eine Auflistung der wichtigsten Treibhausgase mit ihren GWP-Werten.

Gas	chem. Formel	GWP-20	GWP-100	GWP-500
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	1,0	1,0	1,0
Methan	CH <sub>4</sub>	72,0	25,0	7,6
Distickstoffoxid	N <sub>2</sub> O	289,0	298,0	153,0

*Tabelle 4.1: Treibhauspotentiale mehrerer Gase*

## 4.1 Verwendung fossiler Energieträger

Die in technischen Anwendungen benötigte Energie, sei es in Form von Wärme oder Strom, wird zum Großteil aus fossilen Brennstoffen bezogen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der bei ihrer Verbrennung anfallenden Emissionen aufgrund der verschiedenen Aufteilung der Kohlenwasserstoffe und der verwendeten Umsetzungstechnologien.

### 4.1.1 Erdöl

Der Rohstoff Erdöl wird nicht direkt zur Energiegewinnung verwendet, sondern muss vorher aufbereitet werden. Dazu durchläuft das Rohöl eine Kette von Reinigungs- und Destillationsprozessen. Die aufbereiteten Produkte sind Heizöl (Diesel) und mehrere Arten von Treibstoffen (je nach Raffinationsgrad) und werden zur Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie verwendet. Tabelle 4.2 [23] gibt die hierbei anfallenden Emissionen an, mit Berücksichtigung des Einsatzzwecks und der Prozesswirkungsgrade.

Einsatzzweck	Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e / MWh]
Erzeugung von Elektrizität	550
Erzeugung von Wärme	267

Tabelle 4.2: Emissionen bei verschiedenen Verwendungen von Erdölraffinationsprodukten

### 4.1.2 Erdgas

Erdgas wird entweder als Nebenprodukt bei der Erdölförderung oder in reinen Erdgasfeldern gewonnen. Auch hier muss der Rohstoff vor der Verwendung aufbereitet werden, um konstante physikalische Eigenschaften zu sichern. Tabelle 4.3 listet die Treibhausgasemissionen auf, die bei der Verwendung von Erdgas zur Energiegewinnung anfallen [23].

Einsatzzweck	Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e / MWh]
Erzeugung von Elektrizität	440
...in GuD <sup>1</sup> Kraftwerken	400
Erzeugung von Wärme	181

Tabelle 4.3: Emissionen von Erdgasanwendungen

### 4.1.3 Strom

Die bei der Erzeugung elektrischer Energie anfallenden Emissionen werden durch einen Faktor berücksichtigt, der, je nach Strommix des betrachteten Landes, den Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro erzeugter Energiemenge angibt.

---

<sup>1</sup> Gas-und-Dampf-Kombinationskraftwerk, bei dem mit der Abwärme der Gasturbine zur Steigerung des Wirkungsgrades Dampf für eine Dampfturbine erzeugt wird.

Dazu werden die verschiedenen Primärenergieträger der verwendenden Technologien zur Stromerzeugung anteilmäßig aufgeschlüsselt und mit den jeweiligen Emissionsfaktoren multipliziert. Summiert man diese Produkte, kann man den Ausstoß von Kohlendioxid beziehungsweise von CO<sub>2</sub>-Äquivalent angeben.

Durch die Vielzahl an voneinander abweichenden Werten ist es von Vorteil, eine einheitliche Quelle zu verwenden, die diese Faktoren für mehrere Länder bereitstellt. Das GEMIS-Programm ist eine solche Quelle. Es ist ein vom Internationalen Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien (IINAS) [1] entwickeltes Programm zur Berechnung von Input- und Outputflüssen umweltrelevanter Vorgänge. Um eine Aussage über die Gültigkeit der im GEMIS verwendeten Daten treffen zu können, wird in Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5 der Emissionsfaktor Österreichs aus mehreren Angaben zu Vergleich gestellt.

Tabelle 4.4 zeigt die Aufschlüsselung der Energie-Control Austria, die die erneuerbaren Energieträger emissionsfrei darstellt [24]. Dies kommt daher, dass die Vorkette zur Gewinnung dieser Energieträger nicht berücksichtigt wird, also etwa die Errichtung von Kraftwerken und Wartungsarbeiten.

	Energieträger	Anteil [%]	Emissionsfaktor [g/kWh]	Anteil [g/kWh]
Bekannte erneuerbare Energieträger	Biogas	0,89	0,00	0,00
	Deponie- und Klärgas	0,07	0,00	0,00
	Sonnenenergie	0,08	0,00	0,00
	Wasserkraft	56,13	0,00	0,00
	Windenergie	3,42	0,00	0,00
	Biomasse	3,85	0,00	0,00
	Geothermie	0,00	0,00	0,00
Bekannte fossile Energieträger	Erdgas	12,38	440,00	54,47
	Erdöl u. dessen Produkte	0,29	645,00	1,87
	Kohle	8,74	882,00	77,09
Zwischensumme		85,85		133,43
Bekannte sonstige Primärenergieträger		0,27	650,00	1,76
Unbekannte Herkunft ENTSO-E-Mix	fossil	8,94	840,00	75,06
	nuklear	4,89	0,00	0,00
	sonstige	0,06	840,00	0,50
CO <sub>2</sub> -Emission der Stromproduktion		100,00		210,74

Tabelle 4.4: Strommix Österreich und Emissionsfaktoren

Im Vergleich dazu wird in Tabelle 4.5 die von GEMIS verwendete Verteilung der Energieträger mit den von der Europäischen Kommission [23] angegebenen Emissionsfaktoren verknüpft.

Energieträger	Anteil [%]	Emissionsfaktor [g/kWh]	Anteil [g/kWh]
Erdgas GuD	19,917	400,00	79,67
Müll	4,847	255,96	12,41
Wasserkraft	59,272	20,00	11,85
Kohle	9,265	800,00	74,12
Öl schwer	1,351	550,00	7,43
Windkraft	3,995	30,00	1,20
Solarenergie	0,078	50,00	0,04
Geothermie	0,018	0,00	0,00
Gichtgas <sup>2</sup>	1,258	1899,72	23,89
Summe	100		210,60

*Tabelle 4.5: Strommix Österreich und Emissionsfaktoren.*

Diese beiden Werte sind ausreichend ähnlich dem im GEMIS angegebenen Wert. Von daher sollen die Werte des Programms in dieser Arbeit verwendet werden. Die CO<sub>2</sub> - Äquivalentemissionen der Energieerzeugung bestimmter Länder sind, auf ganze Zahlen gerundet, in Tabelle 4.6 angeführt. Für Länder mit hohem Anteil an Kernenergie im Energiemix sei erwähnt, dass die Emissionen für Bau und Rückbau der Kernkraftwerke in dieser Software nicht berücksichtigt werden, allerdings wird die Vorkette der Urananreicherung miteinbezogen. Dies geschieht in einem Ausmaß, das auch vom Wissenschaftlichen Dienst des deutschen Bundestages übernommen wurde [25].

Land	g/kWh
China	790
Österreich	209
Deutschland	562
Norwegen	32
Australien	846
Brasilien	619
Indien	888
Chile [26]	637
Südafrika	977

*Tabelle 4.6: Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten zur Herstellung elektrischer Energie bestimmter Länder*

---

<sup>2</sup> Gichtgas ist ein brennbares Gas mit niedrigem Heizwert, das in Hochofenprozessen anfällt. Es wird hauptsächlich vor Ort zum Betrieb von Nebenanlagen verwendet. Beispiel hierfür ist in der Stahlerzeugung das Erhitzen und Komprimieren der einzublasenden Luft.

## 5 Rohstoffgewinnung

Die Betrachtung diverser in der Fahrzeugtechnik verwendeter Werkstoffe hinsichtlich der bei deren Gewinnung anfallenden Energiemengen und Emissionen wurde bereits in [27] ausgeführt und wird als Grundlage dieses Kapitels verwendet.

### 5.1 Stahl

Stahl ist eine Eisen-Kohlenstoff (Fe-C)-Legierung, die je nach Bedarf mit verschiedenen Elementen veredelt werden kann. Er wird in Stahlwerken in verschiedenen Verfahren geschmolzen, gereinigt und mit Legierungselementen versetzt und anschließend zu Halbzeug gegossen.

#### 5.1.1 Primärstahl

Primärstahl erklärt sich als Stahl aus erster Erzeugung. Dazu wird Eisenerz in Minen abgebaut, und in den unten erläuterten Schritten weiterverarbeitet.

#### *Gewinnung und Herstellung*

##### Eisenerzabbau

Die Gewinnung des Roheisens erfolgt aus dem Abbau von Eisenerz, je nach Zugänglichkeit im Tage- oder Untertagebau. Vor Ort wird das Erz vom restlichen Gestein getrennt und in kleine Stücke (Pellets) gebrochen.

Die größten Abbaustätten befinden sich in China, Australien, Südamerika, Indien und Osteuropa, wie Abbildung 5.1 zeigt. [28]

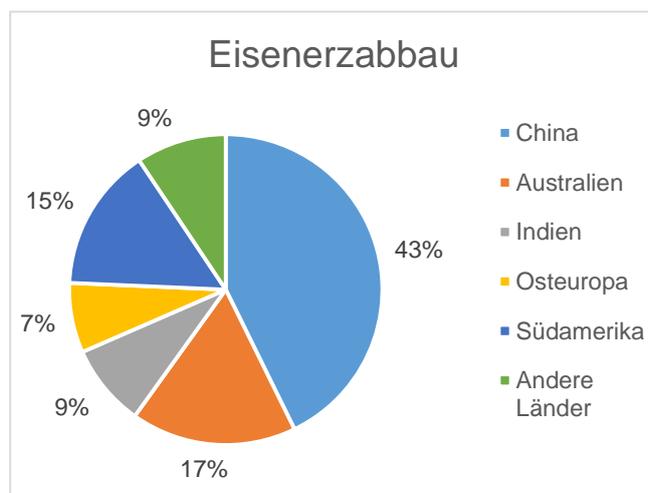


Abbildung 5.1: Verteilung des Eisenerzabbaus

Region	Fördermenge [10 <sup>6</sup> t]
China	1.200
Australien	480
Indien	240
Osteuropa	204
Südamerika	420
Andere Länder	262
total	2.806

Tabelle 5.1: Abbaustätten von Eisenerz

## Erzeugung

Die Pellets werden im Hochofen mit Koks und weiteren Zusatzstoffen vermischt. Durch das Verbrennen des Kokses wird das Eisenerz reduziert, wobei stark kohlenstoffhaltiges Roheisen und Schlacke entstehen. Durch das Einbringen von Sauerstoff wird der Kohlenstoff oxidiert und es entsteht flüssiger Stahl, der jetzt mit den gewünschten Legierungselementen versetzt werden kann. Anschließend erfolgt das Gießen des Stahls, bei dem er abgekühlt wird und zu unterschiedlichen Formen von Halbzeug geformt wird [29].

Die Stahlerzeugung findet weltweit statt, ist jedoch stark auf wenige einzelne Länder konzentriert. So sind die größten sieben stahlerzeugenden Länder für 75% des weltweiten Outputs verantwortlich. Tabelle 5.2 und Abbildung 5.2 geben einen Überblick über die globale Verteilung [30].

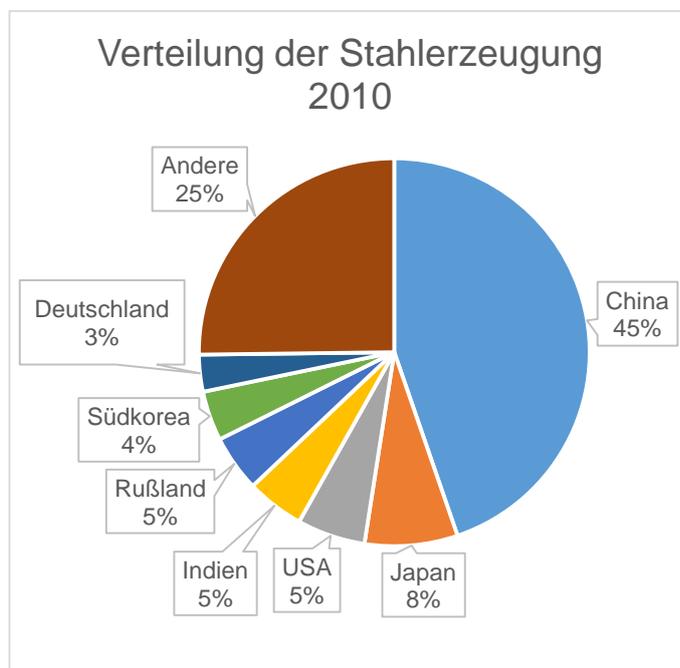


Abbildung 5.2: Verteilung der weltweiten Stahlerzeugung

Land	Menge [10 <sup>3</sup> t]
China	637.400
Japan	109.599
USA	80.495
Indien	68.321
Russland	66.942
Südkorea	58.914
Deutschland	43.830
Andere	358.900
Gesamt	1.424.401

Tabelle 5.2: Erzeugte Stahlmenge nach Ländern, 2010

## Energieaufwand und Emissionen

Der Energieaufwand für die primäre Stahlerzeugung ist je nach Literatur unterschiedlich, wie Tabelle 5.3 zeigt. Der Hauptgrund dafür neben der Modernität der Verfahren und der länderspezifischen Umweltauflagen sind die Systemgrenzen, in denen berechnet wird. So können zum Beispiel Transportprozesse ausgeklammert oder nur grob geschätzt sein [31].

Erzgewinnung	Stahlerzeugung	Quelle
	29,88 GJ/t	[32]
	40 GJ/t	[33]
-	18,1 GJ/t	[34]
-	20 GJ/t	[35]

Tabelle 5.3: Energieaufwand der Stahlherstellung

Die Verteilung der Energieformen lässt sich in Abbildung 5.3 ablesen. [36]

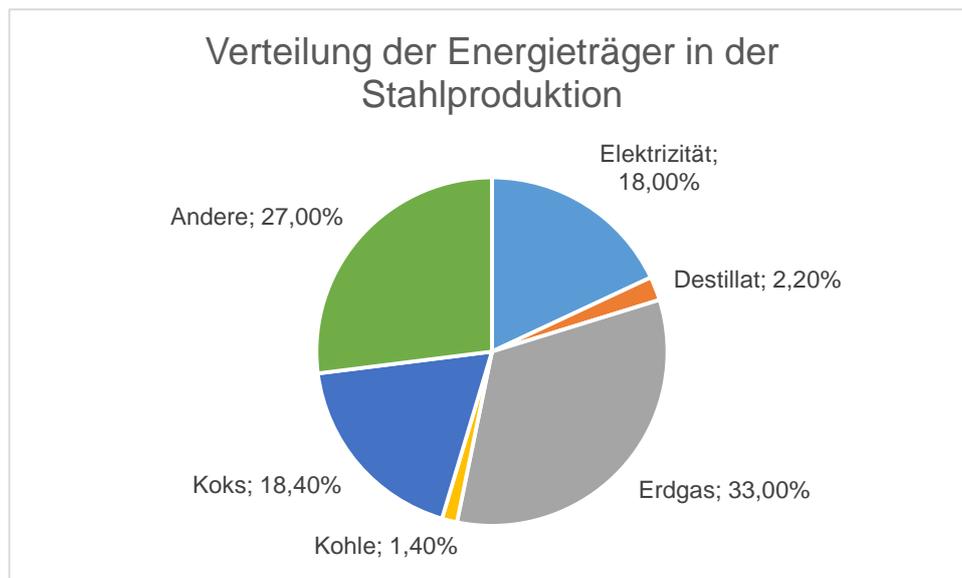


Abbildung 5.3: Verteilung der verwendeten Energieträger in der Stahlerzeugung

Als Emissionen werden 2,0 - 2,5 t CO<sub>2</sub>- Äquivalent pro Tonne Stahl angegeben [37], dies wird mit der Energieverteilung in Abbildung 5.3 kontrolliert, ausgehend davon, dass die fossilen Energieträger zu Heizzwecken verwendet werden.

	Anteil [%]	Anteil [GJ]	Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> e/GJ]	Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e]
elektrisch	18,00%	3,60	176,00	663,60
Destillat	2,20%	0,44	70,08	30,84
Erdgas	33,00%	6,60	50,16	331,04
Kohle	1,40%	0,28	95,54	26,75
Koks	18,40%	3,68	96,64	355,64
Andere	27,00%	5,40	151,53	818,28
GESAMT	100,00%	20,00		2196,15

Tabelle 5.4: Emissionsanteile der Energieträger bei Primärstahlerzeugung

In dieser Tabelle bezieht sich „Andere“ auf Kokereigas<sup>3</sup> und Gichtgas, die in ihrem Anteil an der Kategorie auf je 50% geschätzt wurden. Der elektrische Emissionsfaktor ist dem Ursprungsland der Studie angepasst, den Vereinigten Staaten. Der Erzabbau wird hier nicht bedacht, aber dessen Bedarf besteht zufolge des GEMIS Programmes zur Hälfte aus Elektrizität und zur Hälfte aus Dieseltreibstoff.

<sup>3</sup> Kokereigas wird bei der Verarbeitung von Kohle in Kokereien gewonnen und besteht hauptsächlich aus Wasserstoff und Methan.

Der erhaltene Wert befindet sich innerhalb des angegebenen Rahmens. Daher werden die prozentuellen Angaben aus Abbildung 5.3 verwendet, um die 2,5 t CO<sub>2</sub>e (Maximalwert von [37]) aufzuteilen, je nachdem ob sie aus der Stromerzeugung kommen oder aus fossilen Quellen stammen. Der Emissionsanteil der Stromgewinnung liegt bei 28,85% der von den gesamten Emissionen abgezogen wird, um in der weiteren Berechnung die Herkunft der Elektrizität variieren zu können.

Emissionen gesamt	2,5 t CO <sub>2</sub> e/t
Emissionen der Stromerzeugung	0,72 t CO <sub>2</sub> e/t
Emissionen fossil	1,78 t CO <sub>2</sub> e/t

Tabelle 5.5: THG-Emissionen der Stahlerzeugung, getrennt nach Quelle

### 5.1.2 Sekundärstahl

#### Herstellung

Um aus Schrott wieder Stahl zu gewinnen, muss dieser aufbereitet werden. Dies umfasst nach dem Sammeln die beiden Schritte des Trennens und des Zerkleinerns. Letzteres wird bei Blechen durch pressen realisiert, bei größeren Teilen (z.B. Karosserien) wird das Objekt in einem Shredder zerteilt und anschließend gemahlen.

Das anschließende Schmelzen kann über den Hochofen vollzogen werden oder über das Elektrostahlverfahren (Lichtbogenofen, die benötigte Wärme wird über Lichtbögen oder Induktion zugeführt; siehe Abbildung 5.4). Die Hochofenroute arbeitet mit maximal 30% Schrott, daher wird sie im Rahmen dieser Arbeit nicht für die Sekundärstahlerzeugung betrachtet. Etwa 20% des im Automobilbau eingesetzten Stahl entstammen dem Elektrostahlverfahren [38].

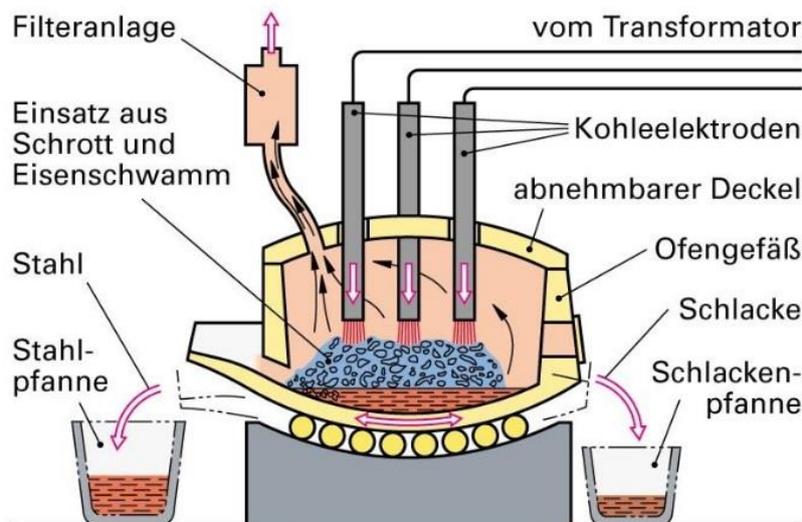


Abbildung 5.4: Schema eines Lichtbogenofens

### Energieaufwand und Emissionen

Der energetische Aufwand für die Herstellung von einer Tonne Sekundärstahl mittels Elektroöfen ist Tabelle 5.6 zu entnehmen. [39] [40]

Energiequelle	Benötigte Energie [MJ]
Gas	225
Kohle	290
Elektrizität	1800

Tabelle 5.6: Energieaufwand der Sekundärstahlherstellung (Elektroöfen)

Der Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten verringert sich um knapp 56% gegenüber der Primärproduktion [41]. Dieser Wert bezieht sich allerdings auf die Menge an Material, die in den Hochofen eingeht. Da aber der Bezug auf das schlussendlich vorhandene Material gewollt ist, ist es nötig, auf die Outputmenge umzurechnen.

CO <sub>2</sub> -Verhältnis inputseitig	44,16%
Materialeinsatzverhältnis sekundär/primär	0,96
CO <sub>2</sub> -Verhältnis outputseitig	45,88%

Tabelle 5.7: Umrechnung der CO<sub>2</sub> Verhältnisse auf den Stahloutput

Damit bleibt eine Reduktion der Treibhausgase um etwa 54%, bezieht man die Werte auf die Outputmenge. Damit können die Emissionen des Primärstahls umgerechnet werden. Geht man von einer Emission von 2 bis 2,5t CO<sub>2</sub>e pro Tonne Stahl bei primärer Erzeugung aus, zeigt Tabelle 5.8 die berechneten Werte pro t Sekundärstahl:

primär	sekundär
2 t CO <sub>2</sub> e/t	0,92 t CO <sub>2</sub> e/t
2,5 t CO <sub>2</sub> e/t	1,15 t CO <sub>2</sub> e/t

Tabelle 5.8: CO<sub>2</sub>e-Emissionen von sekundärem Stahl

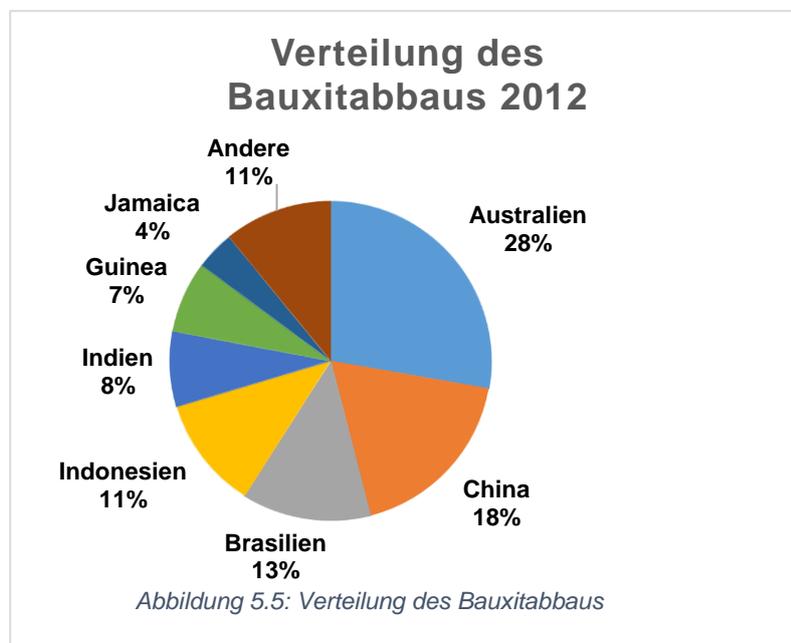
## 5.2 Aluminium

Aluminium ist eines der häufigsten Elemente in der Erdkruste. Es kommt sowohl gediegen als auch hauptsächlich in gebundener Form in Alumosilikaten vor. Da reines Aluminium sehr selten ist und aus den Silikaten nicht gewinnbringend isoliert werden kann, ist der wirtschaftlichste Weg um Aluminium zu erhalten, die Gewinnung aus dem Erz Bauxit. Das erste Unterkapitel beschäftigt sich mit diesen Prozessen, im zweiten Abschnitt wird die Gewinnung aus Schrott betrachtet.

### 5.2.1 Primäres Aluminium

#### Gewinnung und Herstellung

Die größten Förderländer von Bauxit sind Australien, China, Brasilien und Indonesien, wie Tabelle 5.9 und Abbildung 5.5 zeigen [42].



Land	Fördermenge [10 <sup>3</sup> t]
Australien	73.000
China	48.000
Brasilien	34.000
Indonesien	30.000
Indien	20.000
Guinea	19.000
Jamaica	10.300
Andere	28.550
Welt (gerundet)	263.000

Tabelle 5.9: Abbaustätten und -mengen von Bauxit 2012

Zur Herstellung von Primäraluminium hat sich eine Kette von zwei aufeinanderfolgenden Verfahren etabliert, dem Bayer-Verfahren zur Aluminiumoxidgewinnung und dem Hall-Héroult-Prozess – der Schmelzflusselektrolyse.

#### Bayer-Verfahren

Dazu wird Bauxit in Natronlauge erhitzt, um das Aluminium in Lösung zu erhalten. Diese Lauge wird gefiltert und unter Beigabe von Kristallisationskeimen abgekühlt, wodurch Gibbsit  $\text{Al}(\text{OH})_3$  entsteht. Dieser wird zu Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  geglüht [43].

## Hall-Héroult-Prozess

Darunter versteht man die Herstellung von Aluminium aus Aluminiumoxid unter Verwendung der Schmelzflusselektrolyse. Da der Schmelzpunkt von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei über  $2000^\circ\text{C}$  liegt, wird es mit Kryolith  $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$  gemischt, im Verhältnis von etwa 1:5. Dies senkt die Schmelztemperatur unter  $1000^\circ\text{C}$ . In das elektrolytische Gemisch werden in einem kohlenstoffverkleideten Becken Anoden aus Graphit versenkt, die Wanne fungiert als Kathode. Bei einer Spannung von etwa vier bis fünf Volt bei bis zu 300.000 A erfolgt die Zerlegung, das flüssige Aluminium sammelt sich am Boden des Behälters und kann abgeschöpft werden [43].

Der Hall-Héroult-Prozess als Standard der Aluminiumelektrolyse hat zurzeit zwei Varianten, die zur Anwendung kommen. Zum einen das Søderberg-Verfahren, bei dem die Anode kontinuierlich verlängert wird, indem Pech zum oberen Ende hinzugefügt wird. Dadurch entfällt der Elektrodenwechsel. Zum anderen das Prebake-Verfahren, bei dem die Anoden vorgebacken werden, bevor sie zum Einsatz kommen. Aktuell ist diese Methode weiter verbreitet, was an der höheren Effizienz, aber auch an den Emissionen von flüssigem Pech liegt. Global lässt sich die Aluminiumherstellung unter Anwendung beider vorgestellter Verfahren folgendermaßen in Abbildung 5.6 als Prozesskette darstellen [44]:

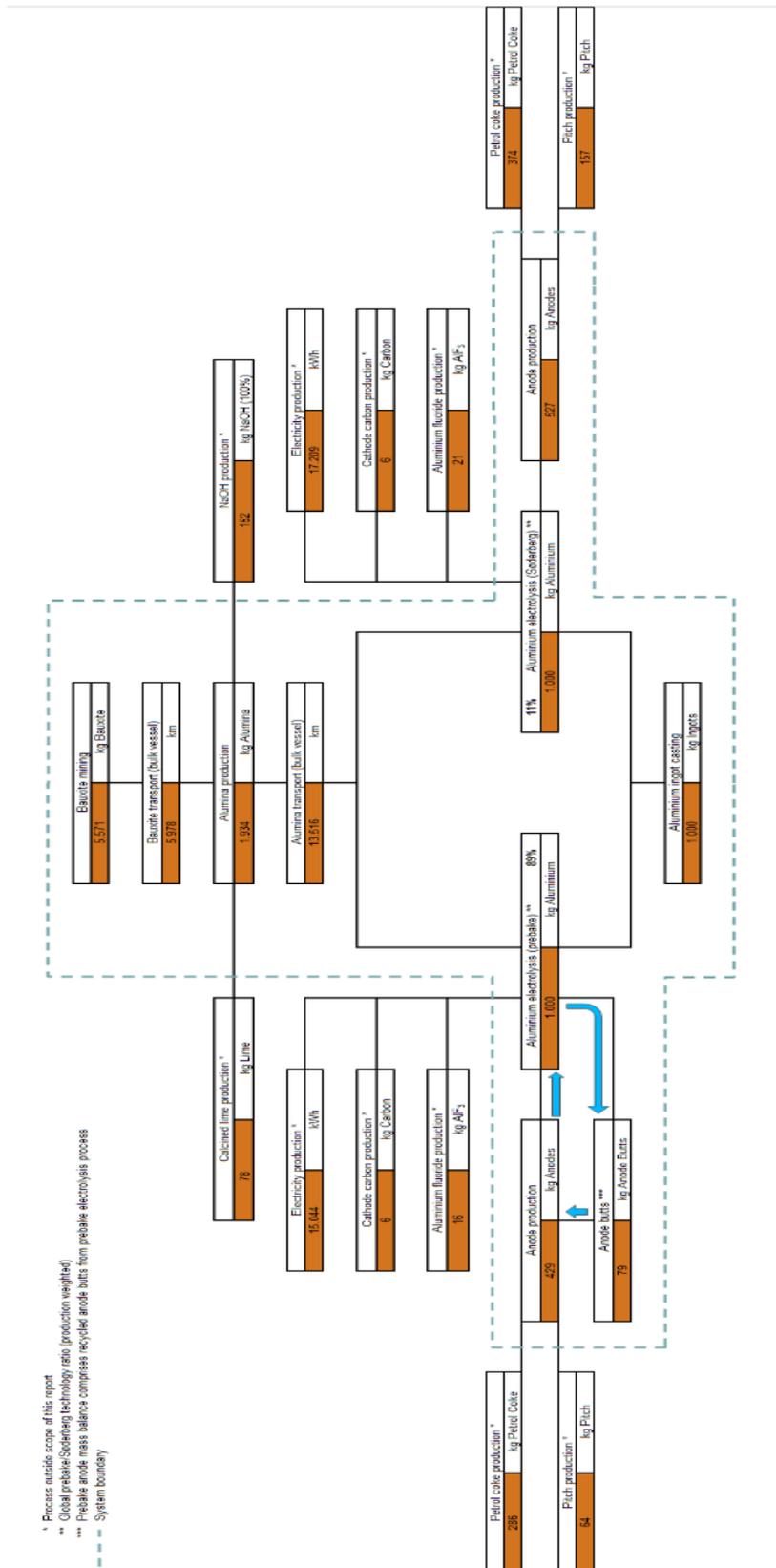


Abbildung 5.6: Prozesskette der Aluminiumherstellung

### Energieaufwand

Der Energiebedarf lässt sich mithilfe einer Sachbilanz des International Aluminium Institute berechnen [45]. Die Einzelschritte dazu sind hier dargestellt. Da die beiden Verfahren verschieden häufig eingesetzt werden, soll nach Ausstoßmenge gewichtet werden.

Verfahren	Menge [t]	Anteil [%]
Prebake	36.773.145	89
Søderberg	4.375.595	11
Gesamt	41.148.740	100

Tabella 5.10: Anteil der Herstellungsverfahren an der Gesamtmasse

Damit lässt sich der elektrische Energiebedarf der Anodenherstellung angeben und gewichten:

Methode	Anteil	Materialbedarf Anoden [t/t Al]	kWh/t Anoden	kWh/t Al
Prebake	0,89	0,429	124,21	53,29
Soderberg	0,11	0,527	46,78	24,65
Gewichtete Summe	1,00	0,44	115,98	50,24

Tabella 5.11: Energiebedarf der Anodenherstellung

Mit Bezug auf die für eine Tonne Aluminium benötigte Menge ergibt sich folgender elektrischer Energieaufwand für die einzelnen Herstellungsschritte:

Herstellungsschritt	Menge [t]	kWh/t	Summe kWh
Bauxitabbau	5,57	0,92	5,13
Aluminiumoxid	1,93	78,69	152,19
Anoden / Prebake	0,44	115,98	50,24
Elektrolyse	1	15274,62	15.274,62
Gießen	1	67,65	67,65

Tabella 5.12: Energieverbrauch der einzelnen Herstellungsschritte

Addiert man noch den Energieinhalt der verwendeten Brennstoffe dazu, erhält man den gesamten Energieaufwand pro Tonne gegossenes Aluminium

Brennstoff	kg/t Al	m <sup>3</sup> /t Al	Heizwert in kWh/E <sup>4</sup>	kWh/t Al
Schweröl	176,55		10,90	1924,43
Diesel	4,63		11,80	54,61
Kohle	143,57		8,30	1191,62
Gas		307,44	10,00	3074,39
Gesamt				6245,05

Tabella 5.13: spezifischer Brennstoffverbrauch der Aluminiumherstellung

<sup>4</sup> E... die jeweilige Bezugseinheit, d.h. kg oder m<sup>3</sup>

	kWh/t Al	GJ/t Al
Energieaufwand elektrisch	15.549,82	55,98
Energieinhalt Brennstoffe	6.245,05	22,48
Energieaufwand gesamt	21.794,87	78,46

Tabelle 5.14: Gesamtenergieaufwand der Aluminiumherstellung

### Emissionen

Für den Ausstoß an Treibhausgasen werden zuerst die fossilen Brennstoffe betrachtet.

Brennstoff	kWh/t Al	Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> /GJ] [46]	Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> /kWh]	Emissionen [kg CO <sub>2</sub> /t Al]
Schweröl	1924,43	78	0,28	540,38
Diesel	54,61	74	0,27	14,55
Kohle	1191,62	93	0,33	398,95
Gas	3074,39	56	0,20	619,80
Gesamt				1.573,68

Tabelle 5.15: CO<sub>2</sub>-Emissionen der fossilen Brennstoffe bei primärer Aluminiumherzeugung

Diese Emissionen werden zu denen der Verarbeitungsschritte addiert. Die gesamten Treibhausgasemissionen lassen sich in Tabelle 5.16 unten ablesen. Sie beinhalten noch nicht die Abgase der Elektrizitätserzeugung, da diese in jedem Land unterschiedlich sind. Bei der weiteren Verwendung von Aluminium in dieser Arbeit werden die Emissionen der Stromerzeugung separat berechnet.

Treibhausgas	spezifische Menge [kg / t Al]	GWP-100	Menge an CO <sub>2</sub> - Äquivalent [kg / t Al]
CO <sub>2</sub> -Emissionen des Gesamtprozesses	1.627,740	1	1.627,74
CO <sub>2</sub> der Brennstoffe	1.573,679	1	1.573,68
CF <sub>4</sub>	0,085	7.390	624,79
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	0,007	12.200	83,80
Gesamt			3.910,01

Tabelle 5.16: Treibhausgase der primären Aluminiumproduktion, ohne Stromerzeugung

## 5.2.2 Sekundäraluminium

Bei der Gewinnung von Recycling-Aluminium wird aluminiumhaltiger Schrott gereinigt und geschmolzen. Diesem Schrott wird ein gewisser Anteil Primäraluminium zugegeben, um Reinheitsanforderungen zu erfüllen. Nach [38] sind etwa 65% des in der Automobilindustrie verwendeten Aluminiums aus sekundärer Produktion.

### Energiebedarf

Aus der Energiebilanz 2012 der AMAG können für dieses Verfahren Werte entnommen werden, um auf den Energieverbrauch zu kommen [47].

Energiebezug elektrisch	11.196.000	kWh	11,34%
Energiebezug Erdgas	84.384.000	kWh	85,48%
Energiebezug Diesel	3.141.500	kWh	3,18%
Gesamt	98.721.500	kWh	100%

Tabelle 5.17: Energiebilanz Umschmelzgießerei AMAG 1012

Dabei geht das Erdgas mit einem Heizwert von 11,19 kWh/Nm<sup>3</sup> (Normkubikmeter)<sup>5</sup> in die Berechnung ein, was 7.541.000 Nm<sup>3</sup> entspricht. Zusätzlich werden für interne Transporte 3.141.500 kWh aus Diesel aufgewendet [48]. Mit dem jährlichen Materialoutput lässt sich der spezifische Energieverbrauch für Sekundäraluminium in Tabelle 5.18 angeben.

Produktion 2012	77.373 t
Energieverbrauch	98.751.500 kWh
Spezifischer Energieverbrauch	1.275,92 kWh/t

Tabelle 5.18: Spezifischer Energieverbrauch Umschmelzgießerei AMAG 2012

Diese Werte umfassen den kompletten Umschmelzprozess, vom Schrotteingang bis zu den fertigen Produkten. Diese sind einerseits Masseln<sup>6</sup> und andererseits Flüssigaluminium. Die Herstellung der Barren hat einen höheren Energiebedarf, da unter anderem die Gussformen vorgewärmt werden müssen. Jedoch wird die meiste Energie zum Schmelzen benötigt, daher soll hier keine Unterscheidung vorgenommen und der Mittelwert beibehalten werden [48].

Es muss erwähnt werden, dass auch in der sekundären Produktion primäres Aluminium zugefügt wird, in Fall der hier verwendeten Angaben der Austria Metall GmbH in einer Menge von 4000 t (siehe Tabelle 5.19). Die Tatsache, dass dieses Werk in Österreich steht, macht es in Bezug auf die energetische Effektivität global nicht repräsentativ. Daher soll von einem Energieverbrauch von 14% der primären Aluminiumherstellung ausgegangen werden. [33, p. 314]

<sup>5</sup> Ein Normkubikmeter ist eine Stoffmengeneinheit, und bezeichnet die Gasmenge, die im Normzustand einen Kubikmeter Volumen einnimmt. Normbedingungen sind:  $p_n=1,01325$  bar,  $T_n=0^\circ\text{C}$  oder  $15^\circ\text{C}$  je nach Norm, und 0% Luftfeuchtigkeit.

<sup>6</sup> Masseln sind kleinere Metallbarren als Halbzeug der Aluminiumherstellung.

	Menge [t]	Anteil [%]
Gesamtproduktion	77.373	100,00
davon Primärzugabe	4.000	5,17

Tabelle 5.19: Produktion der Austria Metall GmbH 2012

Energieverbrauch primär	67,39 GJ/t
Energieverbrauch sekundär	9,43 GJ/t

Tabelle 5.20: Abgeleiteter Energieverbrauch Sekundäraluminiumproduktion

Die Aufteilung der Energieträger aus Tabelle 5.17 wird auf den soeben festgelegten Energieverbrauch angewendet.

	GJ/t	kWh/t
Energiebezug elektrisch	1,07	297,22
Energiebezug Erdgas	8,06	2.240,11
Energiebezug Diesel	0,30	83,40
Energiebezug gesamt	9,43	2620,73

Tabelle 5.21: Bedarf an Energieträgern pro Tonne Aluminium

### Emissionen

Die Emissionen der Stromerzeugung bleiben in diesem Schritt unberücksichtigt und werden bei der geographischen Zuordnung angewandt. Außerdem sind in der Produktion von Sekundäraluminium nur Partikelemissionen relevant [49], die im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Die Treibhausgase lassen sich den Verbrennungsprozessen zuordnen.

Diesel	83,40	kWh/t	46 kg CO <sub>2</sub> e/t
Emissionsfaktor	550	kg CO <sub>2</sub> e/MWh	
Erdgas	2.240,11	kWh/t	404 kg CO <sub>2</sub> e/t
	0,19	toe <sup>7</sup>	
Emissionsfaktor	2,1	t CO <sub>2</sub> e/toe	
			450 kg CO <sub>2</sub> e/t

Tabelle 5.22: Treibhausgasemissionen bei sekundärer Aluminiumerzeugung

<sup>7</sup> toe: tons of oil equivalent, 1 toe = 41,868 GJ

### 5.3 Kupfer

Kupfer ist ein Metall mit ausgezeichneter elektrischer Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Daher wird es – sowohl allgemein als auch im Fahrzeug - bevorzugt für elektrische Leitungen verwendet. Die wichtigsten Abbaustätten befinden sich in Chile, Peru und China, den Vereinigten Staaten von Amerika, des Weiteren in Afrika, Australien, und Kanada.

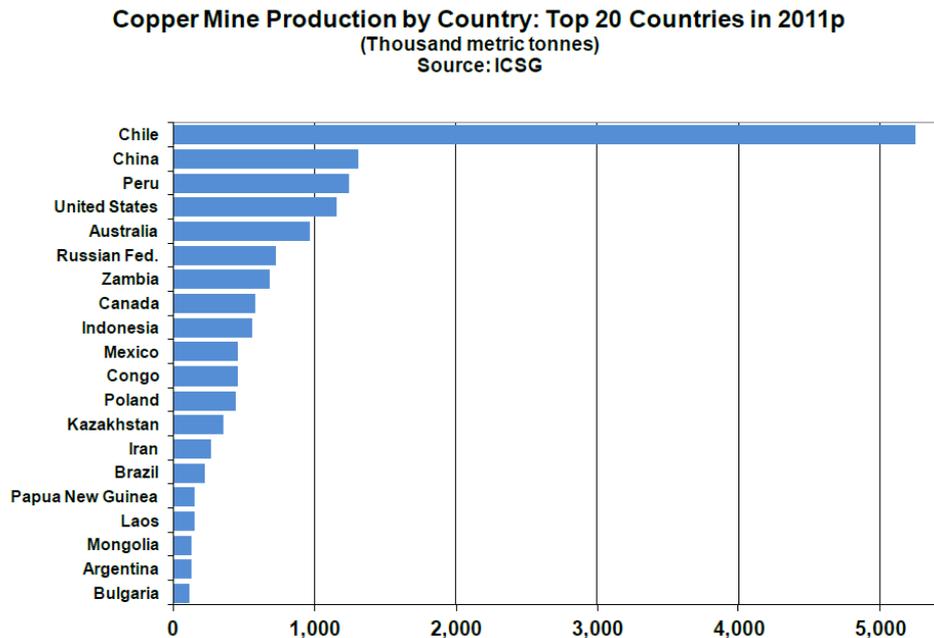


Abbildung 5.7: Kupferminenproduktion nach Ländern 2011

#### 5.3.1 Primärkupfer

##### Gewinnung und Herstellung

Aus kupferhaltigen Erzen wird, nach Brechen und Mahlen, zur Konzentration eine Schlacke hergestellt. Aus dieser wird der kupferhaltige Teil abgegossen und zum Transport getrocknet. Dieses Zwischenprodukt wird Kupferkonzentrat genannt und hat einen Reinheitsgrad von etwa 30%. In den darauf folgenden Schritten wird die Reinheit weiter erhöht, bis man bei einem Reinheitsgrad von ca. 98,5% von Garkupfer spricht. Für elektrische Anwendungen ist das noch nicht ausreichend, daher wird ein elektrolytisches Raffinationsverfahren angewendet. Bei diesem fungiert das Garkupfer als Anode gegenüber einer Reinkupferkathode. Unter elektrischer Spannung lagern sich die Kupferionen an der Kathode ab. Die fertige Kathode hat einen Fremdstoffanteil von unter 0,01%.

##### Energieaufwand und Emissionen

Für den Abbau und die Aufbereitung der Erze zu Kupferkonzentrat werden laut GEMIS in Berufung auf eine Sachbilanz der RWTH Aachen [50] die in Tabelle 5.23 angeführten Energieträger benötigt.

Energiebedarf	GJ/t
Strom	3,54
Diesel	2,70

Tabelle 5.23: Energiebedarf zur Cu-Konzentraterzeugung

Die RWTH Aachen, Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie, gibt für den folgenden Weg von Konzentrat zu kathodischem Reinkupfer den Primärenergiebedarf an, der pro Tonne Cu-Kathoden 6,3 GJ/t beträgt. Ausgehend von einem Kupferanteil von 30% im Konzentrat (d.h. 3,33 kg Konzentrat pro kg Kathode) kann man schließlich auf den gesamten Energiebedarf schließen, der in Tabelle 5.24 pro Tonne Kupfer abgebildet ist.

Schritt	Menge	Energieaufwand elektr.	Energieaufwand Diesel	Gesamtaufwand Schritt
Erzabbau, Konzentratherstellung	3,33 t	3,54 GJ/t		11,80 GJ
			2,70 GJ/t	9,00 GJ
Konzentrataufbereitung, Elektrolyse	1,00 t	6,30 GJ/t		6,30 GJ
			gesamt elektr.	18,10 GJ
			gesamt Diesel	9,00 GJ

Tabelle 5.24: Energiebedarf zur Herstellung primärer Kupferkathoden

Die direkten Emissionen dieser Prozesse fallen hauptsächlich während der Aufbereitung des Konzentrats und der Elektrolyse an und betragen 460 kg CO<sub>2</sub>/t Kathode [51]. Damit lassen sich in Tabelle 5.25 die Emissionen für eine Tonne Kathoden aufschlüsseln. Hierbei wird mit verschiedenen Emissionsfaktoren zur Stromerzeugung der Tatsache entsprochen, dass die Prozessschritte in verschiedenen Ländern ausgeführt werden. Der Emissionsfaktor von Abbau und Konzentratherstellung wird aus den Werten für Chile, Peru und China in der Abbildung 5.7 im Verhältnis 5:1:1 zusammengesetzt (1. Zeile). Für Aufbereitung und Elektrolyse wird der Wert der EU-17 von 2010 herangezogen (2. Zeile).

Energiequelle	Aufwand [GJ]	Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> e/GJ]	Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e]
elektrisch	11,80	121,2	1.430,52
elektrisch	6,30	94,6	596,00
Diesel	9,00	74	666,00
Direkte Emissionen			460,00
Gesamt			3.152,52
Ohne Stromproduktion			1262,00

Tabelle 5.25: Emissionen nach Energiequelle bei Primärerzeugung einer Tonne Kupferkathoden

### 5.3.2 Sekundärkupfer

Sekundärkupfer wird im Wesentlichen aus Schrott gewonnen. Das kupferhaltige Altmetall wird von Schrotthändlern gesammelt und weiterverkauft. Durch die anhaltende hohe Nachfrage steigen die Preise für Kupferschrott kontinuierlich. Prinzipiell kann das Eingangsmaterial in jeder Form verwertet werden, bei geringem Kupfergehalt kann der Schrott auch gemahlen als Granulat aufbereitet werden, auch Cu-haltige Flüssigkeiten wie Schlacken werden verarbeitet [52]. Im Automobilbau stammen etwa 95% des Kupfers aus sekundärer Produktion [38].

Der Energiebedarf für die Gewinnung von Kupferkathoden aus Schrott wird mit Werten zwischen 9,21 GJ/t [50] und 9,36 GJ/t [53] angegeben. Es wird im Sinne der worst-case Annahme vom höchsten Wert ausgegangen. Diese Energiemenge verteilt sich, wie in Tabelle 5.26 aufgelistet, auf mehrere Energieträger [39]:

Steinkohlenkoks	23,91%
Holz	4,25%
Erdgas	48,88%
Strom	22,95%
Gesamt	100,00%

*Tabelle 5.26: Anteil der Energieträger an der sekundären Kupferproduktion*

Laut Fraunhofer Institut [41] reduziert sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der sekundären Herstellung auf 36% in Relation zur Gewinnung aus Primärrohstoffen, allerdings - analog zu Stahl - bezogen auf die Mengen an Input. Geht man bei Primärproduktion von 98% reinem Kupfer vor der Elektrolyse aus, ergibt das bei einem Materialeinsatz von 1,02 t/t folgendes Verhältnis in Tabelle 5.27 auf der Ausgangsseite:

CO <sub>2</sub> -Verhältnis inputseitig	36,00%
Verhältnis der Materialeinsätze sekundär/primär	1,32
CO <sub>2</sub> -Verhältnis outputseitig	27,21%

*Tabelle 5.27: Umrechnung auf Outputgrößen*

Somit folgt mit dem Mengenverhältnis der systemimmanente CO<sub>2</sub>-Ausstoß:

primär	sekundär
460 kg CO <sub>2</sub> e/t	125,17 kg CO <sub>2</sub> e/t

*Tabelle 5.28: Direkte Emissionen der Kupferproduktion*

Teilt man den Energiebedarf von 9,36 GJ/t nach den Energieträgern in Tabelle 5.26 auf, erhält man die dazugehörigen Emissionen pro Tonne Kupfer in Tabelle 5.29. Dabei wird der Emissionsfaktor der Stromerzeugung für Deutschland aus Tabelle 4.6 herangezogen. Die übrigen Faktoren sind einer Veröffentlichung des deutschen Umweltbundesamtes entnommen [46].

Energiequelle	Aufwand [GJ]	Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> e/GJ]	Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e]
elektrisch	2,15	156,1	335,35
Koks	2,24	105	234,99
Holz	0,40	102	40,58
Erdgas	4,58	56	256,21
Direkte Emissionen			125,17
Gesamt			992,29
Ohne Stromproduktion			656,95

*Tabelle 5.29: Emissionen nach Energiequelle für eine Tonne sekundäres Kupfer*

## 5.4 Edelmetalle

Edelmetalle sind Elemente, die eine hohe Korrosionsbeständigkeit besitzen. Dies und auch ihr geringes Vorkommen machen sich im Preis deutlich bemerkbar. So hat Silber als häufigstes Edelmetall einen Massenanteil von rund 0,07ppm<sup>8</sup> an der Erdkruste [54].

Die in dieser Arbeit betrachteten Edelmetalle sind jene, die aufgrund ihrer Funktion als Reaktionsbeschleuniger in der Abgasnachbehandlung eingesetzt werden. Diese sogenannten Katalysatoren (von gr. κατάλυσις „Auflösung“) beschleunigen die Reaktionskinetik chemischer Prozesse, ohne sich selbst dabei chemisch zu verändern. Der Aufbau und die Funktion eines Katalysators werden in Kapitel 7.6 behandelt.

### 5.4.1 Gewinnung

In Abgaskatalysatoren kommen vor allem Platin, Palladium und Rhodium zum Einsatz. Diese Elemente der Platinmetallgruppe (PMG) treten immer zusammen auf. Sie liegen in elementarer Form in der Erdkruste vor und werden auch aus denselben Erzen gewonnen. Die Hauptabbaugebiete der PGM-Erze liegen in Südafrika und Russland [55]. Die Berechnung des Aufwandes zur Gewinnung dieser Elemente soll anhand von Platin veranschaulicht werden. Für die anderen Edelmetalle wird der idente Rechenvorgang verwendet, wobei natürlich unterschiedliche Werte für Ausbeute und Mengenanteile verwendet werden.

### 5.4.2 Platin

Da laut GEMIS Platin im „Westliche Welt Mix“ zu 93 % aus Südafrika stammt, dient der südafrikanische Prozess „Edelmetall\Pt-ZA“ als Rechengrundlage. Die folgende Abbildung 5.8 zeigt entlang der vertikalen Linie die Prozessschritte und Zwischenprodukte, von der rechten Seite fließen die für die jeweiligen Schritte notwendigen Energien zu. Auf den links dargestellten Wasserbedarf wird nicht eingegangen. Bei den Energieaufwänden werden die benötigten Mengen direkt aus den Prozessschritten entnommen, um die Vorkette der Stromerzeugung auszublenden. Die dabei anfallenden Emissionen werden in einem späteren Schritt berücksichtigt.

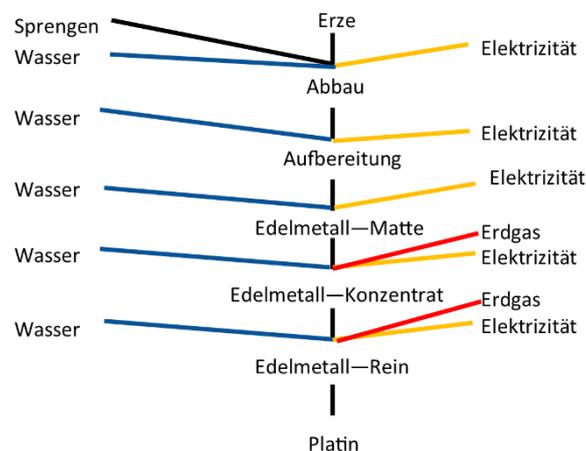


Abbildung 5.8: Produktbaum zur Gewinnung von Platin

<sup>8</sup> Parts per million

Als erster Schritt wird, ausgehend vom Endprodukt 1 kg Platin, auf die Mengen der Zwischenprodukte mithilfe der Ergiebigkeiten der jeweiligen Prozessschritte in obiger Abbildung zurückgerechnet [56].

Prozessschritt	Menge	Ergiebigkeit
Platin	1,00 kg	88,20%
Reine PGM	1,13 kg	43,48%
PGM-Konzentrat	2,61 kg	0,87%
PGM-Matte	299,72 kg	3,00%
Erzaufbereitung	9.990,83 kg	3,33%
Erzabbau	300.024,79 kg	93,80%
Erze	319.855,85 kg	

Tabelle 5.30: Mengen der Zwischenprodukte der Platingewinnung

Damit sind die Mengen in den einzelnen Stadien bekannt und können mit den jeweiligen spezifischen Energieverbräuchen auf den gesamten energetischen Aufwand pro Kilogramm Reinplatin aufsummiert werden.

Schritt	Menge	Energieaufwand elektr.	Energieaufwand Gas	Gesamtaufwand Schritt
Erze zu Abbau	300.024,79 kg	0,1332 MJ/kg		39.963,30 MJ
Abbau zu Aufbereitung	9.990,83 kg	3,276 MJ/kg		32.729,94 MJ
Aufbereitung zu Matte	299,72 kg	81,598 MJ/kg		24.456,94 MJ
Matte zu Konzentrat	2,61 kg	2400,1 MJ/kg		6.258,51 MJ
			1670 MJ/kg	4.354,70 MJ
Konzentrat zu Reinmetall	1,13 kg	1651,3 MJ/kg		1.872,22 MJ
			776,16 MJ/kg	880,00 MJ
			gesamt el.	105.280,92 MJ
			gesamt Gas	5.234,70 MJ

Tabelle 5.31: Energetischer Aufwand der Schritte der Platingewinnung

Geht man wie oben beschlossen von südafrikanischem Platin aus, können mit den Werten aus obiger Tabelle 5.31 und Tabelle 4.6 Emissionen für die Stromerzeugung von 30 t CO<sub>2e</sub> pro Kilogramm Platin ermittelt werden. Das Erdgas wird zu Heizzwecken benötigt, daher wird es separat betrachtet und mit den von der Europäischen Kommission veröffentlichten Emissionswerten [23] beaufschlagt. Tabelle 5.32 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung.

elektrisch	105.281	MJ/kg	28.567 kg CO <sub>2</sub> e/kg
Emissionsfaktor:	271	g CO <sub>2</sub> e/MJ	
Erdgas	5.235	MJ/kg	263 kg CO <sub>2</sub> e/kg
	0,13	toe	
Emissionsfaktor:	2,1	t CO <sub>2</sub> e/toe	
			28.829 kg CO <sub>2</sub> e/kg

Tabelle 5.32: Treibhausgasemissionen der Platingewinnung

#### 5.4.3 Rhodium

Platingruppenmetalle werden analog ermittelt. Bei Rhodium ändert sich nur der (in der Prozesskette) letzte Faktor für die Trennung des Metalls von den übrigen PGM von 88,2% auf 83,3%, der Energiebedarf und die Emissionen sind in folgender Tabelle zusammengefasst. Auch hier wird wieder ausschließlich die südafrikanische Gewinnung betrachtet, da sie mit über 90% im „Westliche Welt Mix“ dominiert.

elektrisch	111.474	MJ	30.247 kg CO <sub>2</sub> e/kg
Emissionsfaktor:	271	g CO <sub>2</sub> e/MJ	
Erdgas	5.543	MJ	278 kg CO <sub>2</sub> e/kg
	0,13	toe	
Emissionsfaktor:	2,1	t CO <sub>2</sub> e/toe	
			30.525 kg CO <sub>2</sub> e/kg

Tabelle 5.33: Energieaufwand und Emissionen der Rhodiumherstellung

## 5.5 Lithiumoxide

Lithium ist das Grundmaterial von Li-Ionen-Batterien. Es ist ein relativ seltenes Metall (0,006% in der Erdkruste) und kommt nicht in Reinform vor, da es sehr leicht reagiert. Die Förderung konzentriert sich daher auf die Gewinnung von Lithiumverbindungen aus Erzen, Salzseen und Meerwasser. Der Erzabbau findet hauptsächlich in Australien, Kanada und Brasilien statt, während die Gewinnung aus Salzseen in Chile, China, Argentinien und den Vereinigten Staaten vorgezogen wird. Die Gewinnung konzentriert sich auf die Extraktion von Lithiumkarbonat ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), dieses wird auch direkt in Batterien verwendet. Man geht davon aus, dass das größte Vorkommen im Uyuni-Salzsee von Bolivien liegt [57].

Die Herstellung aus Lake sieht in allen Technologien eine Verdampfung vor, teilweise in Verbindung mit der Beigabe von Additiven, um gewisse Verbindungen ausscheiden zu lassen. Die konzentrierte Salzlake wird anschließend gereinigt und mit Natriumkarbonat versetzt, womit sich Lithiumkarbonat absetzt. Die Nutzung von Sonnenenergie für den Verdampfungsprozess ist ein wichtiger Beitrag zur Reduktion des Energieverbrauchs. Die Vorgehensweisen der angeführten Verfahren werden in Abbildung 5.9 [57] verdeutlicht.

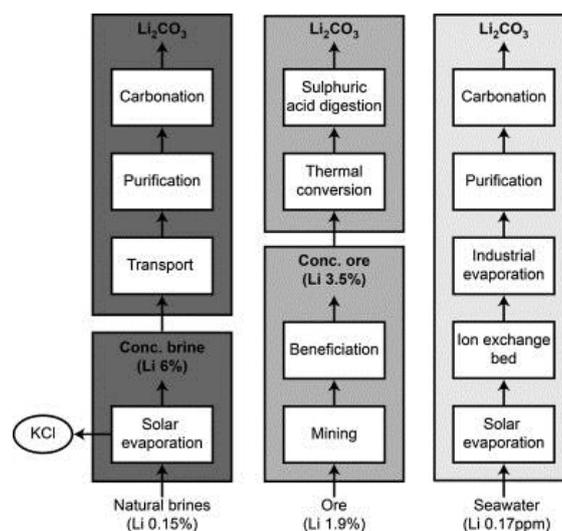


Abbildung 5.9: Methoden der Lithiumkarbonatgewinnung

Zur Gewinnung aus Salzseen liegen Daten zum energetischen Aufwand vor, der in zwei Szenarien unter guten sowie ungünstigen Bedingungen berechnet wurde. Unterschieden wird hierbei in der Verdampfungsrate. Im günstigen Fall liefert die Sonne die dazu nötige Energie, im ungünstigen Fall muss die Hälfte der benötigten Wärme durch einen Heizprozess zur Verfügung gestellt werden. Dabei müssen 148 kg Wasser verdampft werden, um 1 kg sechsprozentige Li-Sole zu erhalten [57]. Die Hälfte des Wassers wird nun durch einen Prozess verdampft. Die Energie dazu wird aus der Verdampfungsenthalpie des Wassers und dem Temperaturunterschied berechnet. Die Resultate sind in den folgenden Tabellen dargestellt, beginnend mit der Verdampfung in Tabelle 5.34 [57].

Energiebedarf zur Konzentration [MJ]	Bedingungen	
	günstig	ungünstig
Diesel	0,115	0,115
Elektrizität	0,026	0,026
Wärme (Erdgas)	0,000	192,000
Gesamt	0,141	192,141

Tabelle 5.34: Energieaufwand zur Gewinnung von 1kg Sole mit 6% Li-Gehalt

Diesel	1,880	MJ
Elektrizität	2,088	MJ
Erdgas	2,960	MJ
Gesamt	6,928	MJ

Tabelle 5.35: Energieaufwand zur Herstellung von 1 kg  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  aus konzentrierter Sole

Mit einem Bedarf von 4,19 kg Lake und durch Beigabe von Zusatzstoffen wird ein Kilogramm  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  hergestellt. (siehe Tabelle 5.36) und der gesamte Energieaufwand kann berechnet werden.

Schritt	Menge	Energieaufwand Diesel	Energieaufwand elektr.	Energieaufwand Gas	Gesamtaufwand Schritt
Konzentration	4,19 kg	0,115 MJ/kg			0,48 MJ
			0,026 MJ/kg		0,11 MJ
				0,000 MJ/kg	0,00 MJ
Verarbeitung	1,00 kg	1,880 MJ/kg			1,88 MJ
			2,088 MJ/kg		2,09 MJ
				2,960 MJ/kg	2,96 MJ
				Gesamt el.	2,20 MJ
				Gesamt Gas	2,96 MJ
				Gesamt Diesel	2,36 MJ

Tabelle 5.36: Energieaufwand zur Herstellung von 1 kg  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  aus Salzseen unter günstigen Bedingungen

Wird Lithiumkarbonat im Bergbau gewonnen, wird dafür fast ausschließlich im Tagebauverfahren gearbeitet. Lithium ist in mehreren Mineralen vorhanden, wovon aber nur Spodumen  $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$  und Petalit  $\text{LiAl}[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$  von wirtschaftlichem Interesse sind [58]. Der Energieaufwand für den Abbau und die Konzentration von Spodumen ist in Tabelle 5.37 dargestellt [57].

Den Unterschied zwischen günstigen und ungünstigen Bedingungen bestimmt der Metallgehalt des Erzes. So muss im ungünstigen Fall mehr Material abgebaut werden, um dieselbe Menge konzentriertes Erz zu erhalten.

Energiebedarf Abbau und Konzentration [MJ]	Bedingungen	
	günstig	ungünstig
Diesel	0,079	0,452
Elektrizität	0,042	0,136
Gesamt	0,121	0,588

Tabelle 5.37: Energieaufwand für den Abbau und die Konzentration von Spodumen

Die treibhausrelevanten Emissionen und der kumulierte Energieaufwand inklusive Wirkungsgrade der Elektrizitätserzeugung werden von [57] in Tabelle 5.38 zusammengefasst und beziehen sich auf 1 kg  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Die dritte Spalte „% von Lake“ gibt den Energiebedarf relativ zu dem der  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ -Gewinnung aus Salzseen unter günstigen Bedingungen an.

Günstige Bedingungen	Kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar		GWP (Global Warming Potential), 100a	
	[MJ]	[% von Lake, günstige Bedingungen]	[kg $\text{CO}_2\text{e}$ ]	[% von Lake, günstige Bedingungen]
Aus Salzseen	28.43	100	2.02	100
Aus Spodumen	33.87	119.15	2.27	112.14
Aus Meerwasser	2099.63	7386.02	118.59	5868.73
Ungünstige Bedingungen	Kumulativer Energieaufwand, nicht erneuerbar		GWP (Global Warming Potential), 100a	
	[MJ]	[% von Lake, günstige Bedingungen]	[kg $\text{CO}_2\text{e}$ ]	[% von Lake, günstige Bedingungen]
Aus Salzseen	1285.05	4520.52	82.01	4058.67
Aus Spodumen	38.95	137.03	2.62	129.67
Aus Meerwasser	14129.77	49705.33	746.97	36965.55

Tabelle 5.38: Treibhauspotential und KEA von  $\text{Li}_2\text{CO}_3$

## 5.6 Zusammenfassung

Am Ende dieses Kapitels sollen die Emissionen und der energetische Aufwand, der zur Gewinnung der betrachteten Materialien benötigt wird, übersichtlich in Tabellen zusammengefasst werden.

Stoff	thermischer Energiebedarf [MJ/kg]	elektr. Energiebedarf [MJ/kg]	spez. Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e/kg]
Pt	5.234,70	105.280,92	28.829
Rh	5.542,62	111.473,92	30.525

Tabelle 5.39: Energieaufwand zur Gewinnung ausgewählter Edelmetalle

	Primärproduktion					
	Energieverbrauch [GJ/t]					THG-Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e/t]
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere	
Stahl	13,6	10,0	6,6	3,7	6,1	2.500
Aluminium	56,0	7,1	11,1		4,3	3.910
Kupfer	18,1	9,0				1.126
Platin	105.280,9		5.234,7			262.560
Rhodium	111.474,9		5.524,6			278.005

Tabelle 5.40: Energieaufwand und Emissionen zur Produktion verschiedener Werkstoffe, primär

	Sekundärproduktion					
	Energieverbrauch [GJ/t]					THG-Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e/t]
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere	
Stahl	1,8		0,2		0,3	1.150
Aluminium	1,1	0,3	8,1			450
Kupfer	2,2		4,6	2,2	0,4	657

Tabelle 5.41: Energieaufwand und Emissionen zur Produktion verschiedener Werkstoffe, sekundär

Zu Tabelle 5.40 und Tabelle 5.41 sind folgende Anmerkungen notwendig:

- Die angeführten Emissionen beinhalten in keinem Fall die bei der Stromerzeugung anfallenden Abgase. Daher kommt es bei Prozessen mit hohem Strombedarf zu starken Abweichungen. Um hier einen Vergleich zu ermöglichen, wird in Tabelle 5.42 die Berechnung der gesamten Treibhausgasemission für ein Kilogramm Werkstoff gezeigt. Dabei wird der niedrigste (Norwegen, 32 g/kWh) und der höchste (Südafrika, 977 g/kWh) Emissionsfaktor verwendet.
- Die Werte für Primärstahl ergeben sich mit der Aufteilung des Bedarfs der Erzgewinnung in Elektrizität und Diesel zu gleichen Teilen nach GEMIS.

THG-Emissionen [kg CO2e/t]	Stahl	Aluminium	Kupfer	Platin	Rhodium
Prozess	2.500,00	3.910,00	1.126,00	262.560,00	278.005,00
Stromerzeugung Norwegen	120,89	497,78	160,89	935.830,22	990.888,00
Stromerzeugung Südafrika	3.690,89	15.197,78	4.912,14	28.572.066,47	30.253.049,25
Gesamt Norwegen	2.620,89	4.407,78	1.286,89	1.198.390,22	1.268.893,00
Gesamt Südafrika	6.190,89	19.107,78	6.038,14	28.834.626,47	30.531.054,25

Tabelle 5.42: Vergleich der THG-Emissionen für zwei Länder mit extremen Emissionsfaktoren für die Stromerzeugung

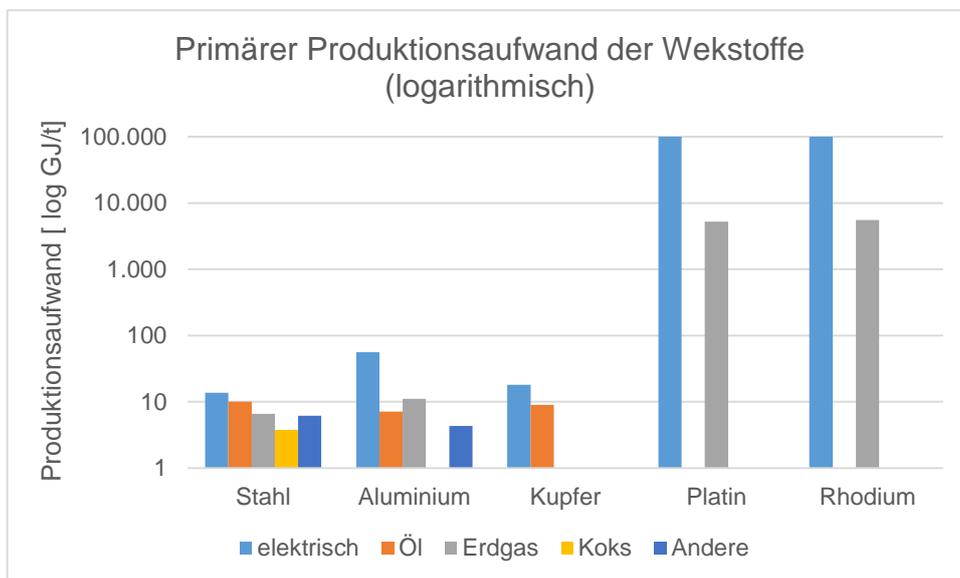


Abbildung 5.10: Energieaufwand der primären Herstellung verschiedener Werkstoffe

## 6 Umweltauswirkungen verschiedener Fertigungsprozesse

Bevor im nächsten Kapitel die Fertigung der Antriebsstrangkomponenten betrachtet wird, ist es nötig auszuschweifen. Der Fertigungsaufwand wird hauptsächlich aus Umweltreporten und Nachhaltigkeitsberichten der Hersteller ermittelt, jedoch sind hierbei die geschmiedeten oder gegossenen Rohteile nicht Teil dieser Betrachtung, da der Gussprozess ausgelagert wurde oder keine Werksangaben verfügbar waren. Deshalb werden umweltintensive Fertigungsverfahren im Rahmen dieser Arbeit getrennt betrachtet, um ihren Einfluss auf den gesamten Fertigungsaufwand berücksichtigen zu können. Dabei wurde die Betrachtung auf industrielle Schmiedeprozesse und Gießverfahren konzentriert, da sie, vor allem durch die benötigte Wärme, zu den energieintensivsten Fertigungsverfahren gehören. Der Energieaufwand des Schmiedens für Getriebeteile wird in [59] mit etwa 17% des gesamten Fertigungsaufwands berechnet.

### 6.1 Gießen

Die Daten für Gussprozesse werden aus dem GaBi Programm [2] zur Erstellung von Umweltbilanzen entnommen und sind in Tabelle 6.1 angeführt. Die Angaben mit Gewichtseinheiten werden mit den jeweiligen Heizwerten auf Energie umgerechnet und gelten für jeweils ein Kilogramm Gussteil als Endprodukt.

Energie [MJ/kg]	Elektrizität	Erdgas	Benzin	Diesel	Wärme	Bitumenkohle	Summe nicht elektrisch	Gesamt
Aluminium Präzisionsguss	15,4	33,516					33,52	48,92
Sandguss Eisen	4,30	0,007	9,32E-03	3,39E-02		2,29	2,34	6,64
Aluminiumguss in verl. Formen	6,84	14,724					14,72	21,56
semi permanent mold Aluminium	6,91	33,012					33,01	39,92

Tabelle 6.1: Energieaufwand verschiedener Gießprozesse

Zur Umrechnung wurden folgende Werte verwendet:

Heizwert Erdgas	10 kWh/m <sup>3</sup>
Heizwert Benzin	40,5 MJ/L
Dichte Benzin	0,775 kg/L
Heizwert Diesel	35 MJ/L
Heizwert Bitumenkohle	8 kWh/kg

Die Emissionen dafür wurden ebenfalls direkt den Prozessen entnommen und können in Tabelle 6.2 abgelesen werden.

	CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg CO <sub>2</sub> /kg]
Aluminium Präzisionsguss	1,22
Sandguss Eisen	k.A.
Aluminiumguss in verl. Formen	0,899
semi permanent mold Aluminium	1,12

Tabelle 6.2: Kohlendioxidemissionen verschiedener Gießprozesse

Semi permanent mold ist ein Verfahren, bei dem in Dauerformen gegossen wird, aber die verwendeten Kerne für einen bis wenige Gusse halten.

## 6.2 Schmieden

Schmieden ist ein mechanisches Umformverfahren. Das Werkstück wird erhitzt und zwischen zwei Werkzeugen in die gewünschte Form gebracht. Wegen des Energiebedarfs, der zum Erwärmen der Werkstücke und für die Formänderung benötigt wird, bedarf der Prozess einer genaueren Betrachtung.

Da es viele Varianten des Schmiedens gibt, sowohl wegen der verwendeten Werkstoffe als auch wegen der unterschiedlichen Verfahren, werden allgemeine Betrachtungen herangezogen. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt liefert in [60] den Wert vom 3 MJ/kg zum Hochtemperaturschmieden von Stahl und merkt an, dass dies nur für das Erwärmen gilt und mindestens 25% der Gesamtleistung ausmacht. Dies stimmt mit [61] und [62] in der Größenordnung überein, wo hier 2,19 MJ/t beziehungsweise 2,01 MJ/t zum Erhitzen veranschlagt werden. Damit wird der Aufwand zum Heizen auf den Mittelwert festgesetzt und mit einem 25%-Anteil am gesamten Energiebedarf angenommen. Damit ergeben sich die in Tabelle 6.3 angeführten Werte. Zu prozessimmanenten Emissionen konnten keine Angaben ermittelt werden.

Energiebedarf Stahl Schmieden	
Erhitzen	2,4 MJ/kg
Umformen	7,2 MJ/kg
Gesamt	9,6 MJ/kg

Tabelle 6.3: Energiebedarf zum Schmieden von Stahl

## 7 Komponenten

In diesem Kapitel sollen die einzelnen Komponenten, die in Antriebsstrangkonfigurationen auftreten, hinsichtlich des Energieaufwands der Herstellung und den damit zusammenhängenden Emissionen betrachtet werden. Die Komponenten variieren in Größe und Gewicht mit den Anforderungen, die vom Fahrzeug gestellt werden. Daher werden PKW ihrer Größe nach in Segmente unterteilt, um Vergleiche zwischen ähnlichen Fahrzeugen (und deren Komponenten) zu ermöglichen. Die Einteilung nach Verordnung (EG) Nr. 1400/2002 der Europäischen Kommission [63, p. 82] ist in Tabelle 7.1 abgebildet

Fahrzeugsegment	Bezeichnung	Beispiele
A	Kleinstwagen	Smart, VW Up!
B	Kleinwagen	Fiat Punto, VW Polo
C	Mittelklasse	VW Golf
D	Obere Mittelklasse	Audi A4, Volvo S70
E	Oberklasse	Mercedes E-Klasse, BMW 5er
F	Luxusklasse	Mercedes S-Klasse, BMW 7er
S	Sportwagen	Porsche 911
M	Mehrzweckfahrzeuge (oder MPV-Van)	Fiat Ulysse, VW Transporter, Renault Espace
J	Geländewagen (Sport Utility Vehicle - SUV) einschließlich Fahrzeuge mit Allradantrieb	VW Touareg, Jeep, Land Rover, Suzuki Vitara

*Tabelle 7.1: Übersicht der Fahrzeugsegmente*

## 7.1 Verbrennungsmotoren

Der Motor als Herzstück des konventionellen Antriebsstrangs zeichnet sich durch eine Vielfalt an Konzepten und Varianten aus. Angefangen mit großvolumigen Motoren über Direkteinspritzer zeigt sich eine Tendenz zu Aggregaten mit wenig Hubraum und Aufladung, die auch durch die Verschärfung der Abgasnormen zu erklären ist.

### 7.1.1 Gewicht

Als Querschnitt soll folgende Tabelle Gewicht und Leistung mehrerer Motoren unterschiedlichen Alters und Konzepts abbilden.

Typ	Bezeichnung	Leistung [kW]	Gewicht	Baujahr
4-Zyl Otto	VW EA211 1.2 TSI	63-77	97 kg	lfd
	VW EA211 1.4 TSI	103	106 kg	lfd
	Hyundai Theta 2.0L	107	134 kg	2004-lfd
	Hyundai Theta 2.4L	122	146 kg	2004-lfd
	Audi 1.8 R4 20vT	110-221	149 kg	lfd
	BMW M43	75	82 kg	1991-2000
	BMW N43	105-125	91 kg	2007-2011
	BMW N45	85	95 kg	2004-2011
	6-zyl Otto	BMW N52N 2.5L	130-160	112 kg
BMW N52N 3.0L		160-200	121 kg	2004-2011
3-Zyl Diesel	VW 1.2 R3 PD TDI 3L	33-45	100 kg	1999-2005
4-Zyl Diesel	BMW N47	100	100-149 kg	2007-lfd
	VW 1.9 R4 SDI	29-50	150-198 kg	1991-lfd
6-zyl Diesel	VW D24	60	182 kg	1978-1995
	BMW M57	150	150 kg	1998-lfd

*Tabelle 7.2: Gewicht und Leistung mehrerer Verbrennungsmotoren*

Ein Zusammenhang zwischen Masse und Leistung ist schwer festzustellen, was sich durch den Unterschied in Konzept, Baujahr und damit verbundenen technologischem Fortschritt erklären lässt. Betrachtet man aus der Tabelle nur die Motoren ab Produktionsjahr 2004, lässt sich das Gewicht über der Leistung als Diagramm darstellen. Es wurde in Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2 versucht, eine Annäherung über eine Trendlinie zweiter Ordnung herzustellen. Allerdings ist diese Vorgehensweise zu ungenau. Betrachtet man zusätzlich nur die vierzylindrigen Ottomotoren, verbessert sich dies, ist aber als Herangehensweise immer noch nicht exakt genug.

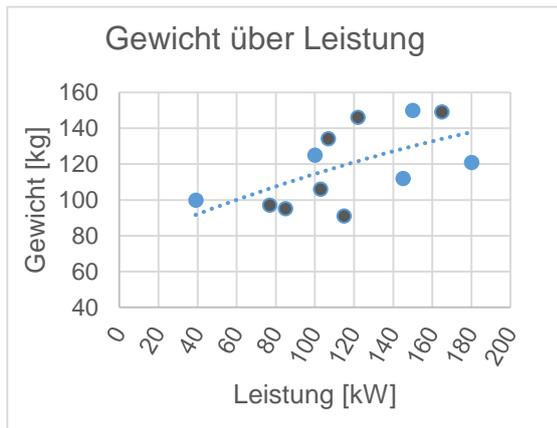


Abbildung 7.2: Gewicht und Leistung verschiedener VKM, in grau die 4-Zyl. Ottomotoren.

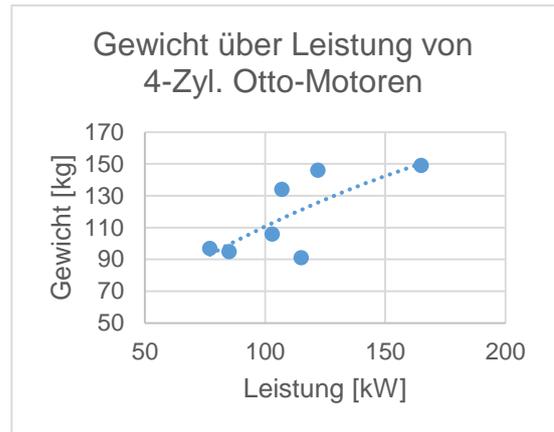


Abbildung 7.1: Gewicht und Leistung ausgewählter 4-Zyl. - Ottomotoren

Die vorherige Überlegung zeigt, dass es nicht möglich ist, einen Zusammenhang zwischen Leistung und Gewicht innerhalb eines akzeptablen Toleranzbereichs herzustellen. Daher wird mit gemittelten Werten fortgefahren. Nach gründlicher Recherche vieler Quellen können in Abbildung 7.3 Durchschnittswerte für Motorengewichte, sortiert nach Fahrzeugklasse, angegeben werden. Diese Werte trennen jedoch nicht nach Kraftstoff, daher können keine Unterschiede zwischen Otto- und Dieselmotoren angegeben werden. Die durchschnittliche Leistung wurde ebenso innerhalb dieser Segmente ermittelt, wobei in der Oberklasse (C) und bei den Geländewagen (J) zwischen Benzin- und Dieselmotor unterschieden wird.

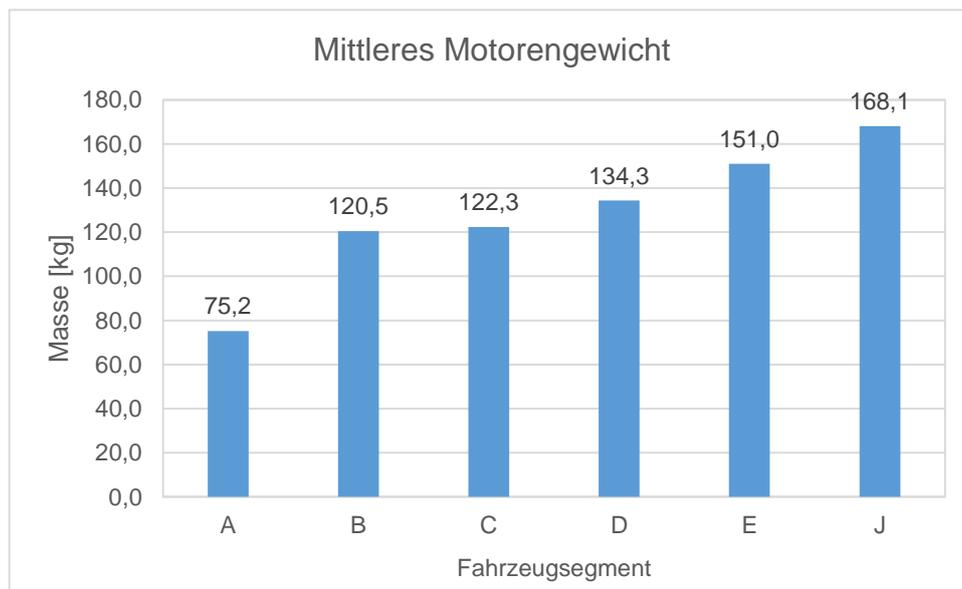


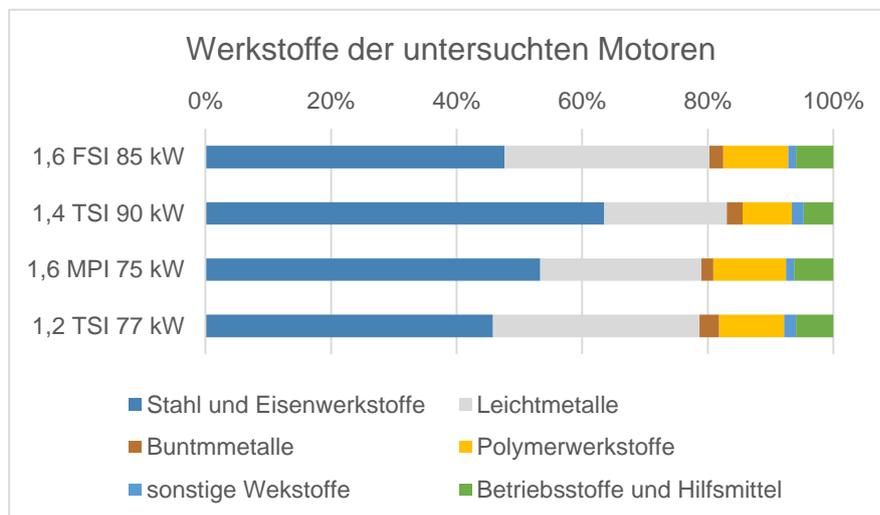
Abbildung 7.3: Mittleres Gewicht der Motoren, nach Fahrzeugsegment

Segment	A	B	C	D	E	J
Ø Motorgewicht [kg]	75,2	120,5	122,3	134,3	151,0	168,1
Ø Leistung [kW]	50	58	73/76	107/114	114	98,5/104

Tabelle 7.3: Durchschnittliche Motormasse und -leistung nach Fahrzeugklasse

### 7.1.2 Materialbeschaffenheit

Für die Berechnung des Energieverbrauchs und der anfallenden Treibhausgasemissionen entlang des Lebensweges ist es notwendig zu wissen, aus welchen Materialien ein Motor besteht und in welchem Ausmaß sie verwendet werden. Abbildung 7.4 liefert eine solche Werkstoffverteilung für kleinere Ottomotoren des Volkswagen-Konzerns [64].



Dabei lässt sich der vergleichsweise hohe Anteil an Stahl- und Eisenwerkstoffen des 1,4 TSI in erster Linie dadurch erklären, dass er als eine Besonderheit ein Zylinderkurbelgehäuse aus Grauguss aufweist.

Abbildung 7.4: Werkstoffverteilung von Ottomotoren

Um später den Komponenten Fertigungsschritte zuweisen zu können, muss noch deren Anteil am Gesamtgewicht bestimmt werden. Diese Verteilung der Masse auf die einzelnen Komponenten ist in Tabelle 7.4 dargestellt [59].

Komponente	Gewicht [kg]	Gew.-Anteil [%]
Kurbelgehäuse	29,73	52,09%
Kurbelwelle	8,27	14,49%
Zylinderkopf	8,01	14,03%
Schwungrad	6,35	11,12%
Nockenwelle	2,19	3,83%
Pleuel	1,49	2,61%
Zahnkranz	0,51	0,88%
Stößel	0,31	0,53%
Einlassventile	0,24	0,42%
Gesamt	57,08	100,00%

Tabelle 7.4: Gewichtsanteile der Komponenten eines Basismotors

### 7.1.3 Energieverbrauch und Emissionen für die Produktion

Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen lassen sich aus den Umweltberichten der deutschen Autohersteller ableiten.

Betrachtet man den Umweltbericht Salzgitter der Volkswagen AG [65], der bereits den von Volkswagen verwendeten Strommix enthält, erhält man die in Tabelle 7.6 abgebildeten Werte. Die Stromerzeugung ist in den Treibhausgasemissionen noch nicht enthalten, sie wird bei der Zusammensetzung der Komponenten zu Antriebsstrangvarianten berücksichtigt.

Anzahl Motoren	1.596.226
Energieverbrauch [MWh]	427.391
davon elektrisch [MWh]	279.679
CO <sub>2</sub> e Ausstoß [t CO <sub>2</sub> e]	47.382

Tabelle 7.6: Kennzahlen des Motorenwerks Salzgitter

	Energieverbrauch [MWh]	CO <sub>2</sub> e Ausstoß [t CO <sub>2</sub> e]
gesamt	427.391,00	47.382,00
pro Motor	0,267	0,0297

Tabelle 7.5: Spezifische Kennzahlen, Werk Salzgitter

Auch BMW erstellt jährlich Umweltberichte, aus denen sich die erforderlichen Werte ermitteln lassen [66].

Der Bedarf an Energie ist in Tabelle 7.10 aufgeschlüsselt, wobei die Treibstoffe vorher nach Tabelle 7.7 zusammengefasst wurden. Dem gegenüber stehen auf der Ausgangsseite die gefertigten Motoren und die Abgasemissionen.

	Diesel	Benzin
Verbrauch [L]	2.038.578	303.601
Heizwert [MJ/kg]	42,5	40,95
Dichte [kg/L]	0,82	0,72
Verbrauch [MWh]	19.735	2.486

Tabelle 7.7: Energieinhalt der verwendeten Treibstoffe, BMW Steyr

	Energieverbrauch [MWh]	CO <sub>2</sub> Ausstoß [t CO <sub>2</sub> e]
gesamt	240.330,00	23.511,19
pro Motor	0,2320	0,0227

Tabelle 7.8: Energiebedarf BMW Steyr 2011

Output	Anzahl
4-Zyl. Motoren	423.125
6-Zyl. Motoren	612.774
Gesamt	1.035.899

Tabelle 7.9: Output BMW Steyr 2011

Da der Volkswagen Konzern eigene Gießereien in Kassel und Hannover betreibt, ist davon auszugehen, dass die Fertigung der Rohteile nicht im Report inkludiert ist. Da die dortigen energetischen Werte denen von BMW sehr ähnlich sind, muss das auch dort der Fall sein. Damit ist in diesen Werken keine Gießerei und Schmiede inkludiert. Diese Werte wurden in Kapitel 6 ermittelt und sind in den dortigen Tabellen abzulesen.

Energie	MWh
Elektro extern	138.000
Erdgas	102.000
Heizöl EL	330
Prüfstandtreibstoffe	22.221
Gesamt	262.551

Tabelle 7.10: Energieträger im BMW-Werk Steyr

Als Grundlage der Berechnung des Produktionsaufwands dient die Materialverteilung aus Tabelle 7.4. Den Komponenten wird ein Werkstoff zugeteilt und bedarfsweise, zusätzlich zur mechanischen Fertigung, einer der energieintensiven Umformungsprozesse der Rohteilfertigung. Diese Aufteilung wird in Tabelle 7.11 zusammengefasst. Zusätzlich werden nach Abbildung 7.4 vier Prozent des Gewichts in Form von Kupfer hinzugefügt. Kunststoffe werden nicht berücksichtigt.

Danach wird der Energiebedarf des Gießens und Schmiedens ermittelt, der dabei auftretende Materialschwund fließt in die folgende Berechnung der Materialbereitstellung mit ein. Damit sind alle Schritte bestimmt und werden zum Gesamtenergieaufwand addiert.

Komponente	Kurbelgehäuse	Zylinderkopf	Kurbelwelle	Nockenwelle	Pleuel	Schwungrad	Zahnkranz	Stößel	Einlassventile
Material	A	A	S	S	S	S	S	S	S
Fertigung	g	g	s	s	s	g	g	m	m
	Aluguss	Aluguss	Stahlschmieden	Stahlschmieden	Stahlschmieden	Stahlguss	Stahlguss	mech	mech

S... Stahl  
A... Aluminium  
g... gießen  
s... schmieden

Tabelle 7.11: Motorkomponenten, Materialien und Fertigungsschritte

Falls Kurbel- und Nockenwelle gegossen werden, reduziert sich der Energiebedarf nur gering; bei 100 kg Motorgewicht werden 30 MJ weniger benötigt ( $\Delta = -0,25\%$ ). Daher wird hier nicht weiter auf diese Varianz eingegangen.

Durch Variation des Gewichtes erhält man als Resultat der Berechnung einen Zusammenhang zwischen Energieaufwand und Masse des Motors. Der Energiebedarf bezieht sich auf alle Schritte von der Rohstoffgewinnung bis zum Verlassen des Werks (sog. Cradle-to-Gate Betrachtung). Die Resultate sind in Tabelle 7.12 dargestellt und für den Bereich von 70 bis 130 Kilogramm in Abbildung 7.5 grafisch als Gesamtwert und spezifisch dargestellt.

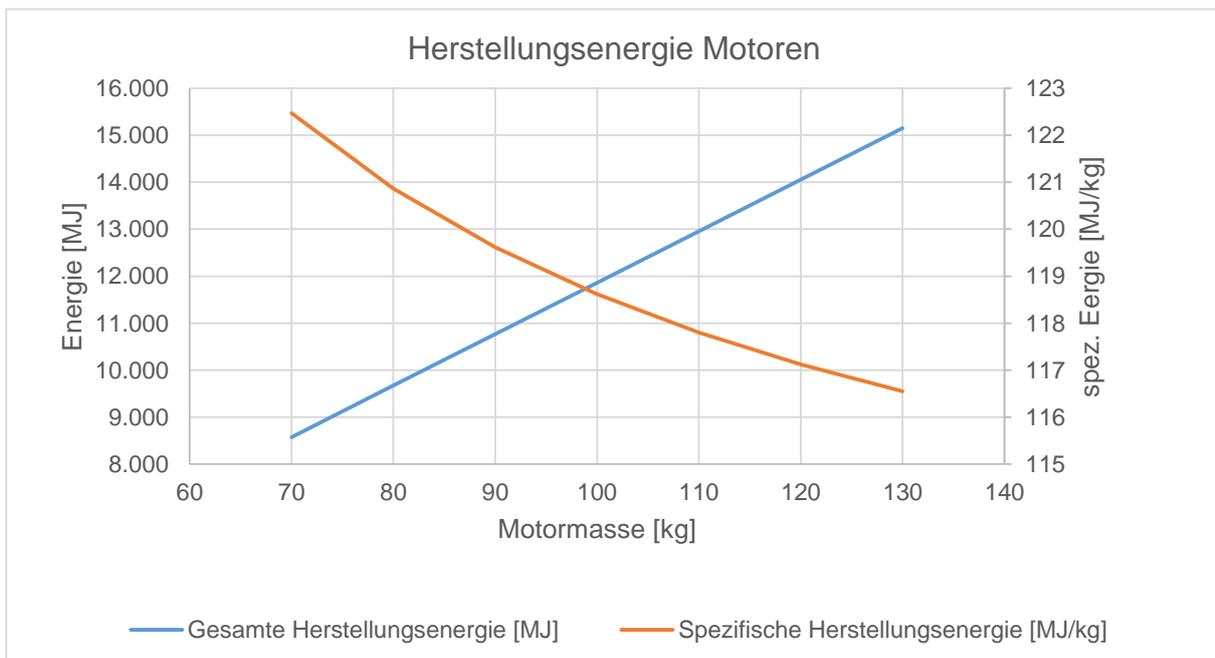


Abbildung 7.5: Spezifische und gesamte Herstellungsenergie von Motoren, Cradle to Gate

Motorengewicht [kg]	70	80	90	100	110	120	130
Gesamte Herstellungsenergie [MJ]	8.572,80	9.669,17	10.765,54	11.861,91	12.958,28	14.054,65	15.151,02
Spezifische Herstellungsenergie [MJ/kg]	122,47	120,86	119,62	118,62	117,80	117,12	116,55

Tabelle 7.12: Energieaufwand der Motorenherstellung, Cradle-to-Gate

Die Abhängigkeit der spezifischen Produktionsenergie vom Gewicht muss näher erklärt werden. Die Berechnung erfolgt durch Bezug der Gesamtenergie auf die Motormasse, wobei sich die Gesamtenergie aus den Aufwänden der einzelnen Arbeitsschritte zusammensetzt. Diese sind ebenfalls auf das Gewicht des Motors bezogen, nur der Aufwand der mechanischen Fertigung wird stückweise angegeben. Dies stellt einen konstanten Faktor dar, der bei geringerer Masse schwerer ins Gewicht fällt. Wenn die mechanische Fertigung nicht berücksichtigt wird, ist der spezifische Produktionsaufwand konstant.

Zusätzlich ist es möglich, Abbildung 7.5 nach den Energieträgern aufzuschlüsseln, indem man die Aufteilung in den einzelnen Prozessmodulen vornimmt. Damit kann über jeden Energieträger summiert werden. Das Resultat ist in Abbildung 7.6 unten dargestellt. Die Zahlenwerte dazu sind Tabelle 7.13 zusätzlich aufgeführt.

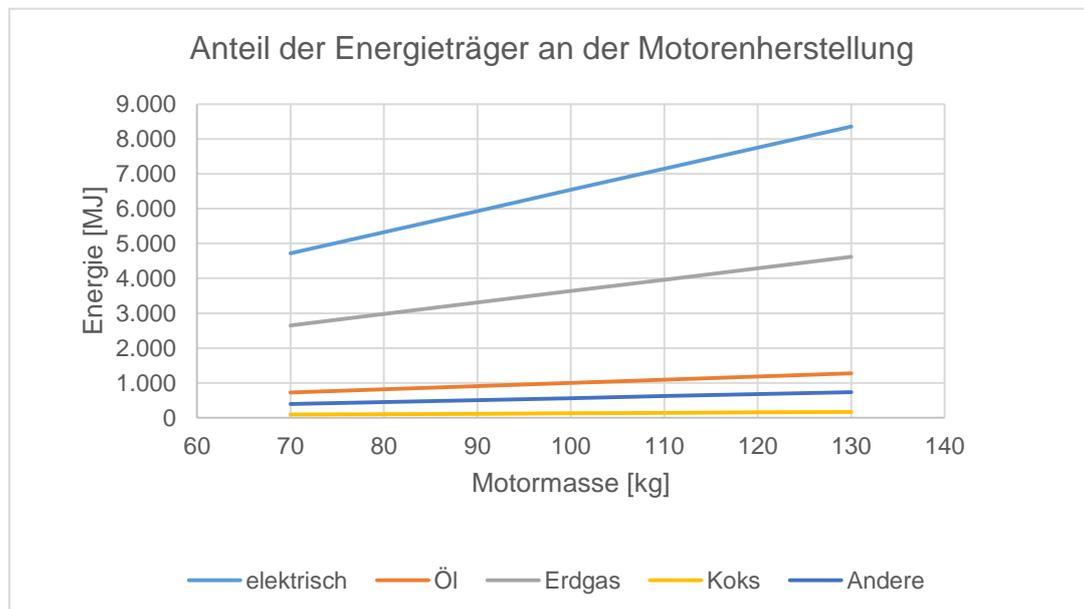


Abbildung 7.6: Energieaufwand der Motorenproduktion abhängig vom Gewicht, aufgeteilt nach Energieträger, rein primäre Werkstoffe

		Gewicht [kg]						
		70	80	90	100	110	120	130
Energiebedarf [MJ]	elektrisch	4.718,34	5.325,05	5.931,76	6.538,47	7.145,18	7.751,88	8.358,59
	Öl	722,39	814,38	906,38	998,38	1.090,38	1.182,38	1.274,38
	Erdgas	2.647,64	2.976,10	3.304,56	3.633,02	3.961,48	4.289,94	4.618,40
	Koks	88,99	101,71	114,42	127,13	139,85	152,56	165,27
	Andere	394,85	451,26	507,66	564,07	620,48	676,88	733,29
	Gesamt	8.572,21	9.668,50	10.764,79	11.861,07	12.957,36	14.053,65	15.149,94

*Tabelle 7.13: Energieverbrauch der Motorenproduktion nach Energieträger*

Die ausführliche Berechnung ist im Anhang (Kapitel 15.1) angeführt.



	A - Klasse	B - Klasse	C - Klasse	D - Klasse	E - Klasse	F - Klasse	M - Klasse	J - Klasse
Ø Getriebe- gewicht [kg]	43,6	59,4	68,7	72,6	116,8	142,5	100,5	157,0

Tabelle 7.14: Mittlere Getriebebewichte nach Fahrzeugklasse

### Schaltgetriebe

Für manuelle Getriebe liegt eine Sachbilanz der Volkswagen AG für den Golf 4 vor. Darin wird neben den im vorherigen Kapitel behandelten Motoren auch das dort verbaute Getriebe betrachtet [59]. Ausgehend von den Massen der Einzelteile lässt sich die Gewichtsverteilung berechnen. Sie ist in Tabelle 7.15 unten dargestellt.

Komponente	Gewicht [kg]	Gew.-Anteil [%]
Gehäuse	16,47	33,26%
Antrieb mit Zahnrädern	7,31	14,76%
Abtrieb mit Zahnrädern	7,62	15,39%
Differential	8,50	17,16%
Schaltung	1,37	2,77%
Andere	8,25	16,66%
Gesamt	49,52	100,00%

Tabelle 7.15: Gewichtsverteilung Getriebe VW Golf 4

### Automatisierte Getriebe

Ähnlich dem Vorgehen beim Verbrennungsmotor werden anhand von Materialmix und Gewicht die gegossenen Komponenten bestimmt. Die mechanische Fertigung wird darauf ausgehend von Werksdaten angegeben. Das mittlere Gewicht je Fahrzeugkategorie ist in Tabelle 7.14 dargestellt.

#### 7.2.2 Materialbeschaffenheit

Der Materialmix für automatisierte Getriebe wird in [69] dargestellt und ist in Abbildung 7.9 abgebildet. Die daraus abgelesenen Werte finden sich in Tabelle 7.16.

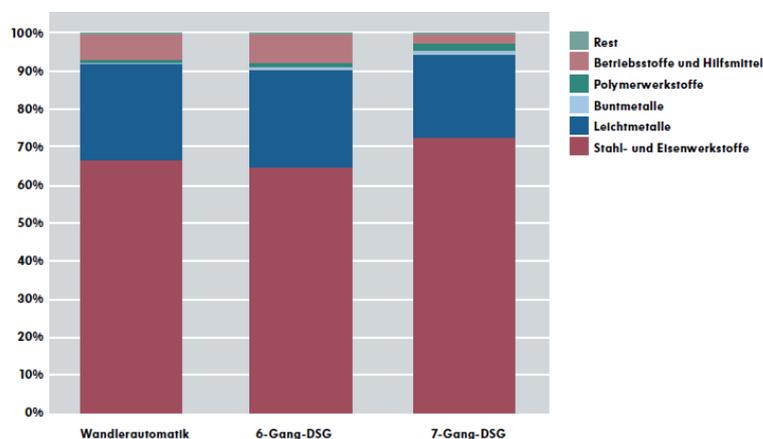


Abbildung 7.9: Werkstoffverteilung automatischer Getriebe

Werkstoff	Wandler	6-Gang DSG	7-Gang DSG
Stahl/Eisen	66,00%	65,00%	72,00%
Leichtmetalle	26,00%	25,00%	21,00%
Buntmetalle	0,50%	1,00%	1,50%
Polymere	1,00%	1,50%	2,50%
Betriebsstoffe	6,00%	7,00%	2,50%
Andere	0,50%	0,50%	0,50%

Tabelle 7.16: Werkstoffe automatischer Getriebe

### 7.2.3 Energieaufwand und Emissionen für die Produktion

Für das vorher behandelte Schaltgetriebe des Golf können die Werte des Fertigungsaufwands aus [59] entnommen werden. Der Wert beträgt 744,12 MJ und umfasst auch die Schmiede- und Aluminiumgussprozesse.

Aus dem Nachhaltigkeitsbericht der GETRAG GmbH [70] kann der Fertigungsaufwand für Doppelkupplungsgetriebe für den amerikanischen Markt ermittelt werden.

Input			Output		
Stahl	17.249	t	Getriebe	330.552	Stück
Aluminium	5.868	t	Treibhausgase	2828	t CO <sub>2</sub> e
Gusseisen	0	t			
Erdgas	35.556	kWh			
Strom	6.004.485	kWh			
Diesel	6.000	kWh			

Tabelle 7.17: Input/Output-Bilanz des Getriebewerks Irapuato, Mexiko

Damit erhält man den spezifischen Energiebedarf und die spezifischen Emissionen, so wie sie in Tabelle 7.18 abgebildet sind. Die Ergebnisse werden in MJ angegeben, um im Rahmen dieser Arbeit eine einheitliche Darstellung sicherzustellen.

Energieaufwand		Treibhausgasemissionen	
941,55	MJ/t	0,12	t CO <sub>2</sub> e/t
65,85	MJ/Stk	8,56	kg CO <sub>2</sub> e/Stk

Tabelle 7.18: Spezifische Werte des Getriebewerks Irapuato, Mexiko

## Schaltgetriebe

Für das Schaltgetriebe wird wie beim Motor anhand der Gewichts- und Materialverteilung den Komponenten ein Werkstoff zugeordnet. Ausgehend von der Rohstoffgewinnung wird der Energieverbrauch bis zum Verlassen der Fertigung berechnet. Die Werksfertigung beinhaltet hier bereits Gieß- und Schmiedeverfahren, daher werden diese in der Berechnung nicht zusätzlich berechnet. Das Resultat ist der Produktionsaufwand in Abhängigkeit vom Gewicht und in Abbildung 7.10 abgebildet. Teilt man die gesamte Produktionsenergie nach den Energieträgern auf, erhält man Abbildung 7.11.

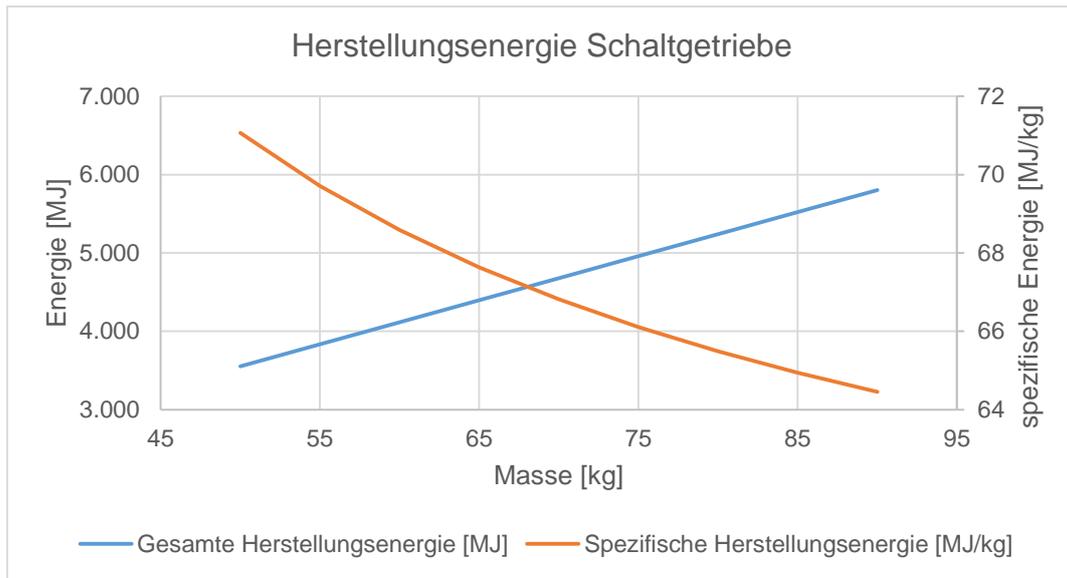


Abbildung 7.10: Herstellungsenergie Schaltgetriebe, Cradle to Gate

Getriebe-gewicht [kg]	Gesamte Herstellungsenergie [MJ]	Spezifische Herstellungsenergie [MJ/kg]
50	3553,37	71,07
55	3834,30	69,71
60	4115,22	68,59
65	4396,15	67,63
70	4677,07	66,82
75	4958,00	66,11
80	5238,93	65,49
85	5519,85	64,94
90	5800,78	64,45

Tabelle 7.19: Herstellungsenergie Schaltgetriebe, Cradle to Gate

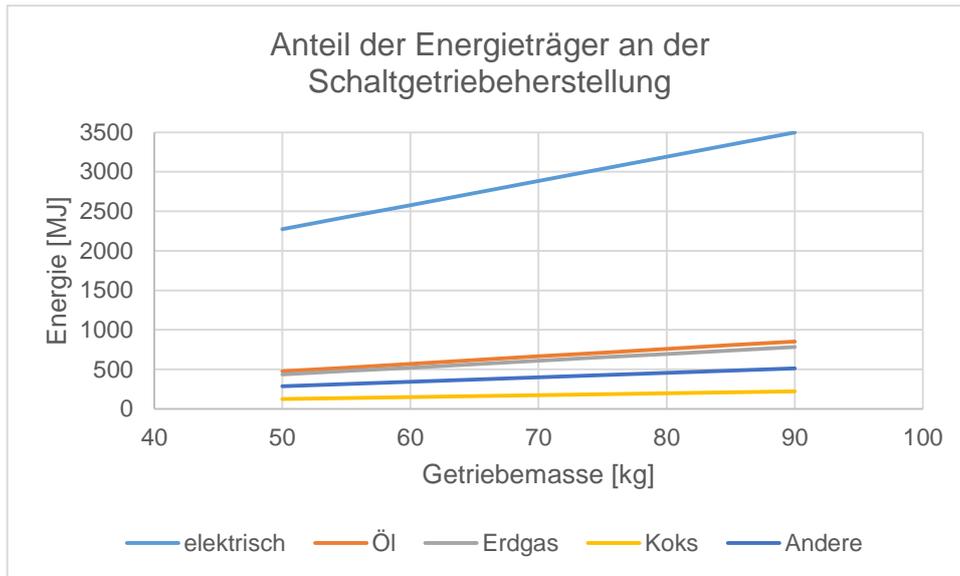


Abbildung 7.11: Energiebedarf der Schaltgetriebeherstellung abhängig vom Gewicht, nach Energieträgern aufgeschlüsselt

### Automatische Getriebe

Auch hier wird dieselbe Rechnung angewendet, um aus einer Verteilung der Materialien den Aufwand der Fertigung zu erhalten. Dabei wurde das Gewicht der Komponenten angepasst, um der Verteilung in Tabelle 7.16 zu entsprechen. Im Gegensatz zum manuellen Getriebe werden hier die Rohteilfertigung und die abschließende mechanische Bearbeitung separat betrachtet. Durch die Vielzahl an Planetengetrieben erhöht sich die Anzahl der Gussteile, dies wurde ebenso berücksichtigt. Für das DSG bleiben die Materialanteile unverändert. Das Resultat der Berechnung ist der Produktionsaufwand in Abhängigkeit vom Gewicht und in Abbildung 7.12 abgebildet. Teilt man die gesamte Produktionsenergie nach den Energieträgern auf, erhält man Abbildung 7.11 und Abbildung 7.13. Die vollständige Berechnung der Getriebe ist in im Anhang (Kapitel 15.2) beigelegt.

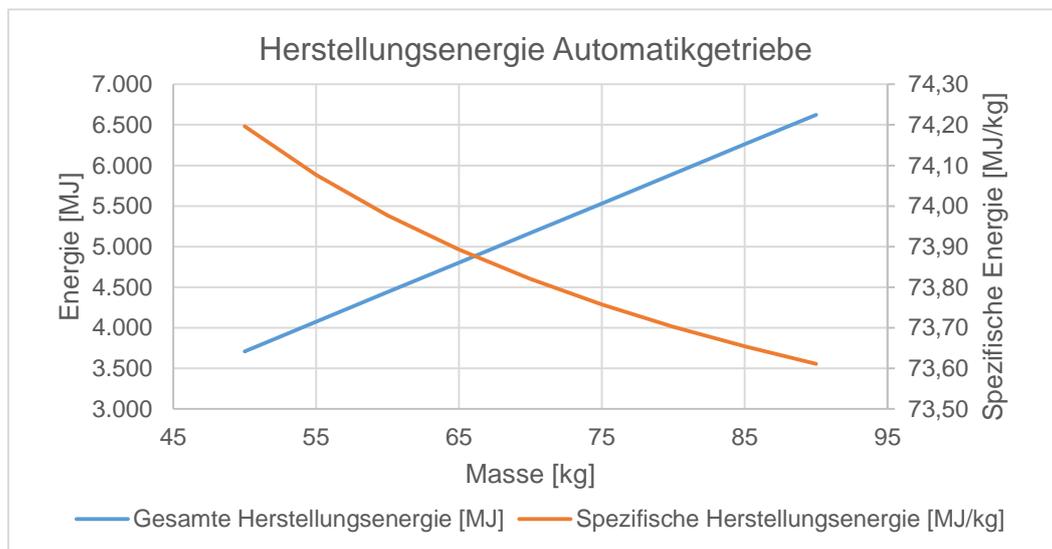


Abbildung 7.12: Herstellungsaufwand Automatikgetriebe, Cradle to Gate

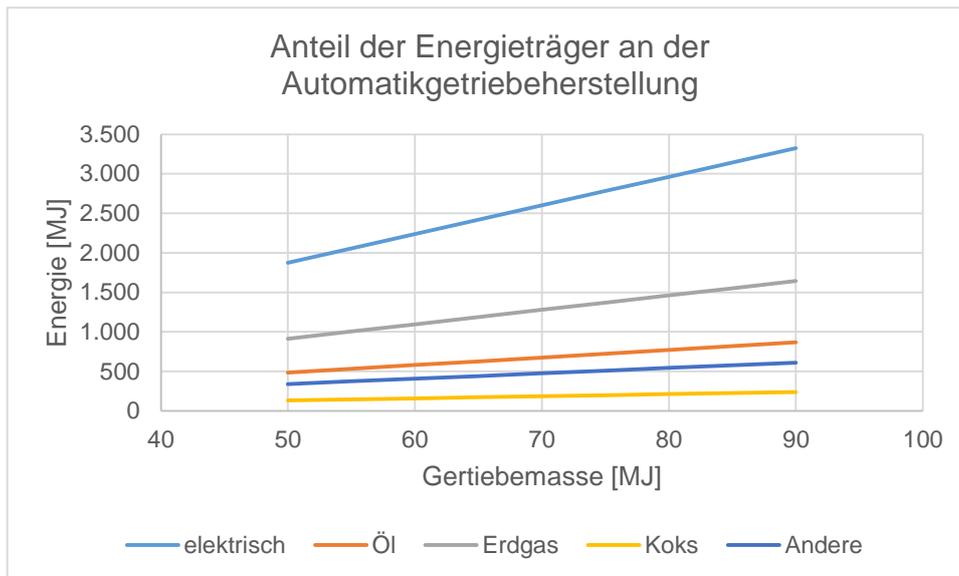


Abbildung 7.13: Energiebedarf der Schaltgetriebeherstellung abhängig vom Gewicht, nach Energieträgern aufgeschlüsselt

Getriebegewicht [kg]	Gesamte Herstellungsenergie [MJ]	Spezifische Herstellungsenergie [MJ/kg]
50	3.723,75	74,47
55	4.089,54	74,36
60	4.455,33	74,26
65	4.821,11	74,17
70	5.186,90	74,10
75	5.552,69	74,04
80	5.918,48	73,98
85	6.284,27	73,93
90	6.650,06	73,89

Tabelle 7.20: Spezifische und totale Herstellungsenergie von Automatikgetrieben, Cradle to Gate

Abschließend werden zur besseren Darstellung die Energieverbräuche der beiden Getriebearten in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt (Abbildung 7.14), die Werte dazu befinden sich in Tabelle 7.21.

## Vergleich

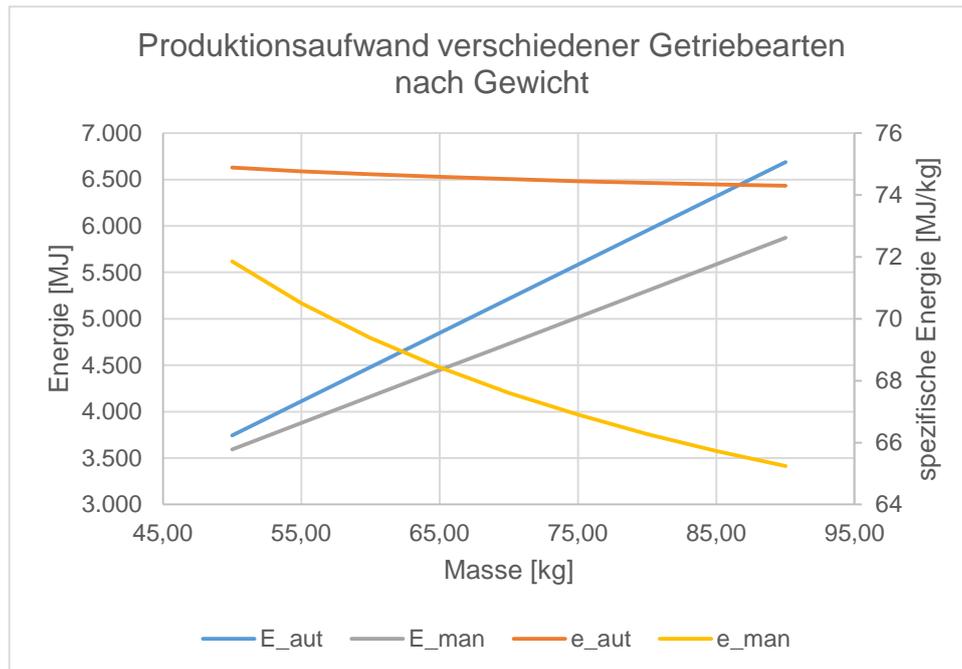


Abbildung 7.14: Getriebeherstellung, Energiebedarf gesamt und spezifisch

Gewicht [kg]	Automaten		Schalter	
	$E_{\text{aut}}$	$e_{\text{aut}}$	$E_{\text{man}}$	$e_{\text{man}}$
50,00	3.744,46	74,89	3.592,75	71,86
55,00	4.112,33	74,77	3.877,84	70,51
60,00	4.480,19	74,67	4.162,73	69,38
65,00	4.848,05	74,59	4.447,61	68,42
70,00	5.215,91	74,51	4.732,50	67,61
75,00	5.583,77	74,45	5.017,38	66,90
80,00	5.951,63	74,40	5.302,26	66,28
85,00	6.319,49	74,35	5.587,15	65,73
90,00	6.687,36	74,30	5.872,03	65,24

Tabelle 7.21: Getriebeherstellung, Energiebedarf gesamt und spezifisch

### 7.3 Energiespeicher

Da Hybridfahrzeuge und Elektroautos – anders als Schienenfahrzeuge – während der Fahrt nicht mit dem Stromnetz verbunden sind, muss die elektrische Energie im Fahrzeug gespeichert werden. Dabei variieren je nach Art des Fahrzeugs – reines Elektrofahrzeug oder Arten von Hybridfahrzeugen - die Bauart und die Größe des Energiespeichers. Generell werden Energiespeicher zum Antrieb von Elektrofahrzeugen als Traktionsbatterien bezeichnet.

Frühere Bleiakkumulatoren wurden inzwischen durch modernere Bauweisen abgelöst und sind, neben der weitreichenden Verbreitung in konventionell angetriebenen PKW, nur mehr in elektrisch angetriebenen Klein- und Mittelserienfahrzeugen zu finden, die größtenteils nicht global vertrieben werden. Auch Nickel-Cadmium oder Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren sind trotz verbesserter Leistungsdaten in Elektrofahrzeugen mittlerweile selten zu finden. Sie werden allerdings in Hybridfahrzeuge verbaut, bei denen keine hohe Kapazität bzw. Leistungsdichte gefordert ist. Der Grund dafür ist vermutlich im Preis zu suchen. In Anbetracht des großen Stellenwertes von Leichtbau und Effizienz im Fahrzeugbau sind bei allen namhaften Anbietern von Elektrofahrzeugen Lithium-Ionen (Li-Ion) Akkumulatoren im Einsatz. Daher konzentriert sich dieses Kapitel auf diese Art von Energiespeicher. Li-Ion-Traktionsbatterien übertreffen ihre Vorgänger hinsichtlich Leistungsdichte deutlich. Abbildung 7.15 verdeutlicht diese Entwicklung [71].

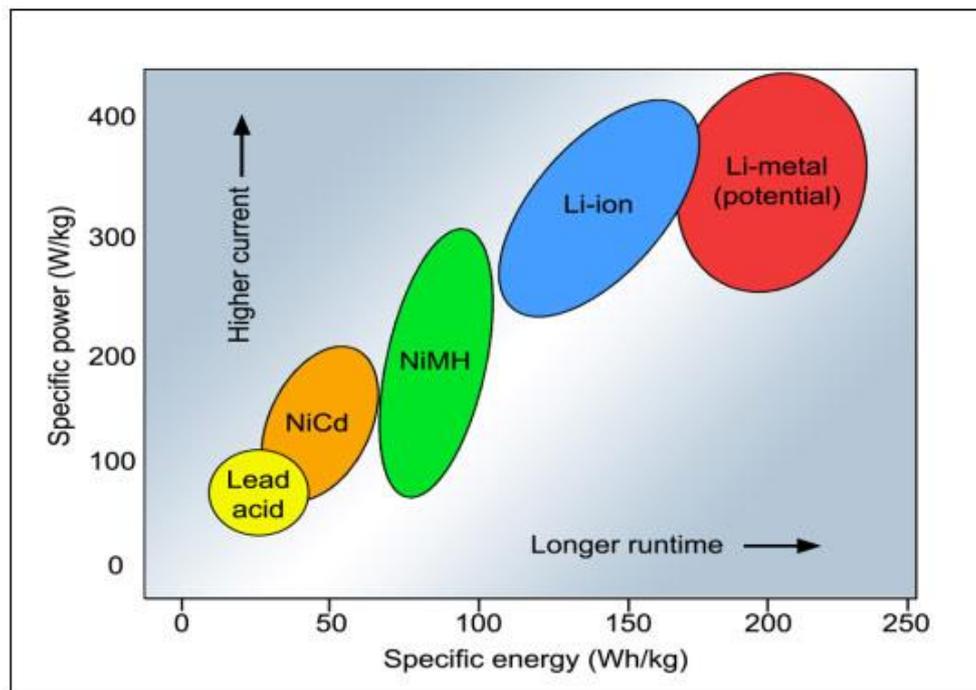
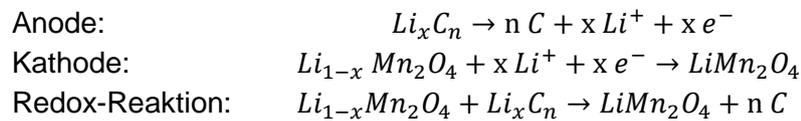


Abbildung 7.15: Leistungsdichte verschiedener Akkumulatoren im Vergleich zur spezifischen Arbeit

#### 7.3.1 Aufbau und Funktionsweise der Li-Ion-Traktionsbatterie

Akkumulatoren bauen auf das Prinzip der galvanischen Zelle auf und bestehen aus den vier Bestandteilen Anode, Kathode, Elektrolyt und Separator. Die positive Elektrode (Kathode) besteht aus Lithium-Metalloxiden oder Li-Metall-Phosphaten. Die Anode besteht in den meisten Fällen aus Graphit. Sie sind in einer elektrolytischen Flüssigkeit gelagert, wobei der Separator, eine selektiv durchlässige Membran, die beiden Elektroden trennt.

Die Batterie wandelt chemische in elektrische Energie um, wobei sie das Prinzip der Redoxreaktion (Reduktions-Oxidations-Reaktion) nutzt. An der Anode findet die Oxidation statt, an der Kathode die Reduktion. Durch diese Vorgänge liegt zwischen den Elektroden eine messbare Spannung an. Die Reaktionsgleichungen bei Entladung einer Lithium-Manganoxid-Batterie sind folgend angegeben [72, p. 240].



Formel 2: Reaktionsgleichungen beim Entladen einer LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Batterie

Die Werkstoffe, die in Li-Ion-Akkumulatoren eingesetzt werden, sind in Tabelle 7.22 unterhalb angeführt [73].

Komponente	Materialien	Anteil [%]
Kathoden	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> LiCoO <sub>2</sub> LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> LiNiO <sub>2</sub> LiFePO <sub>4</sub> LiCo <sub>1/3</sub> Ni <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub> LiNi <sub>0,8</sub> Co <sub>0,15</sub> Al <sub>0,05</sub> O <sub>2</sub>	15-27
Anoden	Graphit (LiC <sub>6</sub> ) LiTi <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	10-18
Elektrolyt	Ethylenkarbonat Diethylkarbonat LiPF <sub>6</sub> LiBF <sub>4</sub> LiClO <sub>4</sub>	10-16
Separator	PP	3-5
Gehäuse	Stahl	40

Tabelle 7.22: Materialien in Li-Ion-Batterien

LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> wird aus Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in Drehöfen hergestellt [74]. Der Prozess erfordert eine Temperatur von 900°C über eine Zeitspanne von 10h [75].

### 7.3.2 Energieaufwand und Emissionen für die Produktion

Zur Bestimmung des Energieaufwandes sollen zuerst die Fertigungsschritte grob umrissen werden um danach eine energetische Bewertung anzufügen. Die wichtigsten Vorgänge sind:

1. Vorbereiten der Kathoden, Kathodenhalterung, Aluminiumstreifen
2. Vorbereiten der Anoden und Kupferstreifen
3. Zusammenbau, Einbau des Separators.
4. Beigabe des Elektrolyts
5. Laden der Zellen
6. Endmontage

Der Energieaufwand dazu ist schwierig zu ermitteln, da noch immer Veröffentlichungen, insbesondere Bezug nehmend auf die Materialherstellung, fehlen. Das Argonne National Laboratory der University of Chicago [73, p. 7] bezieht sich unter anderem auf [76] und liefert für die Herstellung die Tabelle 7.23 angeführten Werte. Die Erklärung der Abkürzungen folgt darunter. Dazu muss allerdings angemerkt werden, dass diese Studie Ungewissheiten einräumt im Hinblick auf die Berücksichtigung des Aufwands der Energiebereitstellung. Dies bedeutet Abweichungen, da nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, ob die Energietränergewinnung berücksichtigt wurde. Auch bei den Emissionen, die in Tabelle 7.24 [73, p. 26] unterhalb angeführt werden, weisen die angeführten Werte eine eindeutige Streuung auf.

		Energieaufwand Cradle to Gate [MJ/kg]			
		$E_{mp}$	$E_{recycl}$	$E_{mnf}$	$E_{ctg}$
Batterietyp	NiMH	108	19,6	8,1	119
					230
					246
					195
					163
		57			
		54-102	21-40	74-139	128-241
				146	
		86,5		105	191,5
		25,1	8,4	11,3	36,4
				77	
		24,7			
		15-25	9-14	8,4-13	23,4-38
				16,6	
		16,8		6,7	23,5
		17,3	incl.	8,81	26,1
		102,8			
		44		53,9	97,9
		44-60	22-30	46-63	90-123
		59,9			
	179		56	235	
	82-93	30-34	62-70	144-163	
	93,3	4,8	32	125,3	
	133	3,6	30	143	
	53-80	25-37	96-144	149-224	
	112,9		91,5	204,4	
				222	
				62,9	

Tabelle 7.23: Energieaufwand zur Fertigung von Batterien

$E_{mp}$  Energie zu Materialgewinnung und -bereitstellung  
 $E_{recycl}$  Energie zum Recyclen der Batterie  
 $E_{mnf}$  Energie zum Verarbeiten der Materialien und Zusammenbau  
 $E_{ctg}$  Energie "Cradle to Gate" =  $E_{mp}$  +  $E_{mnf}$

Technology	VOC	CO	NOx	PM	SOx	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	Water	Air	Reference
Li-ion			22.5		17.5			18.2			Ishihara et al. 1999 GREET 2.7 Rydh and Sanden 2005 <sup>c</sup> Rydh and Sanden 2005 <sup>c</sup>
	0.6	1.8	7.6	17.3	16.7	9.7	0.1	7.2			
	1.1	4.3	13.3	21.9	24.9	17.6	0.2	12.1			
	1.7	6.4	20.0	32.9	37.4	26.5	0.2	18.1			
Average	0.9	3.0	14.5	19.6	19.7	13.7	0.1	12.5			

<sup>a</sup> Does not include battery material production.

<sup>b</sup> Solely from Ni production; assumed battery is 25% Ni.

<sup>c</sup> Used the average of their total energy values cited in Table 2.

Tabelle 7.24: Emissionen der Batterieherstellung, Cradle to Gate

Zusätzlich berechnet [57] in Tabelle 7.25 und Tabelle 7.26 den kumulativen Energieaufwand zur Batterieerzeugung unter Berücksichtigung des Aufwandes zur Elektrizitätsherstellung und der Herkunft des Lithiumkarbonats. Allerdings haben in dieser Studie andere Materialien wie Aluminium mehr Einfluss auf das Ergebnis, da in dieser Berechnung nur 39 Gramm Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> pro kg Batterie verwendet werden. Die relativen Zahlen neben den Absolutwerten beziehen sich auf die Produktion mit Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aus Laken unter günstigen Bedingungen.

Günstige Bedingungen	Kumulativer Energieaufwand, nicht erneuerbar		Treibhausgasemissionen	
	[MJ/kg Batt.]	[% von Referenz]	[kg CO <sub>2</sub> e/kg Batt.]	[% von Referenz]
Aus Salzseen	101,13	100,00	5,8250	100,00
Aus Spodumen	101,34	100,21	5,8347	100,17
Aus Meerwasser	182,69	180,65	10,4154	178,80

Tabelle 7.25: Umweltauswirkungen der Li-Ion-Batterieherstellung, günstige Verhältnisse

Ungünstige Bedingungen	Kumulativer Energieaufwand, nicht erneuerbar		Treibhausgasemissionen	
	[MJ/kg Batt.]	[% von Referenz]	[kg CO <sub>2</sub> e/kg Batt.]	[% von Referenz]
Aus Salzseen	150,61	148,93	8,9751	154,08
Aus Spodumen	101,54	100,41	5,8487	100,41
Aus Meerwasser	656,41	649,10	35,1599	603,59

Tabelle 7.26: Umweltauswirkungen der Li-Ion-Batterieherstellung, ungünstige Verhältnisse

Vergleicht man die Angaben der Hersteller mit der Studie der University of Chicago [73], lässt sich das Gewicht der verwendeten Batterie in Tabelle 7.27 angeben. Dabei sind die letzten beiden Werte aus den anderen Angaben berechnet, die übrigen Massen wurden aus den Herstellerangaben übernommen. In Tabelle 7.28 werden zusätzlich auch mit den spezifischen Werten aus Tabelle 7.24 die Emissionen angeführt.

Fahrzeug	Batterietyp	Energie	Energieinhalt	Gewicht
Toyota Prius	NiMH	1,3 kWh	31 Wh/kg	42,00 kg
Toyota Prius PHV	NiMH	5,2 kWh	35 Wh/kg	149,69 kg
Ford Focus	Li-Ion	23 kWh	85 Wh/kg	272,16 kg
Tesla Roadster	Li-Ion	57 kWh	127 Wh/kg	450,00 kg
Opel Ampera	Li-Ion	16 kWh	90 Wh/kg	177,78 kg
Peugeot iOn	Li-Ion	16 kWh	109 Wh/kg	146,79 kg

Tabelle 7.27: Gewichte der Traktionsbatterien ausgewählter Fahrzeuge

Fahrzeug	CO <sub>2</sub> spez.	CH <sub>4</sub> Spez.	GWP100	N <sub>2</sub> O spez.	GWP100	CO <sub>2</sub> e
Toyota Prius	13,6 kg CO <sub>2</sub> /kg	19,6 g CH <sub>4</sub> /kg	21	0,2 g N <sub>2</sub> O/kg	310	192,59
Toyota Prius PHV	13,6 kg CO <sub>2</sub> /kg	19,6 g CH <sub>4</sub> /kg	21	0,2 g N <sub>2</sub> O/kg	310	770,34
Ford Focus	12,5 kg CO <sub>2</sub> /kg	13,7 g CH <sub>4</sub> /kg	21	0,1 g N <sub>2</sub> O/kg	310	3275,89
Tesla Roadster	12,5 kg CO <sub>2</sub> /kg	13,7 g CH <sub>4</sub> /kg	21	0,1 g N <sub>2</sub> O/kg	310	8118,51
Opel Ampera	12,5 kg CO <sub>2</sub> /kg	13,7 g CH <sub>4</sub> /kg	21	0,1 g N <sub>2</sub> O/kg	310	2278,88
Peugeot iOn	12,5 kg CO <sub>2</sub> /kg	13,7 g CH <sub>4</sub> /kg	21	0,1 g N <sub>2</sub> O/kg	310	1881,64

Tabelle 7.28: Emissionen der Batterien verschiedener Hybrid- & Elektrofahrzeuge

Für Li-Ion-Batterien berechnen sich die Treibhausgase mit den jeweiligen GWP-Werten zu 12,87 kg CO<sub>2</sub>e/kg.

Da Bleiakumulatoren in jedem konventionellem PKW verbaut sind, müssen sie auch hier erwähnt werden. Der Herstellungsaufwand nach [73] ist in Tabelle 7.29 abgebildet, die zugehörigen Emissionen belaufen sich auf 3,88 kg CO<sub>2</sub>e pro kg Batterie [73, p. 25].

Material	PE <sub>j</sub> (MJ/kg)	Energy Detailed <sup>a</sup>	Process Detailed <sup>a</sup>
Pb Virgin	31.2	Y	Y
Virgin	28.7	Y	Min
Virgin	22.3	Y	Min
Virgin	27.2	Y	Y
Pb → PbO	12.7	Y	Y
Pb Recycled	11.2	Y	Y
Recycled	4.2	Y	Min
Recycled	7.2	N	N
Recycled	5.3	Y	Y
Polypropylene			
Virgin	75.5	Y	Y
Virgin	73.4	Y	Y
Recycled	15.1	N	N
Sulfuric acid	0.042	Y	Y
Glass	20	Y	Min
Glass fiber	25.9	Y	Y

<sup>a</sup> Y = yes; N = no; Min = minimal.

Tabelle 7.29: Herstellungenergie von Bleiakumulatoren

### 7.3.3 Zusammenfassung

Da die ermittelten Werte für den Produktionsaufwand stark schwanken, ist keine eindeutige Festlegung des Energiebedarfs möglich. Als Überblick werden die Extrema und der Mittelwert des spezifischen Energieaufwands verwendet, um den Gesamtaufwand an Energie zur Produktion in Abhängigkeit des Energieinhalts der Li-Ion Batterie darzustellen.

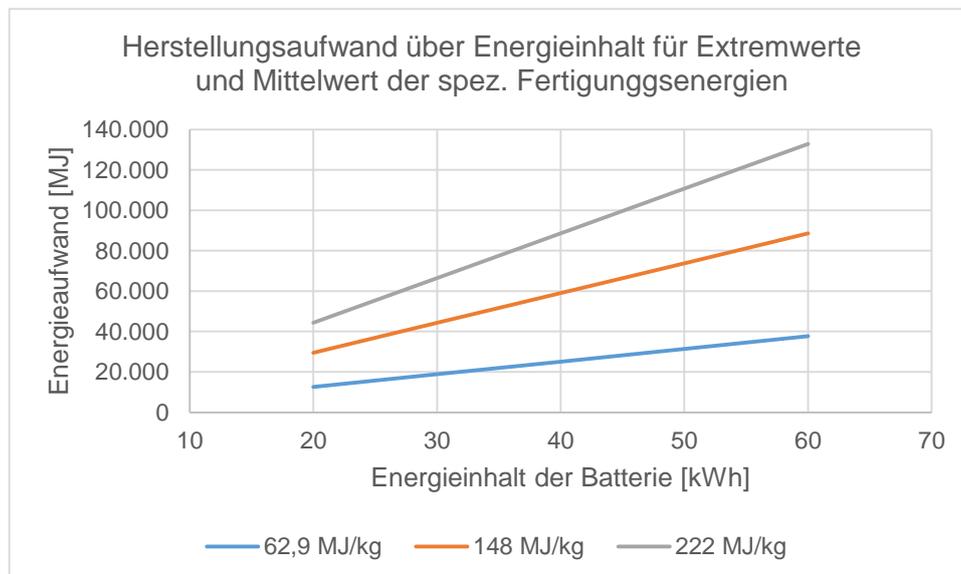


Abbildung 7.16: Herstellungsaufwand über Energieinhalt für Li-Ion-Batterien

## 7.4 Elektromotoren

Elektromotoren sind in jedem Elektrohybridfahrzeug und Elektrofahrzeug verbaut und dienen als Energiewandler. Sie arbeiten je nach Fahrzeugkonfiguration einerseits als Generatoren, die elektrische Energie erzeugen, oder auch als Motoren, die elektrische Energie in Wellenarbeit umwandelt.

Abhängig von der in Kapitel 3 dargestellten Strategie schwanken Leistung und Größe stark. Daher wird hier so vorgegangen, dass Daten aus vergleichenden LCA-Studien herangezogen werden, die teils auch verschiedene Leistungsspektren abdecken.

### 7.4.1 Materialbeschaffenheit

Um zu ermitteln, ob sich der Materialmix über die Größe des Motors signifikant verändert, werden Analysen verschiedener Motoren herangezogen. Der kleinste Motor hierbei ist eine 1,5 kW Asynchronmaschine, dessen Daten in Tabelle 7.30 aufgeschlüsselt sind [77]. Es folgt ein 10 kW Asynchronmotor mit Käfigläufer, der von der Materialverteilung der vorhergehenden abweicht, siehe Tabelle 7.31 [78]. Vor allem der hohe Stahlanteil ist hervorzuheben, der höchstwahrscheinlich auf den Käfig zurückzuführen ist. Mit [79] liegt eine vergleichende Studie vor, die je zwei Motoren mit jeweils 1,1; 11 und 110 kW Leistung analysiert. Die Materialzusammensetzung aller Motoren wird in Abbildung 7.18 in Prozent aufgeschlüsselt und als Diagramm dargestellt. Für die spätere Berechnung des Produktionsaufwandes wird die Materialverteilung aus Tabelle 7.30 verwendet.

	Standard		High Performance	
	Gewicht [kg]	Anteil [%]	Gewicht [kg]	Anteil [%]
Eisen	7,80	49,20	9,15	49,77
Kupfer	1,88	11,83	2,18	11,83
Aluminium	3,93	24,79	4,25	23,12
Stahl	2,25	14,19	2,81	15,28
Summe	15,86	100,00	18,39	100,00

Tabelle 7.30: Materialverteilung einer 1,5 kW Asynchronmaschine

Material	Gewicht [kg]	Anteil [%]
Elektroblech <sup>9</sup>	33,7	45,54%
Kupfer	4,3	5,81%
Aluminium	2,7	3,65%
Stahl	31,5	42,57%
Isolierung	0,5	0,68%
Harz	1,0	1,35%
Kunststoff	0,3	0,41%
Summe	74	100,00%

Tabelle 7.31: Materialanteile eines 10kW drei Phasen Elektromotors

<sup>9</sup> Elektroblech ist ein magnetischer Stahlwerkstoff, aus dem die Blechpakete elektrischer Maschinen gefertigt werden.

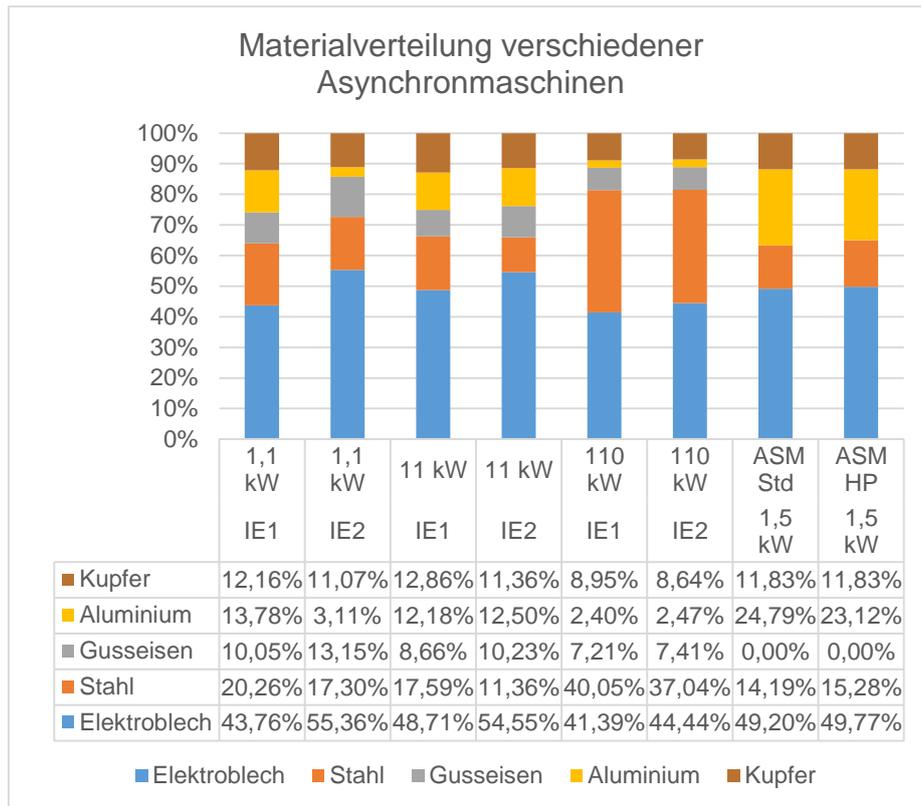


Abbildung 7.18: Verteilung der Werkstoffe nach Gewicht für verschiedene Asynchronmaschinen

Da damit nicht hinreichend auf das Gewicht rückgeschlossen werden kann, wird anhand von Werten mehrerer Anbieter das Gewicht und die Leistung von in Fahrzeugen verwendeten Elektromotoren erhoben. Abbildung 7.17 zeigt die Ergebnisse, wobei verschiedene Motorentypen betrachtet wurden.

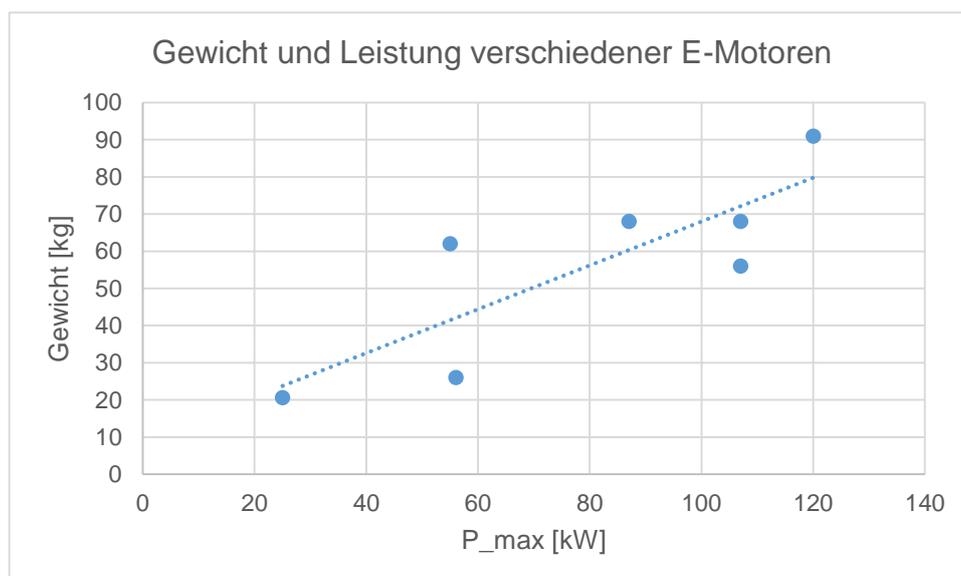


Abbildung 7.17: Gewicht und Leistung ausgewählter Elektromotoren für PKW

## 7.4.2 Energieaufwand und Emissionen der Produktion

Mit der Materialverteilung aus Tabelle 7.30 links wird analog zu den Motoren und Getrieben der Energieaufwand der Produktion berechnet. Anders als bisher wird hier aber direkt von den Werkstoffanteilen ausgegangen, nicht von den Komponenten.

Folgende Angaben wurden hierbei gemacht:

- Das Aluminium wird nur im Gehäuse verwendet.
- Kunststoffe und Isolierungen werden nicht betrachtet.
- Die Elektrobleche werden als gewalzt angenommen und untergehen keine Umformprozesse (Schmieden, Gießen).
- Die mechanische Fertigung entspricht im Aufwand der eines Verbrennungsmotors.

Durch Ändern des Gesamtgewichts bei fixierten Materialanteilen ergibt sich der Zusammenhang zwischen Gewicht und Produktionsaufwand, in Abbildung 7.19 dargestellt. Dies geschieht wie in den vorherigen Kapiteln in der „Cradle to Gate“-Betrachtungsweise, womit die Vorkette der Materialgewinnung bzw. Werkstoffbereitstellung eingeschlossen ist.

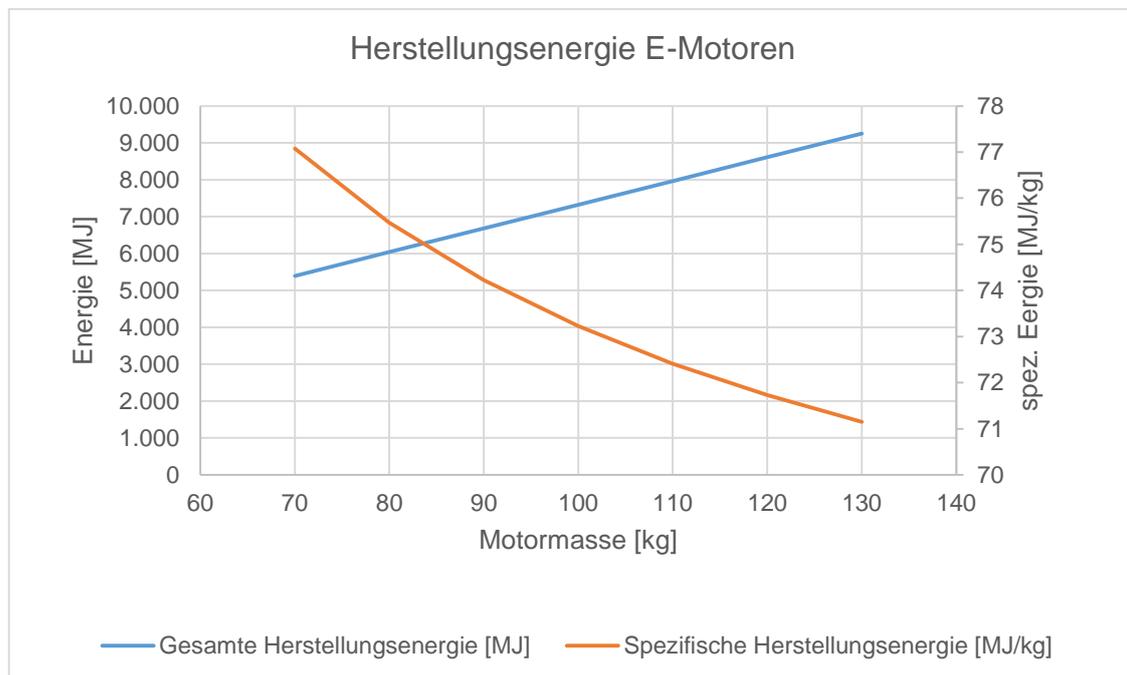


Abbildung 7.19: Energieaufwand der Elektromotorenproduktion, Cradle to Gate

## 7.5 Druckbehälter

Druckbehälter haben für gasbetriebene Fahrzeuge die Funktion des Energiespeichers. Da Erdgas im Gegensatz zu Flüssigtreibstoff unter Druck gelagert wird, müssen die Behälter widerstandsfähiger ausgeführt werden. Dies gilt noch mehr für Wasserstofftanks, da entweder unter großem Druck oder verflüssigt gespeichert wird, was hohe Materialanforderungen mit sich bringt.

Gastanktanks werden in vier Gestaltungskategorien eingeteilt (I-IV), die sich in Material und Gestaltung auswirken.

- Typ I: Metalltank aus Stahl oder Aluminium
- Typ II: Metallzylinder, mit Faserwicklungen verstärkt
- Typ III: Tanks aus Kompositmaterial, wie Stahlauskleidung mit Karbonfaserumwicklung
- Typ IV: Nichtmetallische Auskleidung mit imprägnierter Faserverstärkung.

### 7.5.1 Stahltanks

Für Stahltanks wird wegen mangelnder Daten die Herstellung aus den anfallenden Prozessschritten nachgestellt. Sie bestehen im Wesentlichen aus den drei Teilen Boden, Körper und Deckel. Der Körper ist im Prinzip ein Stahlrohr, dessen Fertigungsmöglichkeiten in Abbildung 7.20 dargestellt sind [80].

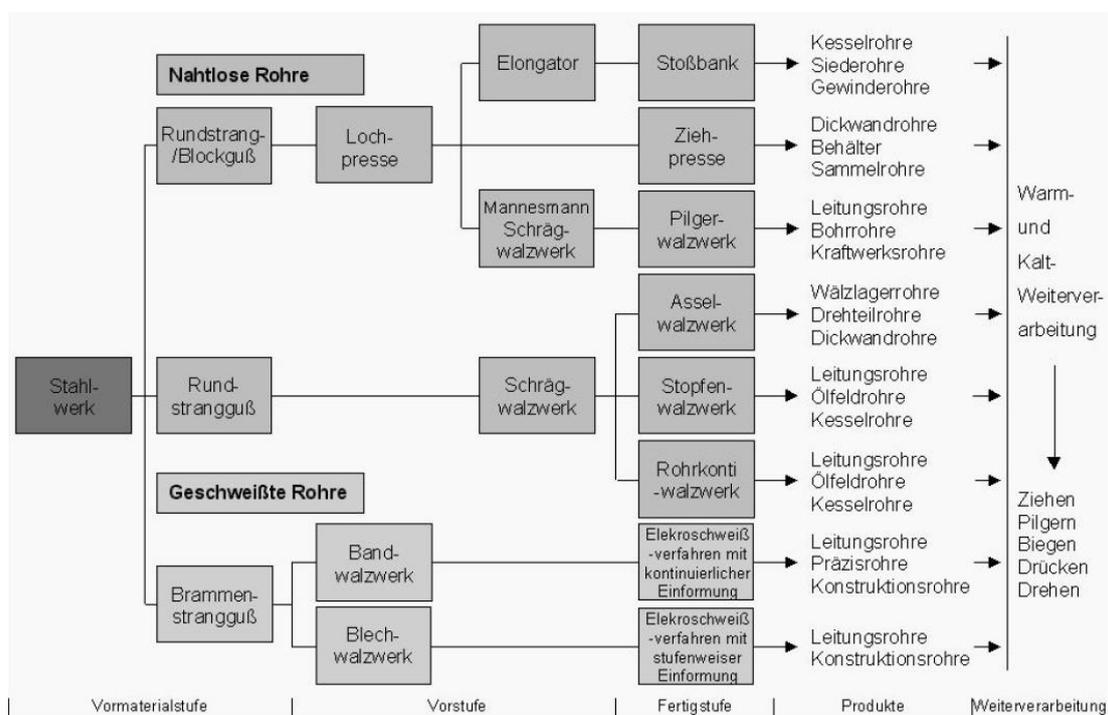


Abbildung 7.20: Fertigungsmöglichkeiten für Stahlrohre

Demnach wird der Körper gezogen. Der Energieaufwand dazu ist in [81] mit Verweis auf die Ecoinvent-Datenbank mit 4,55 MJ/kg angegeben. Die Wanddicke wird von einem Hersteller mit mindestens 4 mm angeführt, nachrechnen der vorgeschriebenen Manteldicke nach EN

13322-2 [82] führt auf einen Millimeter, daher wird mit 2,5 mm gerechnet. Boden und Deckel werden als geschmiedet angenommen, der Energieaufwand für das Zusammenfügen mittels Schweißen wird vernachlässigt.

### Berechnungsbeispiel

Exemplarisch wird ein Tank mit 25 kg Fassungsvermögen berechnet, wie er beispielsweise im Opel Zafira CNG verwendet wird [83]. Mit dem Behälterdruck von 200 bar kann man auf ein Behältervolumen von 167 L umrechnen. Nimmt man die Höhen des Tanks mit 0,9 Meter an, erhält man ein Leergewicht von 34,66 Kilogramm. Die komplette Rechnung ist im Anhang (Kapitel 14.3) angeführt.

Um eine Abschätzung der Masse zu erhalten, wurden der Rauminhalt und die Zylinderhöhe innerhalb der Werte von Tabelle 7.32 variiert. Mit diesen Werten wird darauf die Materialerzeugung und Fertigung berechnet.

	min.	max.
Höhe [m]	0,6	1,25
Kapazität [kg]	10	25
Leergewicht[kg]	18,48	37,73

Tabelle 7.32: Variationsbereich zur Gewichtsabschätzung

Da diese Berechnung mehrere Eingangsparameter besitzt (Tankhöhe, Kapazität), scheint es am sinnvollsten, im Sinne der Übersichtlichkeit Liniendiagramm zu verwenden, wobei ein Parameter verändert wird. Der spezifische Herstellungsaufwand für Stahltanks in Abhängigkeit von der Zylinderhöhe ist in Abbildung 7.21 dargestellt.

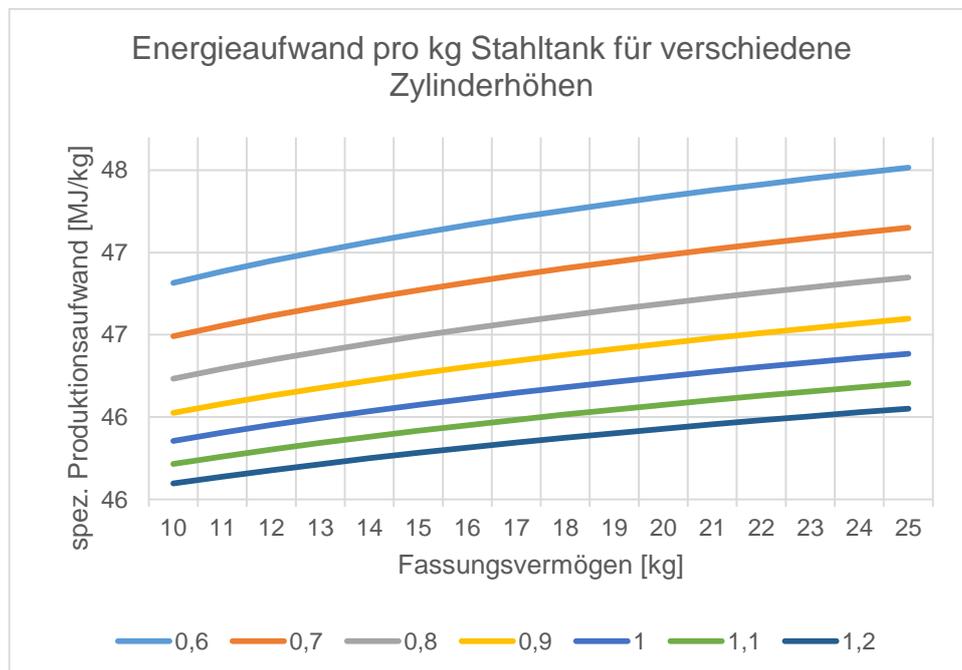


Abbildung 7.21: Spezifischer Produktionsaufwand für Gastanks aus Stahl

## 7.5.2 Tanks aus CFK

Für einen Karbonfasertank (Typ III) kann auf eine LCA der Universität Politecnico di Torino [84] zurückgegriffen werden, die den kompletten Herstellungsprozess inklusive der Rohstoffförderung und –bereitstellung sowie die anfallenden Transporte berücksichtigt. Hierbei wird in zwei Szenarien unterteilt, einerseits soll das verwendete Aluminium rein aus Primärrohstoffen hergestellt sein, andererseits wird im Gegensatz dazu von rein recyceltem Aluminium ausgegangen. Die Studie geht von Fertigung in Italien aus und benutzt den dortigen Strommix, allerdings wird in der Vorkette zur Materialgewinnung und –bereitstellung der europäische Energiemix verwendet. Dabei wird jedoch nicht detaillierter auf den Energieverbrauch eingegangen, sondern nur der kumulierte Energieaufwand angegeben. Dieser beinhaltet auch den Wirkungsgrad der Stromerzeugung, der über die Systemgrenzen dieser Arbeit hinausgeht.

Daher werden nach der Berechnung der anteilmäßigen Werkstoffverteilung die dieser Studie zugrundeliegenden Energieverteilungen betrachtet (Tabelle 7.33). Mit den Wirkungsgraden der Energieträger beziehungsweise den jeweiligen Kraftwerken kann ein Gesamtwirkungsgrad der Elektrizitätserzeugung für die untersuchte Region angegeben werden.

Komponente	Material	Gewicht [kg]	Gewichtsanteil [%]
Auskleidung	Al-Legierung	9	41,86
Fasern	Karbonfasern	7,5	34,88
Harz	Epoxid	5	23,26
Total		21,5	100,00

Tabelle 7.34: Zusammensetzung eines Typ-III Tanks

Fuel type	Italy	Europe
Coal	10.8%	22.3%
Oil	46.2%	8.7%
Gas	21.8%	12.1%
Hydro	9.2%	6.1%
Nuclear	10.4%	40.2%
Lignite	0.4%	8.8%
Biomass	0.2%	0.8%
Unspecified	0.4%	0.7%
Peat	-	0.3%
Geothermal	0.5%	-
Solar	-	-
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Tabelle 7.33: Strommix Italiens und der EU

Der für Italien berechnete Multiplikator von 2,41 wird überprüft, indem der kumulierte Energieaufwand (KEA) des verwendeten primären Aluminiums damit berechnet wird. Also wird der spezifische Energiebedarf zur Aluminiumherstellung mit der verwendeten Menge von neun Kilogramm multipliziert und mit dem Multiplikator vervielfacht. Der erhaltene KEA wird ins Verhältnis zum gesamten KEA gesetzt. Die Studie berichtet von 52%, während hier 48% erhalten werden. Dies ist angesichts der Vorgehensweise ausreichend genau.

spez. Energieaufwand Primäraluminium [MJ/kg]	78,46
Menge Aluminium [kg]	9,00
Energieaufwand Aluminium [MJ]	706,14
Faktor	2,41
KEA 9kg Alu [MJ]	1699,37
KEA [MJ]	3522,87
Anteil Alu an KEA	48,24%

Tabelle 7.35: Ermittlung des KEA des Aluminiumanteils

Zurückrechnen zu den kWh/kWh Werten:

Wirkungsgrad	Energieträger	Italien	EU
40%	Kohle	10,8%	22,3%
30%	Erdöl	46,2%	8,7%
50%	Erdgas	21,8%	12,1%
95%	Wasserkraft	9,2%	6,1%
33%	Kernenergie	10,4%	40,2%
40%	Lignit	0,4%	8,8%
30%	Biomasse	0,2%	0,8%
40%	Torf	0,0%	0,3%
15%	Geothermie	0,5%	0,0%
	undeclariert	0,4%	0,7%
	<b>Gesamt</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>
	Energiegew.Faktor	0,42	0,41
	1/x	2,41	2,47

Tabelle 7.36: Ermittlung des Wirkungsgrades der Stromerzeugung

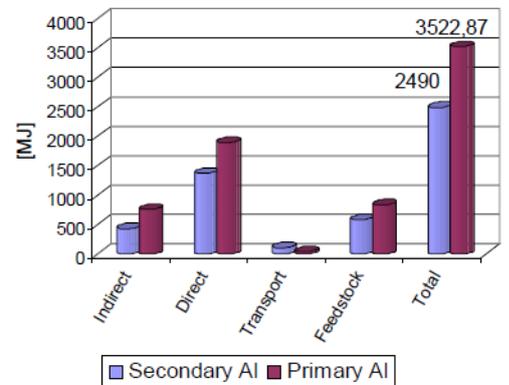


Abbildung 7.22: Verbrauch der Tankherstellung, Stromerzeugung berücksichtigt

### Emissionen

Der betrachtete Tank wurde in [84] nicht detaillierter hinsichtlich der Treibhausgasemissionen beschrieben, jedoch liegen die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung vor. Darin wird das Treibhauspotential (GWP 100) angegeben.

Wirkungskategorie	Sekundäres AI	Primäres AI
GWP 100 [g CO <sub>2</sub> e]	126.400	150.591
...pro kg [g/kg]	5.879,06	7.004,22
Davon wegen AI [g/kg]	5048,05	677,56

Tabelle 7.37: GWP des Kompositstanks

## 7.6 Abgasmachbehandlung

Die Abgase von Benzinmotoren und Diesellaggregaten unterscheiden sich, bedingt durch das bei der Verbrennung vorherrschende Luftverhältnis  $\lambda = L/L_{min}$  und das Verfahren Benzin verbrennt innerhalb der Zündgrenzen von etwa  $0,6 < \lambda < 1,5$ ; Dieselmotoren werden auch mit größerem Luftüberschuss betrieben. Abbildung 7.23 zeigt die Abgaskonzentration der Schadstoffe bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen.

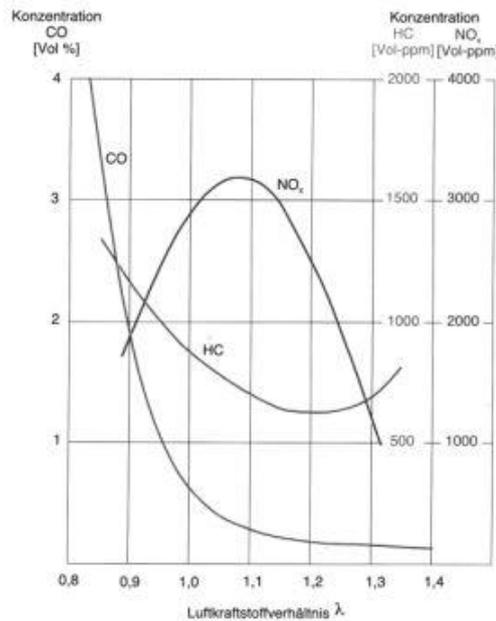
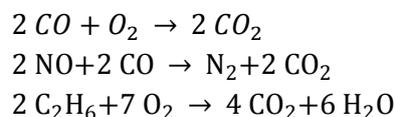


Abbildung 7.23: Schadstoffkonzentration in Abhängigkeit des Luftverhältnisses

Zum Einsatz kommen bei Ottomotoren geregelte Wege-Katalysatoren, die simultan Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide miteinander reagieren lassen. Dies setzt allerdings voraus, dass der Motor konstant mit stöchiometrischem Luftverhältnis ( $\lambda=1$ ) betrieben wird, da die Reaktionen einander beeinflussen. Weicht man in den mageren Bereich ab, bewirkt das einen starken Anstieg der Stickoxide, da der Sauerstoff mit CO reagiert, welches dann bei der NO<sub>x</sub>-Reduktion fehlt. Die Reaktionen sind folgende:



Bei Diesel ist durch die Qualitätsregelung – man steuert die Leistung des Motors durch Ändern der Kraftstoffmenge – keine Möglichkeit gegeben, über das Luftverhältnis Kontrolle zu behalten. Durch den Sauerstoffüberschuss liegt das Augenmerk auf der Oxidation von CO und Kohlenwasserstoffen. Zusätzlich zu diesem Oxydationskatalysator sind auch Partikelemissionen von Gesetz wegen limitiert. Die aktuell geltende EURO-5 Norm begrenzt diese Emission auf 5 mg/km. Daher werden Dieselpartikelfilter (DPF) hinter den Katalysator geschaltet.

## 7.6.1 Drei-Wege-Katalysator

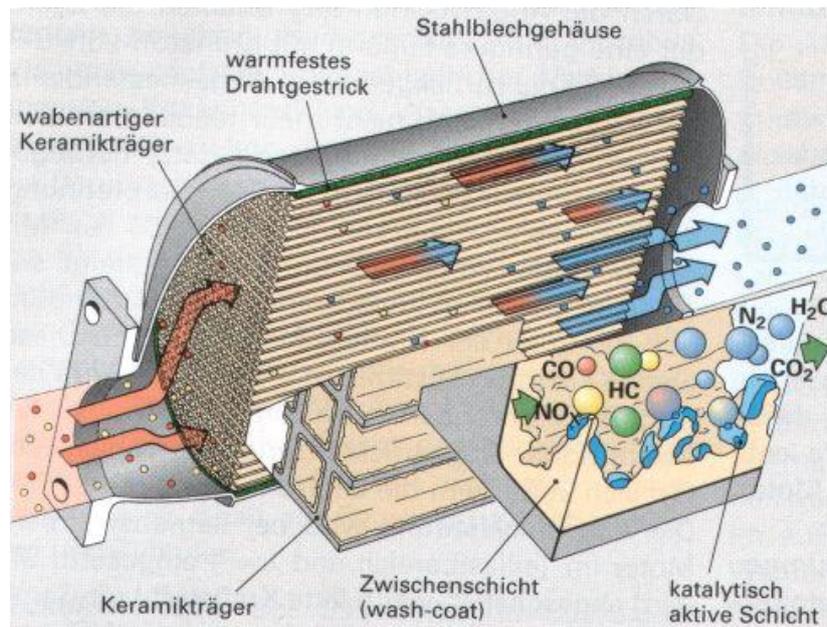


Abbildung 7.24: Schema eines Drei-Wege Katalysators (Quelle: [www.kfztech.de](http://www.kfztech.de))

Wie in Abbildung 7.24 ersichtlich, besteht ein Drei-Wege Katalysator aus mehreren Komponenten. Innerhalb der Metallhülle aus Stahl befindet sich der Katalysatorträger, der aus Metall oder Keramik bestehen kann, und auf dem die keramische Schicht und die katalytisch aktiven Edelmetalle aufgesintert sind. Die keramische Schicht, auch *washcoat* genannt, dient der Vergrößerung der Oberfläche und besteht meist aus Aluminiumoxid und Zirkoniumoxid. Die Edelmetalle sind Palladium, Rhodium und Platin. Die Mengenanteile der verwendeten Materialien können Tabelle 7.38 [85] entnommen werden.

Keramischer 3-Wege Katalysator		
Materialzusammensetzung		
Katalysatorträger, Cordierit		2*0,7 kg
MgO	14%	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36%	
SiO <sub>2</sub>	50%	
Matte, Keramik		2*0,25 kg
Washcoats, Metalloxide		0,17 kg
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10%	
CeO <sub>2</sub>	20%	
ZrO <sub>2</sub>	70%	
Edelmetalle		2 g
Gehäuse, Stahl		5 kg
Gesamtgewicht		7,1 kg

Tabelle 7.38: Materialzusammensetzung eines Drei-Wege Katalysators

### Berechnung der Herstellung

Einen großen Anteil des Aufwands zur Herstellung eines Katalysators nimmt die Gewinnung der Edelmetalle ein, daher wird sie gesondert betrachtet und wurde bereits in Kapitel 5.4 gezeigt. Folgt man den Werten aus Tabelle 5.39 und veranschlagt für den durchschnittlichen Katalysator für den europäischen Markt 1,8g Platin und 0,4g Rhodium [55], kann man deren Energieaufwand und Emissionen berechnen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.39 unterhalb dargestellt.

Stoff	Menge [kg]	spez. Energiebedarf [MJ/kg]	spez. Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e/kg]	Energiebedarf [MJ]	Emissionen [kg CO <sub>2</sub> e]
Pt	0,0018	110.515,62	28.829	198,93	51,89
Rh	0,0004	117.016,54	30.525	46,81	12,21
gesamt				245,73	64,10

Tabelle 7.39: Aufwand der Edelmetallherstellung für einen Katalysator

Der Washcoat wird mit 1,4 Kilogramm Aluminiumoxid angesetzt (Tabelle 7.38), die Werte dafür stammen aus Tabelle 5.12. Die Fertigung des Katalysators wird mit 31,3 MJ pro Stück angegeben [86], ebenso wie die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fertigung mit 23,6 kg/Stück. Das Gewicht liegt bei 7,1 kg.

Materialbeschaffung	Menge [g]	Energieaufwand [MJ/kg]	Energiebedarf [MJ]
Pt	1,8	110.515,62	198,93
Rh	0,4	117.016,54	46,81
AlO	1400	0,29	0,41
Stahl	5700	40,00	228,00
Gesamt Rohstoffe			474,15
Fertigung			31,3
Gesamt			505,45

Tabelle 7.40: Aufwand der Materialien und der Fertigung eines Katalysators

## 7.6.2 Dieselpartikelfilter

Da beim Dieselmotor der Partikelaustritt per Gesetz reglementiert ist, wird hinter den Oxidationskatalysator, meist im selben Gehäuse, ein Partikelfilter nachgestellt. Bei diesem wird der Abgasstrom durch am Ende verschlossene Kanäle geleitet, so dass er durch die porösen Wände durchdringt. Dabei lagern sich die Rußpartikel in den Kanälen ab. Abbildung 7.25 veranschaulicht das Prinzip. Zur Reinigung des Filters haben sich zwei Methoden etabliert. Einerseits das Abbrennen der Partikel durch Erhöhung der Abgastemperatur über eine „Nachverbrennung“ von Kraftstoff, was durch den Einspritzzeitpunkt und die Einspritzdauer gesteuert wird, andererseits die Regeneration durch Zugabe von Kraftstoffadditiven. Diese Methode benötigt genauso eine Erhöhung der Abgastemperatur, wobei der Ruß durch das Additiv schon bei geringeren Temperaturen verbrennt.

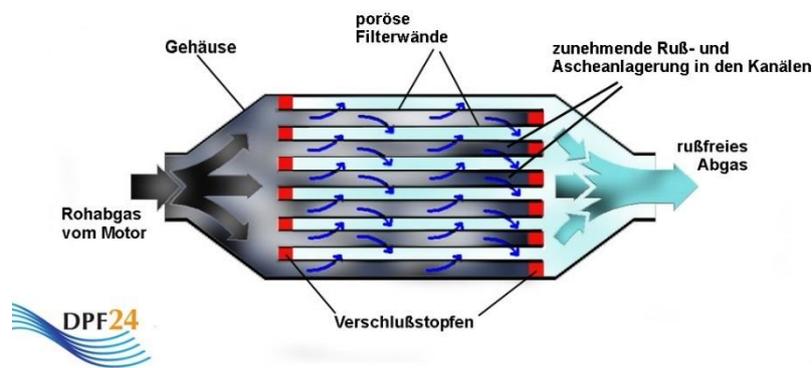


Abbildung 7.25: Schema eines Partikelfilters

### Berechnung der Herstellung

Zur Produktion wurden keine exakten Werte gefunden, daher wird der Umweltbericht 1012 des dänischen Herstellers Haldor Topsøe herangezogen. Aus diesem kann der durchschnittliche Energieverbrauch pro Tonne Output ermittelt werden. Zusätzlich wird unter Berücksichtigung von [87] von einem Gewicht von 10kg pro Einheit ausgegangen.

Input	237 TJ
Output	22917 t Output
spezifischer Energiebedarf	10,34 GJ/t
Durchschnittsgewicht	10,00 kg/Stk
Energieaufwand pro Stück	103,42 MJ/Stk

Tabelle 7.41: Energieaufwand zur Herstellung eines DPF

## 8 Betrieb

Um die während des Betriebs eines Fahrzeugs entstehenden Emissionen abbilden zu können, werden im Rahmen dieser Arbeit Durchschnittsfahrzeuge des C-Segments (untere Mittelklasse) herangezogen. Die Daten dieser Fahrzeuge setzen sich aus den meistverkauften Personenkraftwagen dieses Segments in Österreich zusammen. Der Verbrauch wird mittels einer Fahrwiderstandssimulation in Matlab mit spezifischen Fahrzeugparametern wie Gewicht- und Geometriedaten ermittelt. Aufbauend auf diese Durchschnittsfahrzeuge werden alternative Antriebskonzepte inkludiert. Dies geschieht, indem man die vorhandenen Antriebskomponenten durch die jeweils erwünschten ersetzt oder mit ihnen erweitert. Mit dem in Leistung und Gewicht veränderten Fahrzeug wird die Berechnung erneut durchgeführt.

### 8.1 Fahrzyklen

Zur Ermittlung des Verbrauchs eines Fahrzeuges wird dieses auf einem Rollenprüfstand einer Abfolge von Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie Fahrzuständen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten unterzogen. Diese Sequenzen sind genormt und ermöglichen eine vergleichbare Einschätzung des Kraftstoffverbrauchs. Folgend werden die wichtigsten Fahrzyklen, NEDC und Artemis, vorgestellt.

#### 8.1.1 *New European Driving Cycle* (NEDC)

Der NEDC ist seit 1996 die in der Europäischen Union verwendete Methode, um Kraftstoffverbräuche anzugeben. Sie ersetzt die bis dahin verwendeten Richtlinien wie beispielsweise den „DIN-Verbrauch“, bei dem zu je einem Dritten Stadtfahrt, Konstantfahrt mit 90 km/h und Konstantfahrt mit 120 km/h verwendet wurden.

Der Fahrzyklus besteht aus zwei Teilen. Der Stadtzyklus beinhaltet Konstantfahrten mit Geschwindigkeiten von bis zu 50 km/h, die viermal wiederholt werden. Im Überlandzyklus sollen mit verschiedenen Geschwindigkeiten einerseits der Betrieb auf der Landstraße und andererseits Autobahnfahrten simuliert werden. Aus dem Stillstand werden Geschwindigkeiten vom 50 km/h bis 120 km/h angefahren und über kurze Zeit konstant gehalten. Der komplette Zyklus ist in Abbildung 8.1 abgebildet [88].

Das Resultat des Neuen Europäischen Fahrzyklus ist eine Angabe der durchschnittlichen Verbräuche für ein bestimmtes Fahrzeug bei Betrieb in der Stadt, über Land und kombiniert. Der kombinierte Verbrauch ermittelt sich aus den beiden Zyklen, indem die städtische Abfolge viermal durchfahren wird und anschließend die Überlandfahrt simuliert wird. Der gesamte Test dauert 1200 Sekunden.

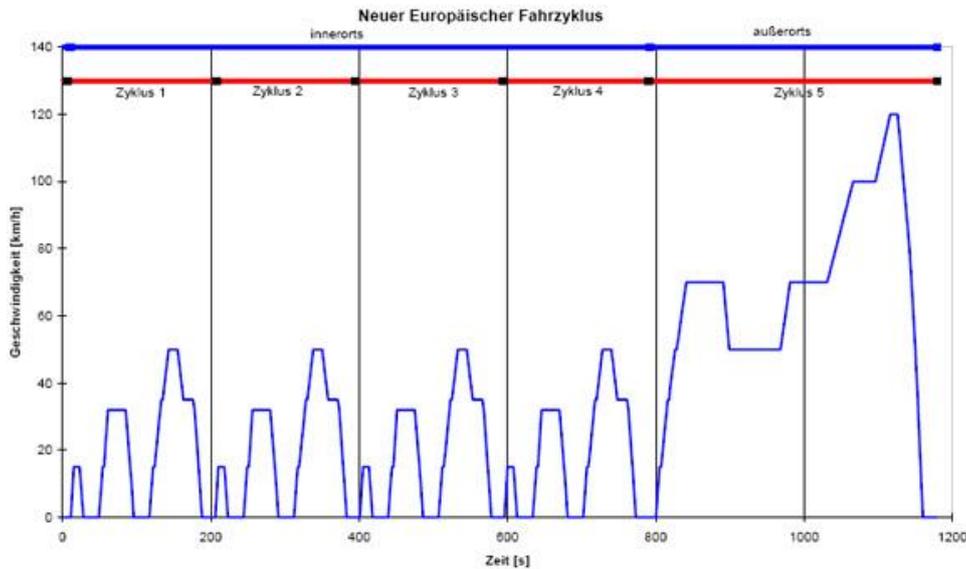


Abbildung 8.1: Geschwindigkeitsprofil NEDC-zyklus

Als Kritik an diesem Testverfahren ist zu erwähnen, dass es ein synthetischer Zyklus ist, der vom Realverhalten deutlich abweicht. Vor allem der Überlandbetrieb wird durch das Fehlen der höheren Geschwindigkeiten nicht realitätsnah abgebildet, auch transiente Fahrzustände werden nicht dargestellt. Den Fahrzeugherstellern werden viele Möglichkeiten gelassen, die Ergebnisse zu ihren Gunsten zu beeinflussen [89], wie zum Beispiel:

- Anpassen der Motorsteuerung
- Erhöhter Reifendruck / Leichtlaufreifen
- Keine Ladung der Batterie während des Tests
- Verwendung des minimalen Fahrzeuggewichtes
- Ausnutzen der Messtoleranzen

### 8.1.2 Artemis-Zyklus (CADC)

Um eine realistischere Vergleichsbasis zu erhalten, wurde im Rahmen des Projektes ARTEMIS (*Assessment and Reliability of Transport Emission Modeling and Inventories* im 5. EU-Forschungsprogramm) der CADC (*Common Artemis Driving Cycle*) entwickelt. Er ist im Vergleich zum NEDC viel dynamischer und beinhaltet Vorkonditionierungs- und Abkühlphasen. Der Zyklus ist in drei Geschwindigkeitsbereiche aufgeteilt (anstelle von zwei beim NEDC) und deckt somit Stadt, Land und Autobahn separat ab. Der Geschwindigkeitsverlauf ist in Abbildung 8.2 [90] veranschaulicht.

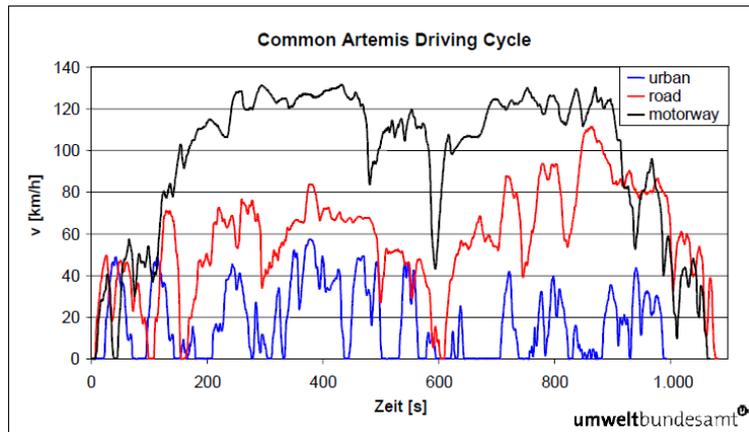


Abbildung 8.2: Geschwindigkeitsverläufe der CADC-Zyklen

## 8.2 Simulation des Fahrbetriebes

Mittels einer in Matlab erstellten Simulation werden die Energieverbräuche von Durchschnittsfahrzeugen in den vorher beschriebenen Zyklen ermittelt.

### 8.2.1 Vorgehensweise der Simulation

Zu Beginn einer Längsdynamiksimulation steht die Aufstellung der Fahrwiderstände. Über die Berechnung der Anströmfläche kann der Luftwiderstand abhängig von der Geschwindigkeit berechnet werden, der Rollwiderstand wird für alle Reifen als konstant angenommen. Der Steigungswiderstand entfällt, da keine Steigung auftritt. Der Beschleunigungswiderstand wird mit einem Drehmassenzuschlagsfaktor berechnet, um die Beschleunigung der rotierenden Massen zu inkludieren und 80 kg werden dem Fahrzeuggewicht für den Fahrer hinzugefügt.

$$W_L \approx 1/2 * c_w \rho_L A_F v |v|$$

Formel 3: Luftwiderstand

$$\sum M_{R_i} = \sum r_i a_{r_i} F_{N_i}$$

Formel 4: Rollwiderstandsmomente

$$W_S = mg * \sin(\beta)$$

Formel 5: Steigungswiderstand

$$W_B = mg\lambda$$

Formel 6: Beschleunigungswiderstand

Der Luftwiderstand wird nach Formel 3 berechnet, wobei der Betrag der Geschwindigkeit für den hier nicht auftretenden Fall negativer Geschwindigkeiten verwendet wurde.  $\rho_L$  ist die Dichte der Luft,  $A_F$  die projizierte Fläche des Fahrzeuges, die Anströmfläche [91].  $c_w$  ist der Luftwiderstandsbeiwert, ein dimensionsloser Koeffizient für den Strömungswiderstand.

Die Rollwiderstandsmomente der Achsen  $A_i$ ,  $i = V, H$  werden von der allgemeinen Formel 4 beschrieben. Sie werden hier mit gleichen Reifenradien und Widerstandsbeiwerten für beide Achsen, als Widerstandskraft  $W_R = m \cdot g \cdot f$  ausgedrückt.  $f$  ist hierbei der Rollwiderstandsbeiwert.

Der hier nicht benötigte Steigungswiderstand wird mit Formel 5 dennoch in die Simulation inkludiert.  $\beta$  ist hierbei der Steigungswinkel.

Der Widerstand gegen Beschleunigung wird mit Formel 6 berechnet, wobei  $\lambda$  der Drehmassenzuschlagsfaktor ist.

Die Geschwindigkeit multipliziert mit der Summe der Widerstände ergibt die Leistung, die benötigt wird, um die Fahrwiderstände zu überwinden. Diese Leistung wird über die Testdauer integriert und auf 100 Kilometer bezogen, sodass der ideale Energiebedarf in kWh/100km für die durchfahrenen Fahrzyklen erhalten wird.

$$E = \int v * \sum W_i dt$$

Formel 7: Energie zum Überwinden der Fahrwiderstände

### 8.2.2 Berechnung des realen Verbrauchs für verschiedene Antriebskonzepte

Als Eingangsdaten für die Simulation dienen Durchschnittswerte der häufigsten Vertreter einer Fahrzeugkategorie. Da das Zyklusprofil komplett vorhanden ist, können für jeden Zeitpunkt Werte wie Geschwindigkeit, Leistungsbedarf etc. ermittelt werden. Dazu werden die Fahrzeugmasse, der Luftwiderstandsbeiwert und die Anstaupfläche benötigt.

Als Ausgangspunkt der Simulation dient eine Excel-Datei, die mit den Fahrzeugdaten wie Masse, Kraftstoffart,  $c_w$ -Wert und NEDC-Verbrauchsangaben bestückt ist.

Die Fahrzeuge, die in der Simulation verwendet werden, sind Adaptionen des Durchschnittsfahrzeugs der C - Kategorie. Davon ausgehend wird der Antriebsstrang modifiziert, so dass neue Fahrzeugkonzepte erhalten werden.

#### Ausgangsfahrzeug

Segment		C	C
Kraftstoff		Benzin	Diesel
Heizwert des Kraftstoffs	[kWh/L]	8,2	9,94
Leergewicht	[kg]	1202,00	1289,00
Simulationsgewicht	[kg]	1282,00	1369,00
Widerstandsfläche ( $c_w \cdot A$ )	[m <sup>2</sup> ]	0,710	0,710

Tabelle 8.1: Ausgangsbasis für die Simulation

Für das Ausgangsfahrzeug sind die realen Verbrauchsdaten bereits als gemittelte Zyklusverbräuche vorhanden. Auf die Berechnung des Wirkungsgrades als Vergleich von Realverbräuchen zu den idealen Verbräuchen der Simulation wird dennoch nicht verzichtet.

	Einsatz	Real [kWh/100 km]	Simulation [kWh/100 km]	Wirkungsgrad
Benzin	Innerorts	59,778	9,938	0,166
	Ausserorts	38,048	13,317	0,350
Diesel	Innerorts	50,893	10,548	0,207
	Ausserorts	36,679	13,860	0,378

*Tabelle 8.2: Verbrauch und Wirkungsgrade von Benzin- und Dieselfahrzeug*

## Elektrofahrzeug

Für das Elektrofahrzeug werden der Motor und der Tank ausgebaut und durch eine Traktionsmaschine und Li-Ion Batterien ersetzt. Für den Verbrennungsmotor wird das Gewicht aus Tabelle 7.3 herangezogen, für den Tank wird eine Kapazität von 54 Litern und Benzin mit der Dichte von 0,74 kg/L verwendet. Das Gewicht der Treibstoffanlage wurde nach Recherche bei verschiedenen Herstellern auf 13,3 kg gemittelt. Für den Elektromotor werden nach Auswahl aus Abbildung 7.17 68 Kilogramm veranschlagt; dies beinhaltet bereits die Umrichter. Die Masse der Batterie ergibt sich aus Tabelle 7.27 mit einer Kapazität von 20 kWh und einer Leistungsdichte von 90 kWh/kg

Ausgangsgewicht	1282,00
Ausbau Motor	-122,30
Ausbau Tank	-53,26
E-Motor	68,00
Batterie	222,22
Ladegerät	6,30
Gesamt	1402,96

*Tabelle 8.3: Gewichtsänderung für das simulierte Elektrofahrzeug*

Für dieses Fahrzeug liegen keine praktischen Verbrauchswerte vor, daher muss aus den Ergebnissen der Simulation (idealer Verbrauch) mithilfe eines Wirkungsgrades der Realverbrauch berechnet werden. Um diesen Wirkungsgrad zu errechnen, werden die Daten eines existierenden Elektroautos dieses Fahrzeugsegments in die Simulation geladen um den Idealverbrauch zu erhalten. Der tatsächliche Verbrauch wurde in einer vergleichenden Studie der Technischen Universität Wien in Zusammenarbeit mit dem ÖVK gemessen [92]. Die dort verwendeten Verbräuche setzen sich aus den kombinierten Werten von NEDC und Artemis für Stadt und Land zusammen, dem entsprechend wird der simulierte Verbrauch zusammengesetzt. Hier kommen die unter den folgenden Bedingungen entstandenen Werte zum Einsatz:

- Fahrzeug: Nissan Leaf
- Temperatur 10°C, entspricht in etwa dem österreichischen Jahresdurchschnitt
- Keine Steigungen oder Gefälle
- Der Zusatzverbrauch von Klimaanlage und Heizung wird berücksichtigt [92, p. 16]

Einsatz	Real [kWh/100 km]	Simulation [kWh/100 km]	Wirkungsgrad
Innerorts	18,5	14,315	0,774
Ausserorts	17,3	15,741	0,910

*Tabelle 8.4: Verbrauchswerte und Wirkungsgrad des Nissan Leaf*

Da jetzt die Wirkungsgrade für ein vergleichbares Elektrofahrzeug vorliegen, kann die Simulation mit dem zuvor erstellten Fahrzeug durchgeführt und der praktische Verbrauch berechnet werden.

Einsatz	Simulation [kWh/100 km]	Wirkungsgrad	Real [kWh/100 km]
Innerorts	12,676	0,774	16,382
Ausserorts	13,967	0,910	15,350

Tabelle 8.5: Verbrauchswerte und Wirkungsgrad des Elektrofahrzeuges

Der bemerkenswerte Unterschied in den Realverbräuchen zwischen Nissan Leaf und dem Simulationsfahrzeug ist auf die Fahrzeugmasse zurückzuführen. Der Nissan wiegt 182 kg mehr.

### Hybridfahrzeug

Für das Hybridfahrzeug wird die Konfiguration des Toyota Prius in das Simulationsfahrzeug verbaut, da dieser der meistverkaufte Hybridkraftwagen in Österreich ist [93]. Um das Gewicht anzupassen, werden Motor und Getriebe ausgebaut und der Antriebsstrang samt Batterie hinzugerechnet. Die Gewichte dafür stammen aus [94] und [95]. Zusätzlich wird auch die Tankgröße an die des Prius angepasst.

Ausgangsgewicht	1282,00
Ausbau Motor	-122,30
Ausbau Getriebe	-68,70
Einbau Antriebsstrang Toyota Prius	230,00
Verkleinern Tank	-7,40
Einbau Batterie	42,00
Gesamt	1355,60

Tabelle 8.6: Gewichtsänderung für das simulierte Hybridfahrzeug

Die Simulation dieses Fahrzeugs liefert die idealen Energieverbrauchswerte zum Durchlaufen der Testzyklen. Für die Wirkungsgrade zum Ermitteln des realen Energiebedarfs wird die ELEKTRA-Studie der TU Wien [96] herangezogen. Die darin verwendeten Wirkungsgrade sind allerdings schon auf kombinierte Testzyklen bezogen. Eine Trennung in urban und extraurban war hierbei nicht möglich. Darum wird, abweichend zum oben behandelten Elektrofahrzeug, nur ein gesamter Wirkungsgrad verwendet. Die restliche Vorgangsweise bleibt unverändert, der reale Verbrauch ergibt sich aus dem simulierten Idealverbrauch und dem Wirkungsgrad der ELEKTRA-Studie.

Idealer Energiebedarf im Zyklus [kWh/100km]	
ARTEMIS urban	13,736
ARTEMIS rural	13,546
ARTEMIS motorway	20,226
NEDC City	10,454
NEDC EUDC	13,777

Tabelle 8.7: Idealer Energiebedarf des Simulations-Hybridfahrzeugs in den Testzyklen

Einsatz	Simulation [kWh/100 km]	Wirkungsgrad	Real [kWh/100 km]
Innerorts	10,454	0,294	35,535
Ausserorts	13,777		46,828

Tabelle 8.8: Verbrauchswerte und Wirkungsgrad des Hybridfahrzeugs

### Plug-In Hybridfahrzeug

Bei der Simulation des PHEV (Plug-In Hybrid Electric Vehicle) muss festgelegt werden, in welchem Ausmaß elektrisch beziehungsweise mit VKM gefahren wird. Nach Rücksprache mit dem Betreuer dieser Arbeit wird festgelegt, dass die Stadtfahrten elektrisch und die Überlandfahrten zum Großteil mit der VKM durchgeführt werden. Die Wirkungsgrade, mit denen man von den mittels Simulation ermittelten Optimalverbräuchen auf die Realverbräuche rechnen kann, werden entsprechend festgelegt. Für den urbanen Betrieb wird der städtische Wirkungsgrad des zuvor beschriebenen Elektrofahrzeugs verwendet (siehe Tabelle 8.5), für den außerstädtischen Betrieb wird der Wirkungsgrad eines Vollhybridfahrzeugs mit Benzinmotor aus der ELEKTRA-Studie [96] herangezogen.

Die Li-Ion Batterie wird auf 50 Kilometer ausgelegt, was in etwa neun Kilowattstunden entspricht. Als Vergleich für diese Annahme gilt das Hybridfahrzeug Opel Ampera, dessen Reichweite von etwa 60 km durch eine Batteriekapazität von 10 kWh sichergestellt wird. Mit dem durchschnittlichen Wert der Energiedichte aus Tabelle 7.27 erhält man ein Gewicht der Batterie von 87,6 kg.

Ausgangsgewicht	1.282,00
Ausbau Motor	-122,30
Ausbau Getriebe	-68,70
Einbau Antriebsstrang Toyota Prius	230,00
Einbau Batterie	87,59
Einbau Ladegerät	6,30
Gesamt	1.414,89

Tabelle 8.9: Gewichtsänderung für das simulierte PHEV

Einsatz	Simulation [kWh/100 km]	Wirkungsgrad	Real [kWh/100 km]
Innerorts	10,870	0,774	14,048
Ausserorts	14,147	0,294	48,086

Tabelle 8.10: Verbrauchswerte und Wirkungsgrad des PHEV

### Elektrofahrzeug mit Range Extender

Um das Gewicht dieser Antriebskonfiguration zu erhalten, wird dem Elektrofahrzeug aus Tabelle 8.3 ein kleiner Verbrennungsmotor samt Tank hinzugefügt. Hierzu wurden zwei Zweizylindermotoren mit einer Leistung von 30 kW gefunden [97] [98]. Das mittlere Gewicht beträgt inklusive Generator 66 kg. Für den Tank wird das Modell des Opel Ampera verwendet, das 35 Liter fasst.

Ausgangsgewicht	1282
Ausbau Motor	-122,3
Verkleinerung Tank	-14,06
E-Motor	68
Range Extender	66
Batterie	222,22
Ladegerät	6,3
Gesamt	1508,16

Tabelle 8.11: Gewichtsänderung für das simulierte Hybridfahrzeug mit Range Extender

Zur Berechnung des Verbrauchs muss eine Annahme getroffen werden, in welchem Ausmaß die Verbrennungskraftmaschine genutzt wird. Abweichend von den vorherigen Betrachtungen werden hier mehrere Szenarien erstellt, um die Verwendung des Range Extenders abzubilden. Der Grund dafür ist, dass die VKM in serieller Hybridkonfiguration stationär betrieben wird. Damit ist eine Aufteilung in Stadt- und Überlandverkehr nicht zielführend. Stattdessen wird der Verbrauch durch Betrachtung verschiedener Nutzungsmuster ermittelt.

In Anbetracht der Tatsache, dass an 73% aller Tage ein Fahrzeug nicht über 50 Kilometer bewegt wird [99], werden Szenarios erstellt, in denen das Fahrzeug größtenteils innerhalb der elektrischen Reichweite betrieben wird. In variierender Häufigkeit werden längere Fahrten vorgenommen, bei denen der Hilfsmotor zum Einsatz kommt. Bei beispielsweise 20 Fahrten jährlich zu 250 km ergibt sich eine Fahrleistung über die gesamte Lebensdauer (14,4 Jahre [100]) von 72.000 km im Hybridbetrieb. Es sollen aber auch Szenarien mit weniger oder mehr Leistung auf Langstrecken betrachtet werden. Daher werden drei Nutzungsmuster erstellt, bei denen 50.000, 70.000 und 100.000 Kilometer unter Zuhilfenahme des Range Extenders gefahren wird.

Der Wirkungsgrad im elektrischen Betrieb ist der des zuvor berechneten Elektrofahrzeugs; im kombinierten Betrieb wird der Wirkungsgrad eines seriellen Hybridfahrzeugs mit Benzinmotor aus der ELEKTRA-Studie [96] herangezogen. Da diese Studie die Testzyklen kombiniert und einen gesamten Wirkungsgrad angibt, wird mit dem Idealverbrauch dasselbe gemacht. Den kombinierten NEDC Verbrauch erhält man in dem man die Einzelzyklen mit ihrer Streckenlänge multipliziert und durch die gesamte Länge teilt. Der Stadtzyklus wird viermal durchfahren, der andere nur einmal. Analog wird beim Artemis-Zyklus vorgegangen, wobei jeder Lauf nur einmal in die Rechnung eingeht.

Zyklus	Länge [km]	Häufigkeit	Verbrauch [kWh/100 km]	Gesamtlänge [km]
NEDC City	1,004	4	11,525	4,018
NEDC EUDC	6,914	1	14,729	6,914
Gesamtlänge [km]				10,932
Gemittelter Verbrauch NEDC [kWh/100 km]				13,551

Tabelle 8.12: Berechnung des kombinierten Verbrauchs der NEDC-Zyklen

Zyklus	Länge [km]	Häufigkeit	Verbrauch [kWh/100 km]	Gesamtlänge [km]
ARTEMIS urban	5,437	1	15,177	5,437
ARTEMIS rural	16,613	1	14,655	16,613
ARTEMIS motorway	30,205	1	21,124	30,205
Gesamtlänge [km]				52,255
Gemittelter Verbrauch Artemis [kWh/100km]				18,449

Tabelle 8.13: Berechnung des kombinierten Verbrauchs der Artemis-Zyklen

Damit ergibt sich ein über beide Zyklen berechneter Idealverbrauch von 17,601 kWh/100 km. Der Verbrauch für die Szenarien ist abhängig von der elektrisch gefahrenen Strecke. Abbildung 8.3 gibt den Zusammenhang zwischen diesen Werten wieder. Für die festgelegten Fahrprofile ist der Verbrauch in Tabelle 8.14 dargestellt.

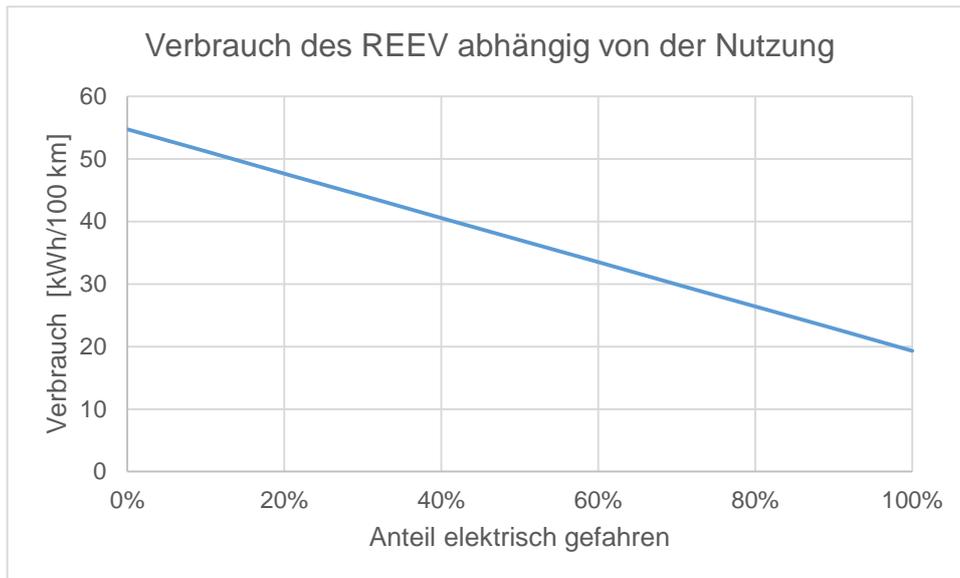


Abbildung 8.3: Verbrauch des Elektrofahrzeugs mit Range-Extender in Abhängigkeit von der elektrisch gefahrenen Strecke

Modus	Idealverbrauch [kWh/100 km]	Wirkungsgrad	Strecke [km]	Realverbrauch [kWh/100 km]	Verbrauch kombiniert [kWh/100 km]
hybrid	17,601	0,322	50.000	54,748	28,195
elektrisch	17,601	0,910	150.000	19,344	
hybrid	17,601	0,322	70.000	54,748	31,736
elektrisch	17,601	0,910	130.000	19,344	
hybrid	17,601	0,322	100.000	54,748	37,046
elektrisch	17,601	0,910	100.000	19,344	

Tabelle 8.14: Realer Verbrauch des REEV in Abhängigkeit von der elektrisch gefahrenen Strecke

### 8.2.3 Weitere Parameter

Um den Verbrauch der hier erstellten Fahrzeuge während ihrer Lebensdauer zu berechnen, wird die Gesamtleistung benötigt. Diese erhält man aus dem mittleren Fahrzeugalter bei Verschrottung (14,4 Jahre nach [100]) und der durchschnittlichen Jahresleistung pro Person in Österreich von 13.497 km/a nach VCÖ [101]. Die erhaltenen 194.356,8 km werden auf 200.000 km aufgerundet.

Für den Betrieb des Fahrzeuges wird ein Drittel der Strecke in der Stadt zurückgelegt. Dies entspricht der Berechnung des DIN-Verbrauchs und auch der NEDC-Zyklus ist mit knapp 37% Stadtbetrieb ähnlich ausgelegt. Die Durchführung dieser Berechnungen ist in das folgende Kapitel integriert.

## 9 Analyse mehrerer Konzepte und Vergleich

Bis jetzt wurde der Energiebedarf zur Herstellung der Fahrzeugkomponenten festgestellt und der Verbrauch während der Betriebsphase ermittelt. Auch die Emissionen der Treibhausgase sind bekannt. Damit können abschließend die einzelnen Bauteile zu Antriebsstrangkonzerten zusammengesetzt, analysiert und verglichen werden.

Für alle folgenden Betrachtungen werden, um die Bandbreite an Produktionsaufwand wiederzugeben, die Werkstoffe rein aus primärer Produktion verwendet. Der Vergleich mit der Produktion mit zu 100% recyceltem Material folgt anschließend zusammengefasst. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung werden mit dem Energiemix für Deutschland ermittelt, mit Ausnahme der Edelmetalle für den Katalysator. Für diese wird der südafrikanische Strommix verwendet. Nicht enthalten in dieser Berechnung sind der Energieaufwand und die Emissionen, die bei der Bereitstellung von Benzin und Diesel entstehen.

### 9.1 Betrachtung der Einzelfahrzeuge

#### Fahrzeug mit VKM

Für das Fahrzeug aus dem C-Segment mit Verbrennungskraftmaschine besteht der Antriebsstrang aus dem Motor und einem Schaltgetriebe. Für das Gewicht des Benzinmotors wurde ein durchschnittlicher Wert von 114,1 kg ermittelt, für das Dieselaggregat 147,0 kg. Zusätzlich werden die Komponenten Katalysator und, beim Diesel, Partikelfilter verbaut.

Motortyp	Produktionsaufwand [MJ]	
	Benzin	Diesel
Motor	13.464,20	17.087,50
Getriebe	4.658,14	4.658,14
Katalysator	505,45	505,45
Partikelfilter		103,42
Gesamt	18.627,79	22.354,51

Tabelle 9.1: Energieaufwand zur Herstellung der Komponenten

Als Getriebe wird ein manuelles Schaltgetriebe verwendet, da es in Österreich und auch in Europa in diesem Fahrzeugsegment am weitesten verbreitet ist. Für das Gewicht wurde ein Durchschnittswert von 68,7 kg ermittelt. Die Berechnung des Energieaufwandes der Getriebeherstellung wurde in Kapitel 7.2 beschrieben.

Arbeitsschritt	Benzin	Diesel
	CO <sub>2</sub> e [kg]	CO <sub>2</sub> e [kg]
Produktion Motor	613,26	782,54
- Strombedarf	1.154,27	1.477,41
Getriebe	185,34	185,34
- Strombedarf	444,29	444,29
Katalysator	114,12	114,12
Gesamt	2.511,28	3.003,70

Tabelle 9.2: Treibhausgasemissionen der Komponentenherstellung

Der Verbrauch wird aus Tabelle 8.2 entnommen.

Die Emissionen des Betriebs werden direkt aus dem Verbrauch berechnet. Aus [102] werden die Emissionswerte entnommen, die in Tabelle 9.3 wiedergegeben sind. Dies führt auf die kilometerabhängigen Emissionswerte im kombinierten Fahrzyklus in Tabelle 9.4.

Die Emissionen des Betriebs werden direkt aus dem Verbrauch berechnet. Aus [102] werden die Emissionswerte entnommen, die in Tabelle 9.3 wiedergegeben sind. Dies führt auf die kilometerabhängigen Emissionswerte im kombinierten Fahrzyklus in Tabelle 9.4.

Energieträger	g CO <sub>2</sub> /MJ
Erdgas H/L	56
Benzin	72
Diesel	74

Tabelle 9.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen von Fahrzeugtreibstoffen

CO <sub>2</sub> e-Emissionen [g/km]	
Benzin	Diesel
117,40	110,33

Tabelle 9.4 CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Betrieb der VKM-Fahrzeuge

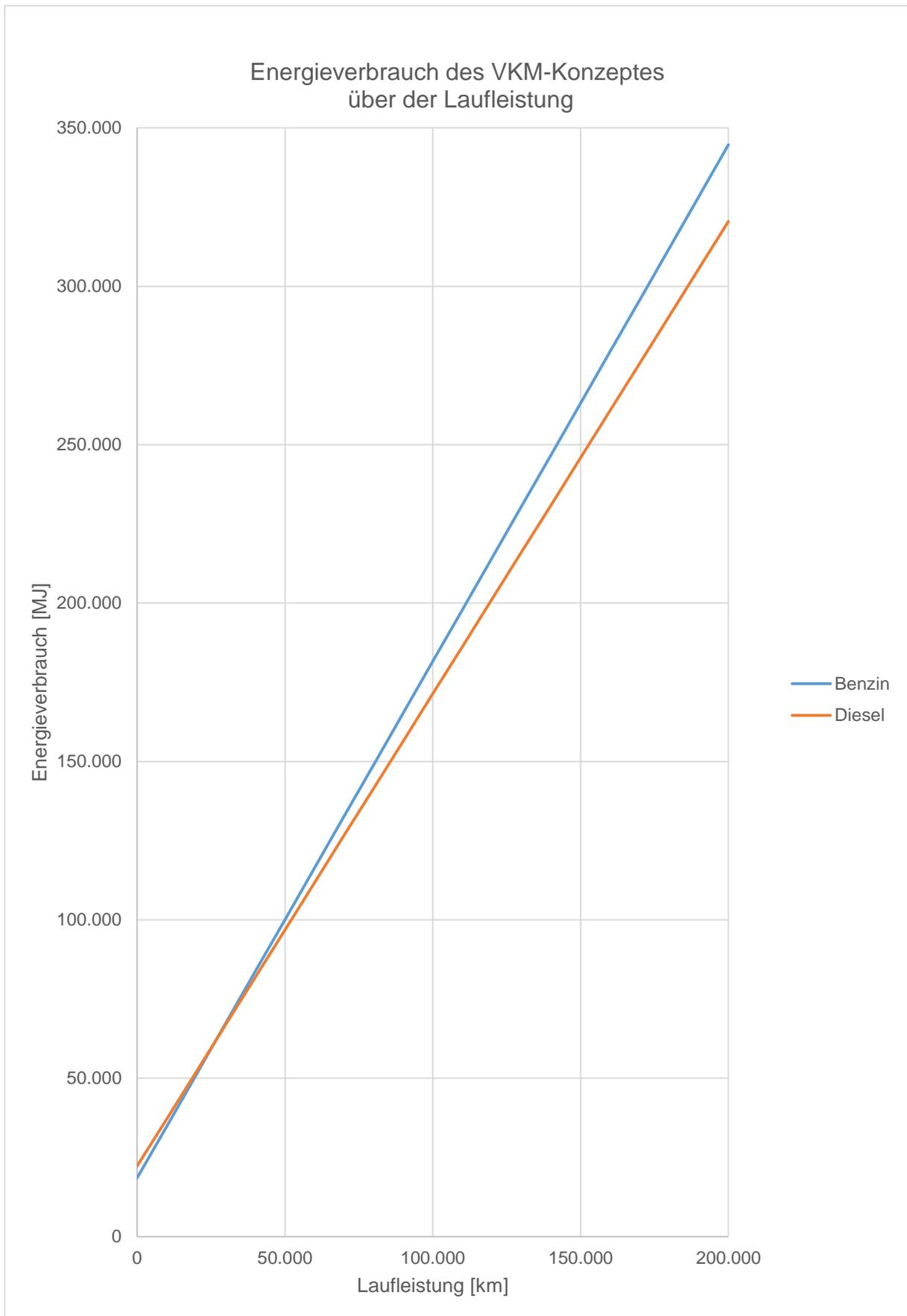


Abbildung 9.1: Energiebedarf über die beiden Abschnitte Produktion und Betrieb, Benzin- und Dieselfahrzeug

Die über die Laufleistung benötigte Energie ist in Abbildung 9.1 grafisch veranschaulicht. Dabei ist der Nullpunktstand auf der Ordinate der Produktionsaufwand des jeweiligen Antriebsstrangs. Die folgende lineare Steigung ist durch den spezifischen Verbrauch multipliziert mit der zurückgelegten Strecke definiert.

Es ist erkennbar, dass der Antriebsstrang mit Benzinmotor weniger Energie in der Herstellung benötigt, dafür aber im Betrieb den höheren Energiebedarf hat. Ersteres erklärt sich durch das Gewicht des Motors und den zusätzlich verbauten Partikelfilter, Letzteres durch den schlechteren Wirkungsgrad des Benziners. Es sei darauf hingewiesen, dass das Dieselfahrzeug in der Simulation den höheren Energieverbrauch hatte und die Aufwände für Wartung vernachlässigt wurde.

Betrachtet man die Treibhausgasemissionen der benötigten elektrischen Energie, ist es notwendig festzulegen, wo diese Energie produziert wird. Mit diesem Emissionsfaktor können auch die Treibhausgase der Elektrizitätsgewinnung berücksichtigt werden. Als Beispiel für ein mitteleuropäisches Land wird hier der deutsche Strommix gewählt, der 562 g CO<sub>2</sub>e/kWh (=156,1 g/MJ) emittiert. Für den Katalysator werden die Edelmetalle mit dem südafrikanischen Emissionsfaktor beaufschlagt (siehe Kapitel 7.6), und der Strombedarf zur Herstellung von Washcoat und Gehäusematerial sowie der Fertigung berücksichtigt.

		Laufleistung [km]		
		0	100.000	200.000
CO <sub>2</sub> e-Emissionen [kg]	Benzin	2.511,28	14.250,79	25.990,31
	Diesel	3.003,70	14.037,18	25.070,67

Tabelle 9.5: CO<sub>2</sub>e-Emissionen der Antriebsstränge mit VKM

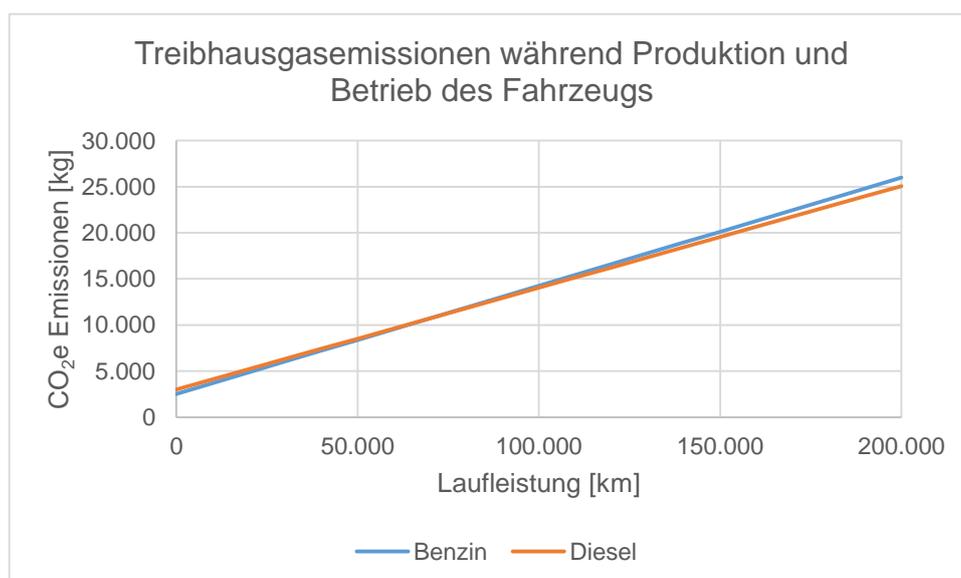


Abbildung 9.2: CO<sub>2</sub>e-Emissionen der Antriebsstränge mit VKM

### Elektrofahrzeug

Für das Elektrofahrzeug besteht der Antriebsstrang aus dem Elektromotor, den Umrichtern, die schon im Motorengewicht berücksichtigt wurden, und der Batterie. Da hier keine Durchschnittsdaten vorliegen, wird die Größe der Komponenten festgelegt, wobei die Orientierung an bereits existierende Fahrzeuge besteht. Es werden hier die Werte aus Tabelle 8.3

Komponente	Herstellungsaufwand [MJ]
Elektromotor	5.266,68
Batterie	32.879,00
Gesamt	38.145,68

Tabelle 9.6: Herstellungsaufwand der Komponenten des Elektrofahrzeugs

verwendet, die das simulierte Elektrofahrzeug beschreiben. Zusätzlich wird nach [103] mit Verweis auf die Ecoinvent-Datenbank die Leistungselektronik berücksichtigt. Fügt man noch den Energiebedarf für den zurückgelegten Weg hinzu, erhält man Abbildung 9.3.

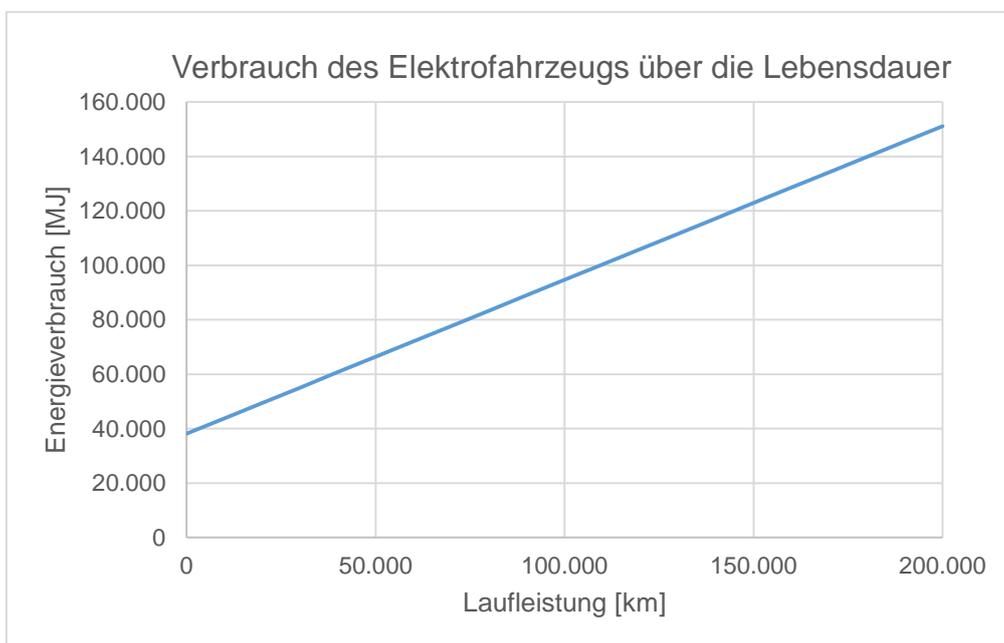


Abbildung 9.3: Energieverbrauch des Elektrofahrzeugs

Für die Treibhausgasemissionen werden die in Tabelle 9.6 angeführten Komponenten des Antriebsstrangs betrachtet. Für die Batterie erfolgt die Berechnung der Emissionen mit den Mittelwerten aus Tabelle 7.25 und Tabelle 7.26. Dabei ist der Elektrizitätsbedarf schon berücksichtigt.

Arbeitsschritt	CO <sub>2</sub> e [kg]
Produktion Motor	201,19
- Strombedarf	264,90
Batterie	1.644,29
Leistungselektronik	616,00
Gesamt	2.866,79

Tabelle 9.7: Emissionen der Komponentenherstellung, Elektrofahrzeug

Für den Betrieb des Elektrofahrzeugs fallen keine direkten Emissionen an, allerdings treten bei der Erzeugung der Elektrizität, die für das Laden der Batterie nötig ist, Emissionen auf. Hier sollen zum Vergleich die Werte für Österreich und Deutschland aus Tabelle 4.6 verwendet werden, das sind 209 g/kWh (=58 g/MJ) und 562 g/kWh (=156 g/MJ).

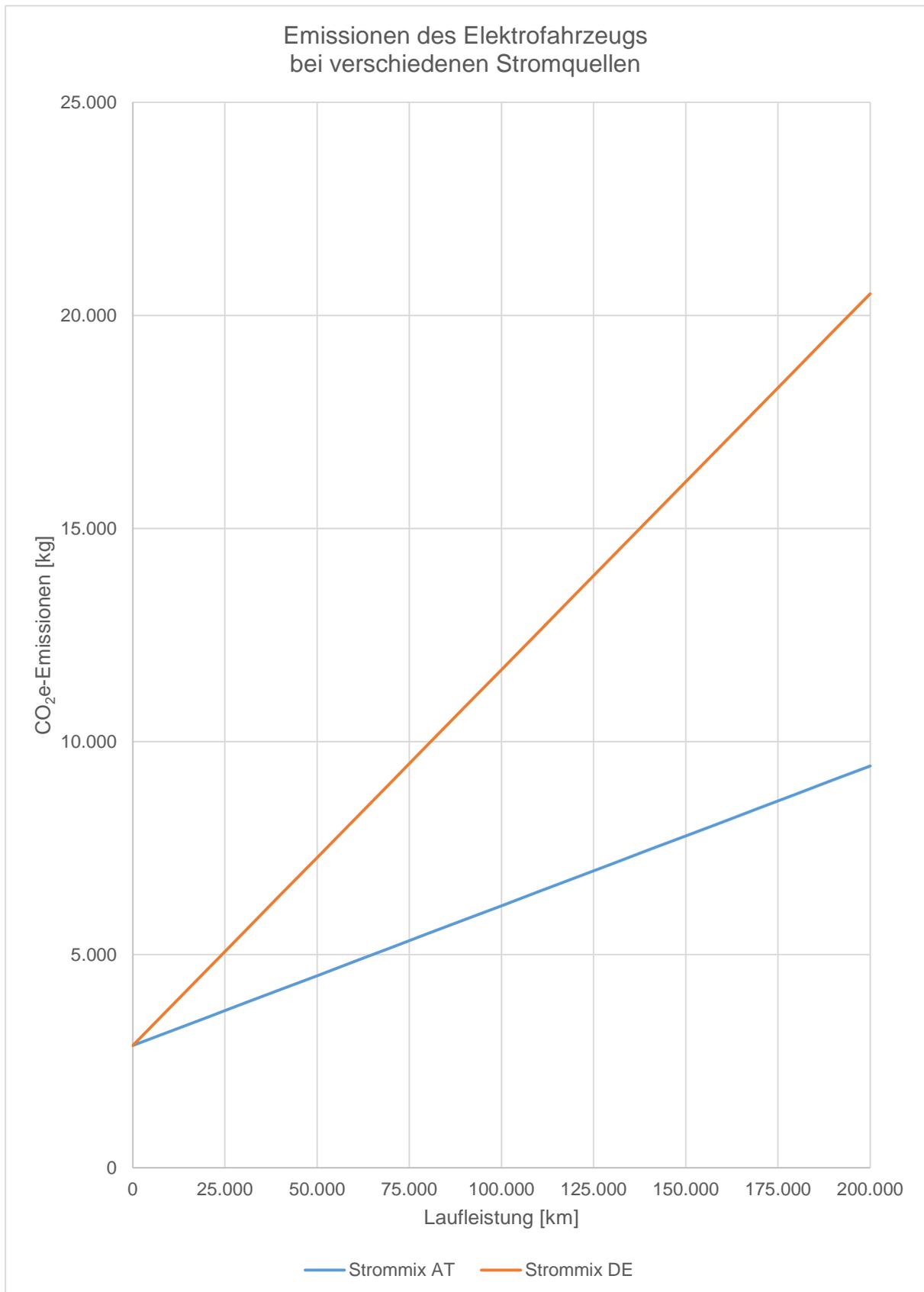


Abbildung 9.4: Emissionen des Elektrofahrzeugs bei unterschiedlichen Strommischen

### Vollhybridfahrzeug

Für diese Fahrzeugkonfiguration wird der Aufbau des Toyota Prius betrachtet. Der in diesem verbaute Antriebsstrang wird in die Komponenten VKM, Getriebe und Elektromotoren aufgeteilt und jeder einzelnen davon eine Masse zugeordnet. Diese sind in Tabelle 9.8 angeführt. Darüber hinaus wird noch ein Katalysator verbaut.

Benzinmotor	100 kg
Getriebe	60 kg
Elektromotoren	70 kg
Batterie	42 kg
Katalysator	7,1 kg

Tabelle 9.8: Verwendete Gewichte der Komponenten

Die damit berechneten Aufwände zur Herstellung werden summiert und dienen als Ausgangspunkt für die Berechnung des Energieverbrauchs während der Nutzungsdauer des Fahrzeugs. Abbildung 9.5 stellt diesen Verlauf dar.

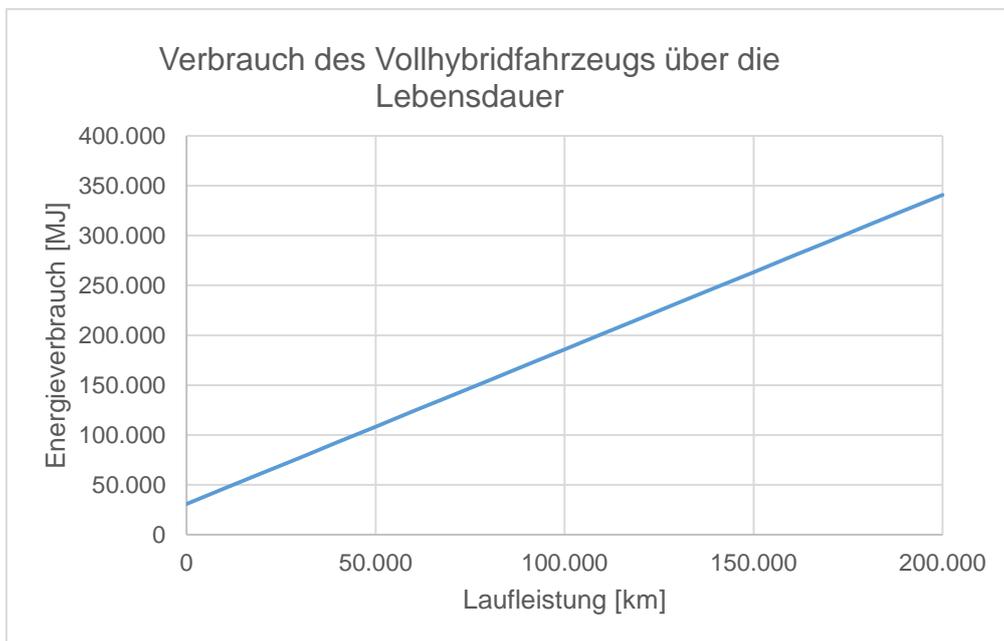


Abbildung 9.5: Verbrauch des Vollhybridfahrzeugs über die Lebensdauer

elektrisch	2.238,1
Öl	579,5
Erdgas	1.096,0
Koks	159,0
Andere	407,6
Gesamt	4.480,2

Tabelle 9.9: Benötigte Energie zur Produktion eines 60 kg Automatikgetriebes

Auch hier werden für die Berechnung der Emissionen nur die in Tabelle 9.8 oben angeführten Komponenten betrachtet.

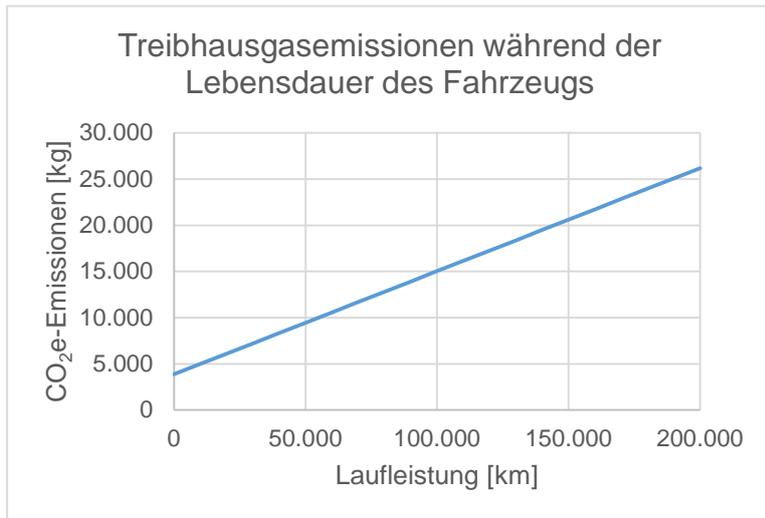


Tabelle 9.10: Treibhausgasemissionen im Betrieb des Hybridfahrzeugs

Arbeitsschritt	CO <sub>2</sub> e [kg]
Produktion Motor	540,71
- Strombedarf	1.020,73
Getriebe	234,30
- Strombedarf	349,39
Produktion E-Motor	260,26
- Strombedarf	415,07
Batterie	310,80
Katalysator	114,12
Leistungselektronik	616,00
<b>Gesamt</b>	<b>3.861,38</b>

Tabelle 9.11: CO<sub>2</sub>e- Emissionen bei der Herstellung des Vollhybrid-Antriebsstrangs

Besonders interessieren hierbei die Werte zu Beginn und am Ende der Lebensdauer. Zur Übersicht sind sie in Tabelle 9.12 eingefügt.

	Laufleistung [km]		
	0	100.000	200.000
CO <sub>2</sub> e-Emissionen [kg]	3.861	15.023	26.186

Tabelle 9.12: Treibhausgasemissionen zu ausgewählten Laufleistungen

### Plug-In Hybridfahrzeug

Das Plug-In Hybridfahrzeug wird mit dem Antriebsstrang des Toyota Prius ausgestattet, für dessen Einzelteile zuvor die anteilige Masse festgelegt wurde. Dazu wird ein Li-Ion Energiespeicher verbaut, der die elektrische Reichweite von 50 Kilometern ermöglicht.

Benzinmotor	100 kg
Getriebe	60 kg
Elektromotoren	70 kg
Batterie	88 kg
Katalysator	7,1 kg

Mit den Produktionsaufwänden der Komponenten aus Tabelle 9.13 ist der Ausgangspunkt für das Verbrauchsdiagramm des Betriebs vorhanden, das sich mit den auf Kilometer bezogenen Verbrauchswerten aus Tabelle 8.10 darstellen lässt (Abbildung 9.6).

Tabelle 9.13: Verwendete Gewichte der Komponenten

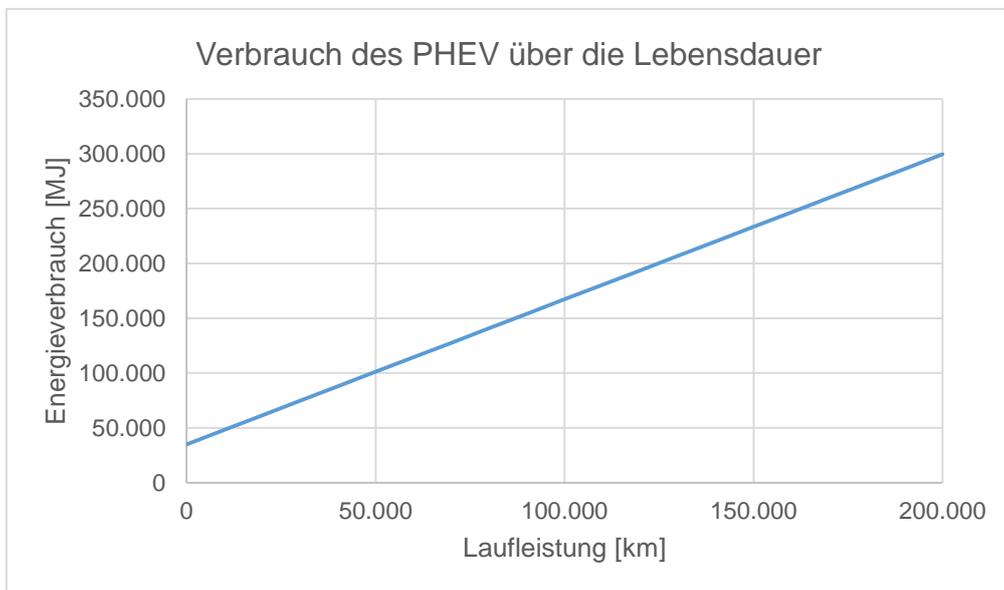


Abbildung 9.6: Verbrauch des PHEV in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke

Zur Bestimmung der Treibhausgase wird dem Ansatz von Kapitel 8.2.2 gefolgt, dass die in der Stadt zurückgelegten Kilometer elektrisch zurückgelegt werden. Für diese werden mit den länderspezifischen Emissionsfaktoren der Stromerzeugung die Abgaswerte berechnet. Für die extraurban bewältigte Strecke wird mit den Emissionswerten des Treibstoffs aus Tabelle 9.3 gearbeitet. Dabei ergeben sich je nach Herkunft der Elektrizität unterschiedliche Treibhausgasemissionen. Die Zusammenstellung im Drittmix ist in Tabelle 9.14 dargelegt. Exemplarisch sind in Abbildung 9.7 die Ergebnisse für den österreichischen und deutschen Strommix dargestellt.

	CO <sub>2</sub> e -Emissionen [g/km]		
	Benzin	elektrisch	gesamt
Österreich	124,64	0,03	0,813
Deutschland	124,64	0,08	2,187

Tabelle 9.14: Streckenabhängige Emissionen des PHEV

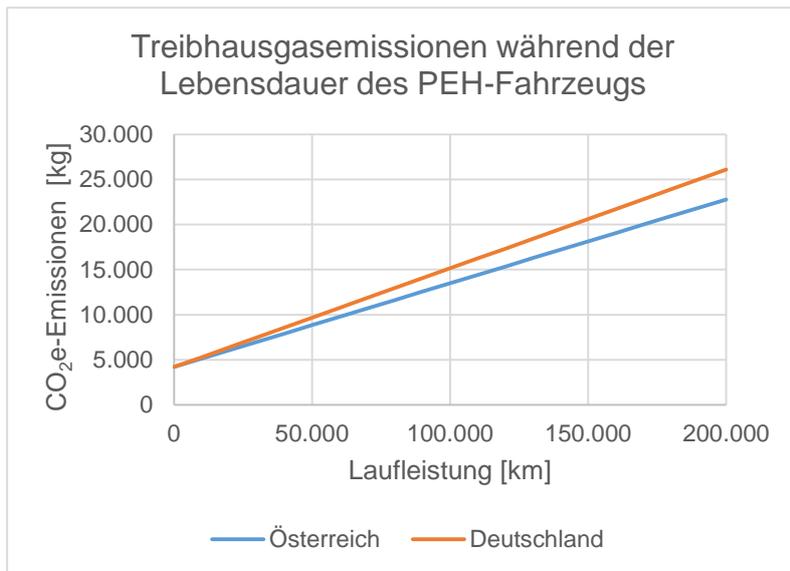


Abbildung 9.7: CO<sub>2</sub>e-Emissionen über der Lebensdauer des PHEV

Arbeitsschritt	CO <sub>2</sub> e [kg]
Produktion Motor	540,71
- Strombedarf	1.020,73
Getriebe	234,30
- Strombedarf	352,00
Produktion E-Motor	260,26
- Strombedarf	415,07
Batterie	648,17
Katalysator	114,12
Leistungselektronik	616,00
<b>Gesamt</b>	<b>4.201,36</b>

Tabelle 9.15: CO<sub>2</sub>e- Emissionen bei der Herstellung des Plug-In-Antriebsstrangs

### Elektrofahrzeug mit Range Extender (REEV)

Zur Bestimmung des Energieverbrauchs des REEV (Range Extender Electric Vehicle) wird berücksichtigt, dass der Verbrennungsmotor, sofern er eingesetzt wird, in serieller Hybridkonfiguration als Stationärmotor betrieben wird. Damit wird im Unterschied zu den bisher betrachteten Fahrzeugen der Wirkungsgrad und der Energieverbrauch nicht vom Fahrgebiet (urban / extraurban) abhängig gemacht, sondern von der Häufigkeit des Hybridbetriebes (und damit des VKM-Einsatzes). Der Bedarf an Energie für drei verschiedene Szenarien ist in Abbildung 9.8 veranschaulicht.

Motor	50 kg
Generator	20 kg
E-Motor	68 kg
Batterie	222 kg
Katalysator	7,1 kg

Tabelle 9.16: Verwendete Gewichte der Komponenten im Antriebsstrang des REEV

Um den Produktionsaufwand des Range Extenders zu erhalten, wird das Modell von Mahle [97] verwendet, das aus VKM und Generator in der Gewichtsverteilung 50 kg/20 kg besteht. Die beiden Einzelkomponenten lassen sich dann wie gehabt berechnen.

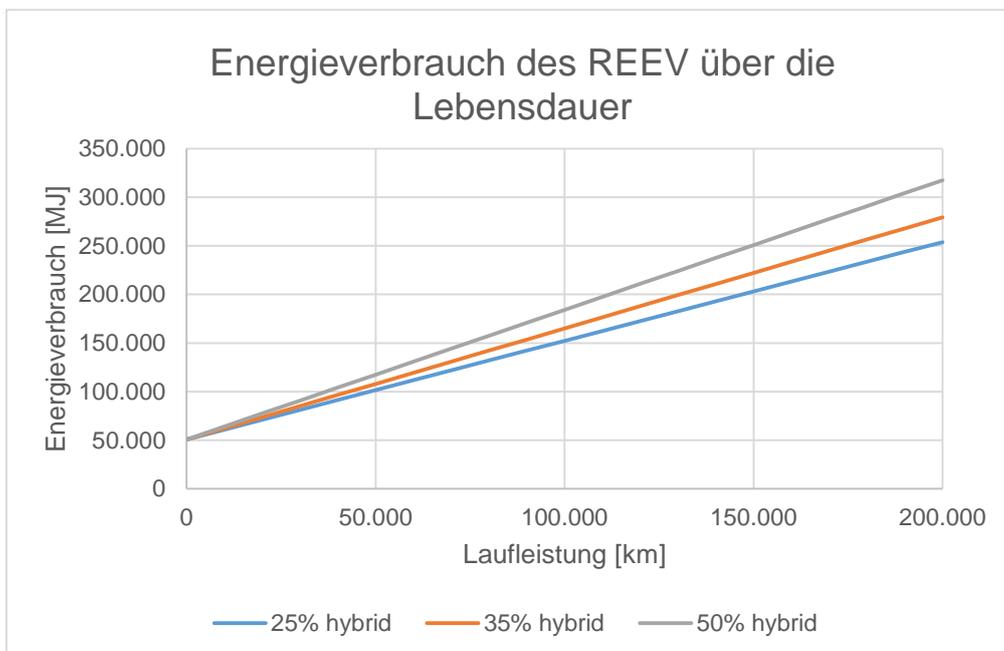


Abbildung 9.8: Energieverbrauch für drei Betriebsszenarien des REEV

Um die Emissionen während der Betriebsdauer zu ermitteln, muss wieder der Anteil der im Hybridmodus geführten Fahrten berücksichtigt werden. Zusätzlich zu den vorhandenen Szenarien wird der Standort berücksichtigt, indem die Emissionen der Stromerzeugung für den elektrischen Betrieb einmal mit dem deutschen und einmal mit dem österreichischen Emissionsfaktor zur Elektrizitätserzeugung berechnet werden. Somit erhält man sechs verschiedene Verbrauchsverläufe, abhängig von der Häufigkeit elektrischer Fahrten und von der Herkunft der Elektrizität.

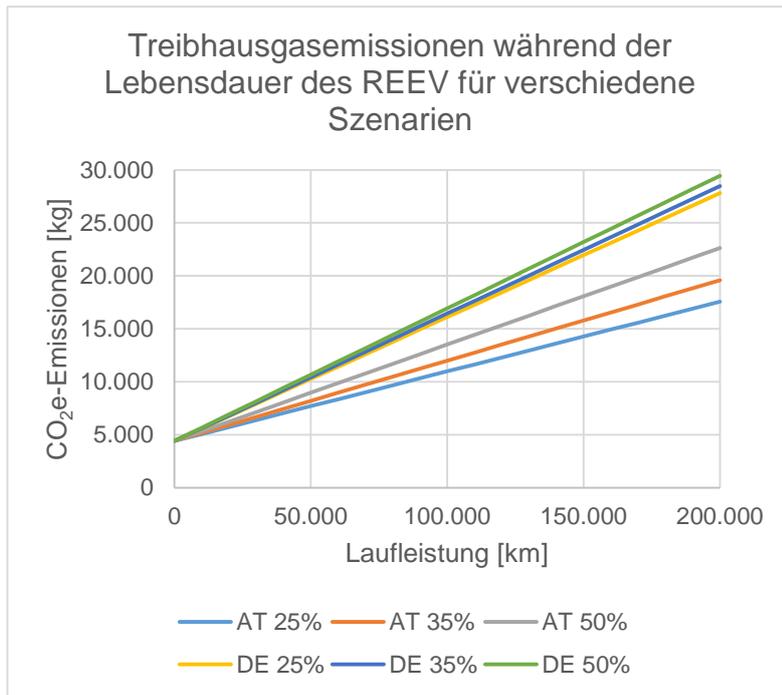


Abbildung 9.9: CO<sub>2</sub>e-Emissionen im Leben des REEV, abh. von Strommix und Häufigkeit des elektrischen Betriebs

Arbeitsschritt	CO <sub>2</sub> e [kg]
Produktion Motor	283,45
- Strombedarf	547,15
Getriebe	234,30
- Strombedarf	444,29
Produktion E-Motor	253,57
- Strombedarf	278,85
Batterie	1.644,44
Katalysator	114,12
Leistungselektronik	616,00
<b>Gesamt</b>	<b>4.416,17</b>

Tabelle 9.17: CO<sub>2</sub>e- Emissionen bei der Herstellung des REEV-Antriebsstrangs

Hier ist eindeutig zu erkennen, dass die Herkunft der Elektrizität – also der Mix der verwendeten Energieträger – einen beachtlichen Einfluss auf den Treibhausgasausstoß hat.

## 9.2 Vergleichende Betrachtung

Nachdem die Antriebskonzepte für sich betrachtet wurden, wird nun ein vergleichender Blick auf deren jeweiligen Produktionsaufwand geworfen. Darauf wird der Betrieb analysiert und in Hinblick auf Energiebedarf und anfallende Treibhausgasemissionen aufgelöst.

Als Erstes steht der Aufwand zur Produktion der Komponenten zur Diskussion. Wie in Abbildung 9.10 deutlich zu erkennen, bedarf das Elektrofahrzeug mit Range Extender am meisten Energie zur Herstellung. Dies liegt zum Großteil an der Li-Ion-Batterie, die wegen des hohen Gewichts in dieser Berechnung über 60% des Gesamtaufwands ausmacht. Auch das Elektrofahrzeug belegt wegen der energieintensiven Batterieherstellung den zweiten Platz in dieser Auflistung.

Dass die konventionellen Antriebe energetisch günstiger zu produzieren sind, liegt einerseits daran, dass in der Fertigung von Rohteilen und Einzelkomponenten schon viel Erfahrung gesammelt wurde und Potentiale zur Energieeinsparung auch höchstwahrscheinlich genutzt werden. Dazu kommt, dass diese Antriebskonfiguration der Ausgangspunkt für die anderen Systeme ist, es werden also Komponenten hinzugefügt, die mehr Energieeinsatz zur Herstellung brauchen.

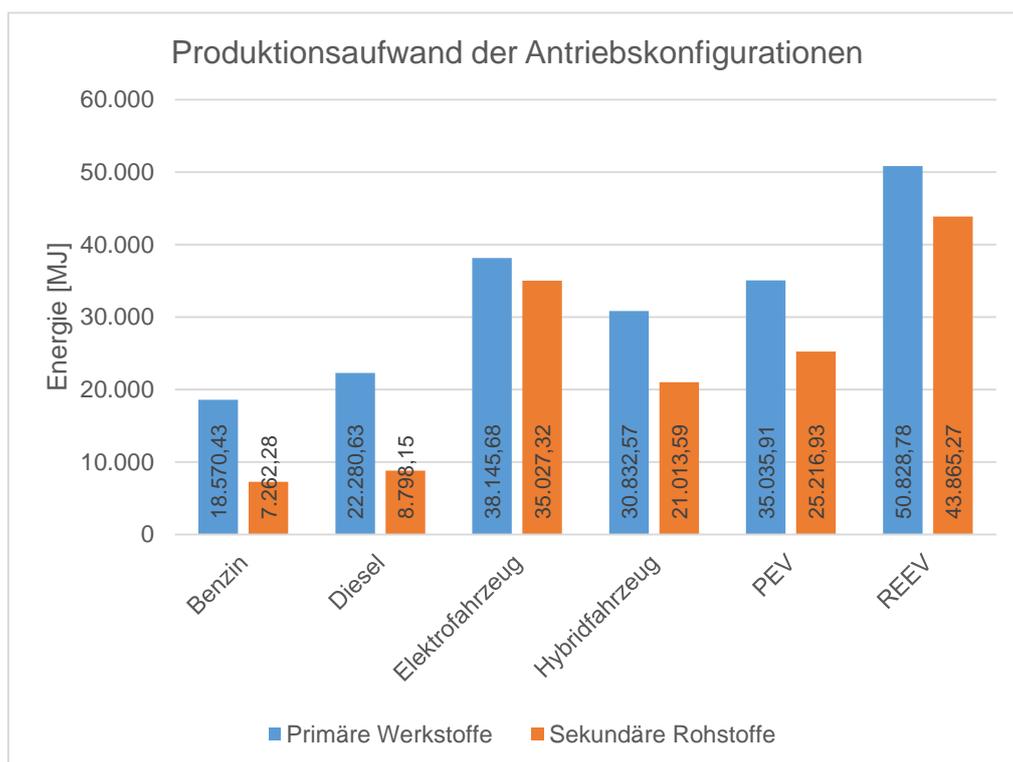


Abbildung 9.10: Produktionsaufwand der Antriebssysteme

Die während der Lebenszeit der Fahrzeuge aufzuwendende Energie setzt sich zusammen aus dem oben abgebildeten Produktionsaufwand und dem zum Bewegen des Fahrzeuges notwendigen Energieeinsatz, der sich über die Strecke summiert.

Um einen Eindruck des Letzteren zu erhalten wird in Abbildung 9.11 der reine kilometerabhängige Verbrauch ohne dem Produktionsaufwand – also mit gemeinsamen Startwert Null – dargestellt. In Abbildung 9.12 folgt die Addition der beiden zum gesamten Energiebedarf bis zum Lebensende. Tabelle 9.18 fasst die Anfangs- und Endwerte daraus zusammen.

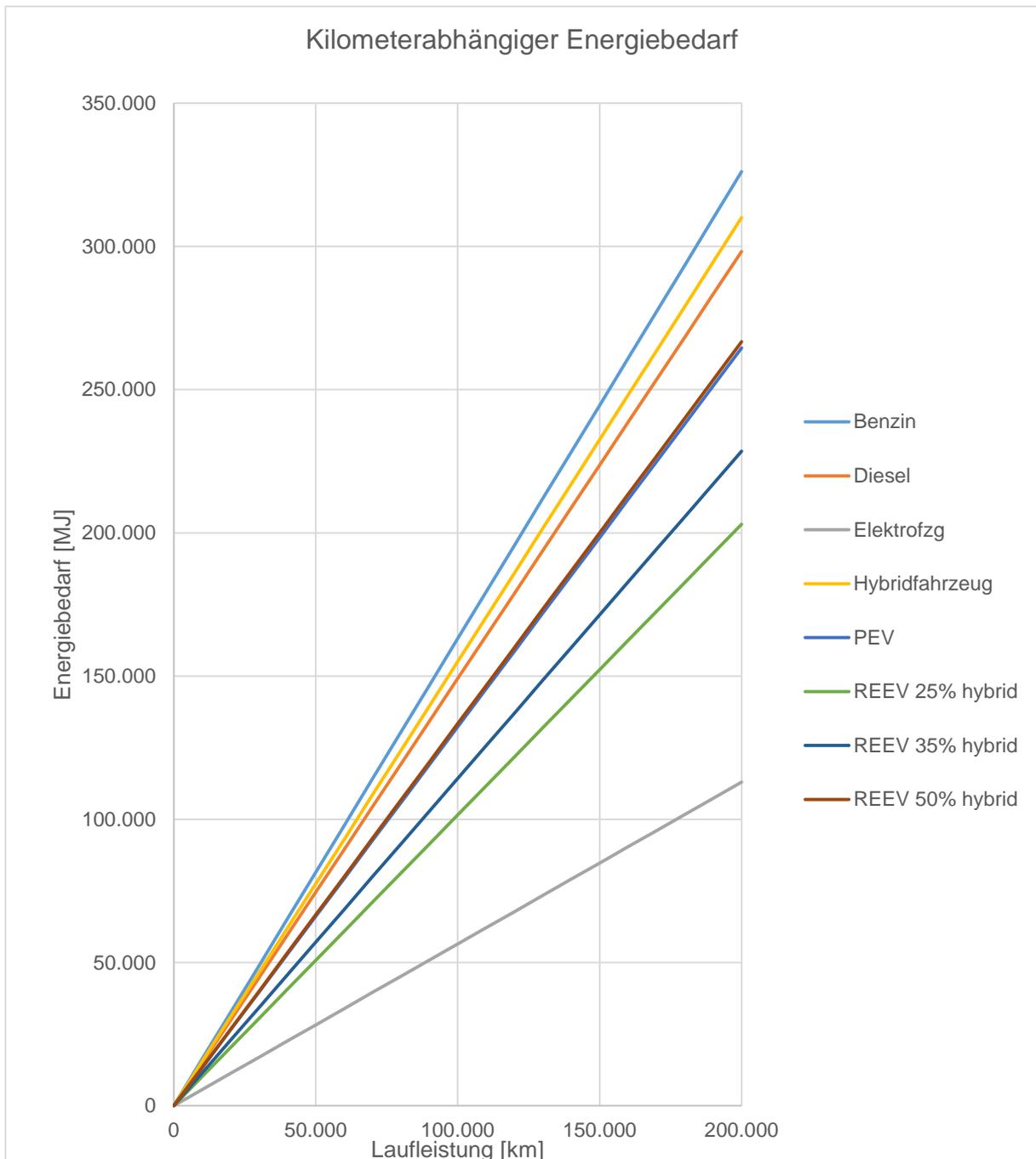


Abbildung 9.11: Energiebedarf verschiedener Antriebskonzepte während des Betriebes

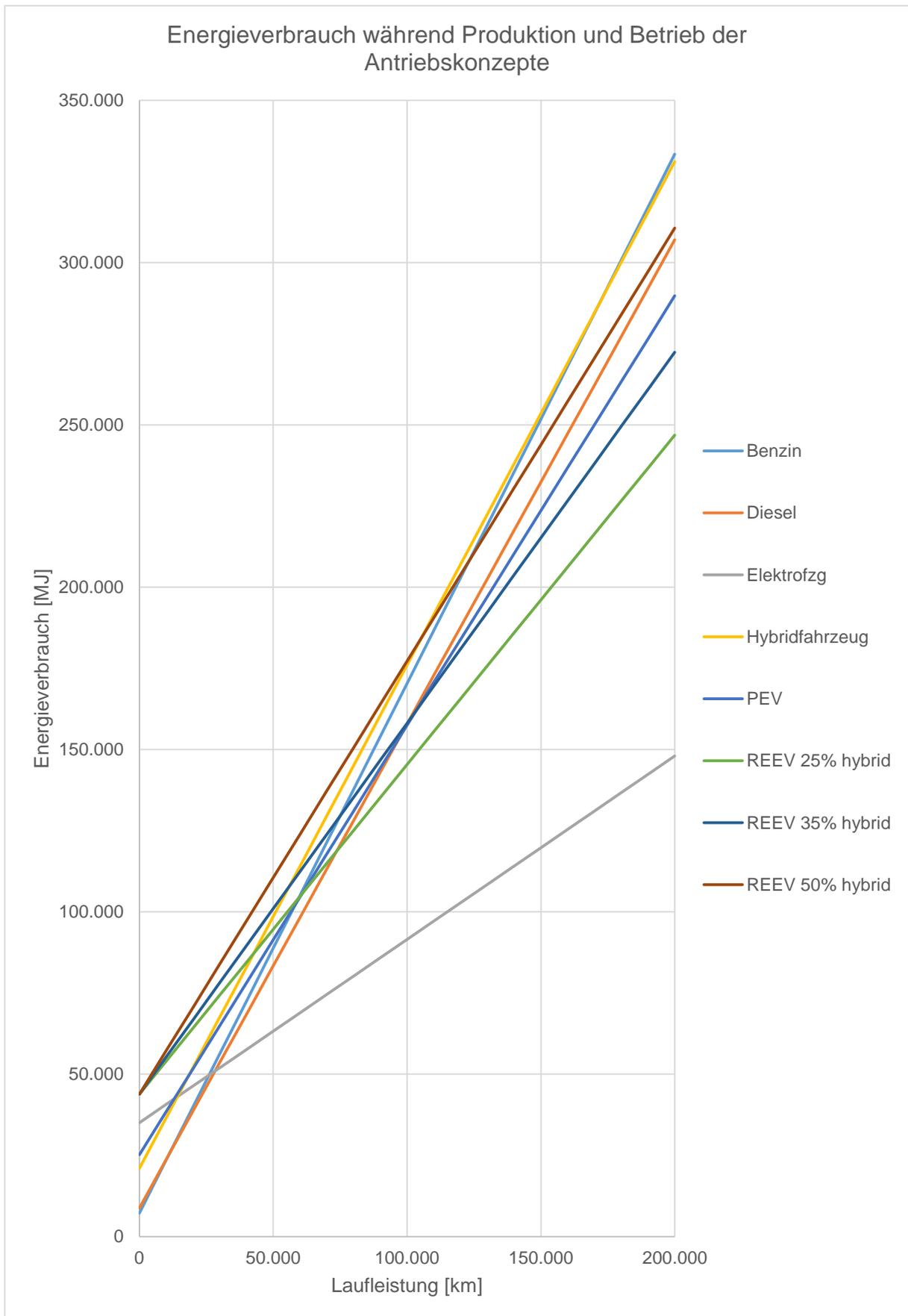


Abbildung 9.12: Energieverbrauch während Produktion und Betrieb der Antriebsstrangkonzepete, ausgehend von primären Werkstoffen

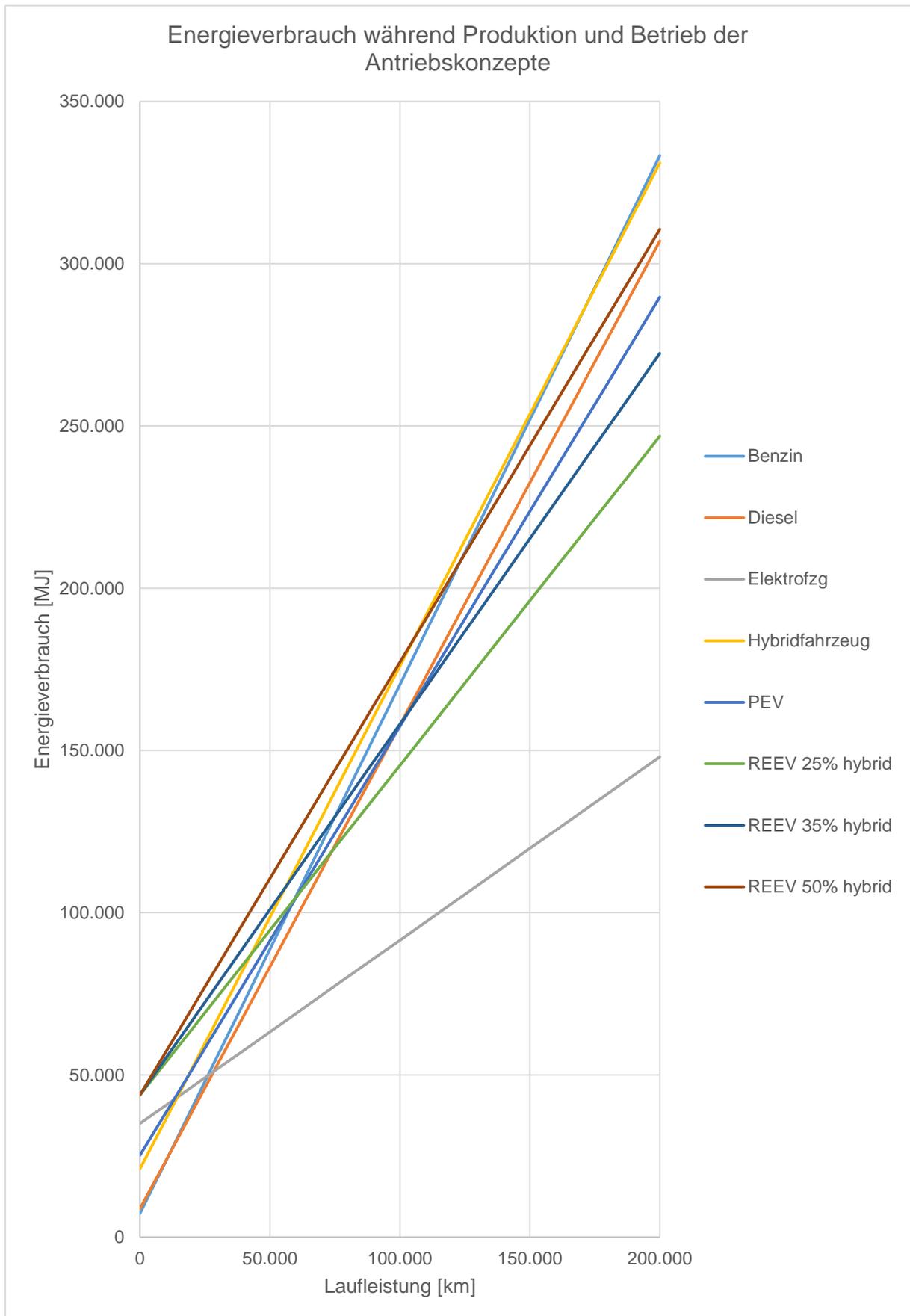


Abbildung 9.13: Energieverbrauch während Produktion und Betrieb der Antriebsstrangkonzepete, ausgehend von sekundären Werkstoffen

Das Elektrofahrzeug ist hierbei am sparsamsten. Das erklärt sich dadurch, dass Elektromotoren Wirkungsgrade von über 90% erreichen können, während sich Verbrennungskraftmaschinen in der Gegend von bis max. 40% aufhalten. Dass das Hybridfahrzeug den zweithöchsten Verbrauch aufweist, ist auf den in dieser Berechnung nur geringfügig besseren Wirkungsgrad zurückzuführen (0,289 im Drittmix zu 0,291).

[MJ]	Antriebskonzept			
Laufleistung [km]	Benzin	Diesel	Elektrofahrzeug	Hybridfahrzeug
0	18.570,43	22.280,63	38.145,68	30.832,57
200.000	344.668,03	320.483,03	151.142,48	340.890,97
Laufleistung [km]	PEV	REEV 25% hybrid	REEV 35% hybrid	REEV 50% hybrid
0	35.035,91	50.828,78	50.828,78	50.828,78
200.000	299.563,91	253.832,78	279.327,98	317.559,98

Tabelle 9.18: Werte des Energieverbrauchs, Produktion und am Lebensende

Abschließend müssen noch die Emissionen betrachtet werden. Bei der Produktion der Antriebskonzepte weist hier, wie beim Energiebedarf, das Elektrofahrzeug mit Range Extender den höchsten Wert auf. Die hier verbaute, schwere Batterie trägt dazu über 40% bei. Die Batterie im Plug-In Hybrid wurde wesentlich leichter angenommen, nur daher wird hier der zweithöchste Wert erreicht.

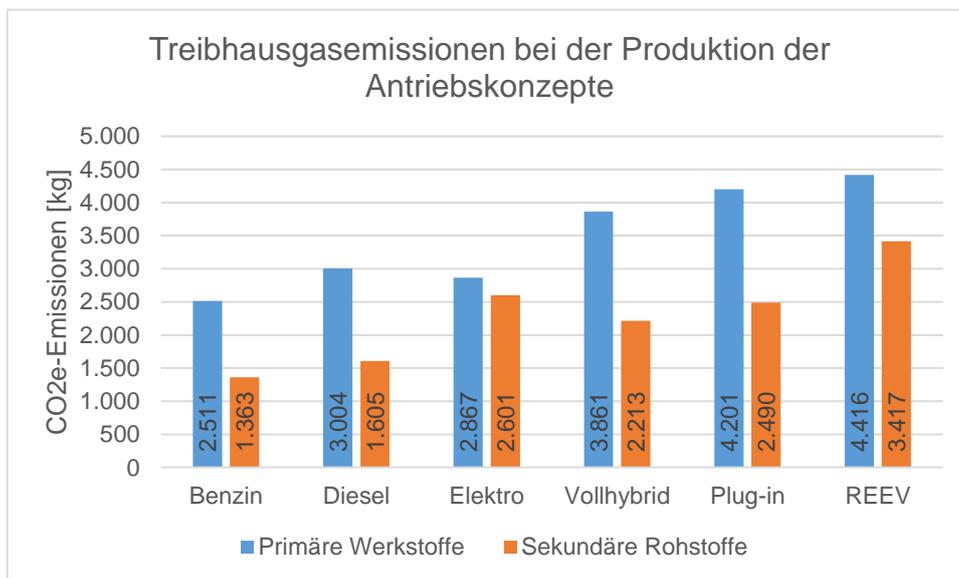


Abbildung 9.14: Bei der Produktion der Antriebe anfallende Treibhausgase

Bei den Emissionen im Betrieb kann das mit dem österreichischen Strommix betriebene Elektrofahrzeug mit den niedrigsten Emissionen aufwarten. Es wird lokal emissionsfrei bewegt, die Abgase entstehen bei der Stromerzeugung. Die Mischung der Energieträger bei der Elektrizitätserzeugung ist wesentlich; so liegt das selbe Fahrzeug, wenn mit deutschem Strom betrieben, bei einem Schadstoffausstoß in der Größenordnung des in Österreich betriebenen Plug-In Hybriden und des REEV mit 50% Hybridbetrieb.

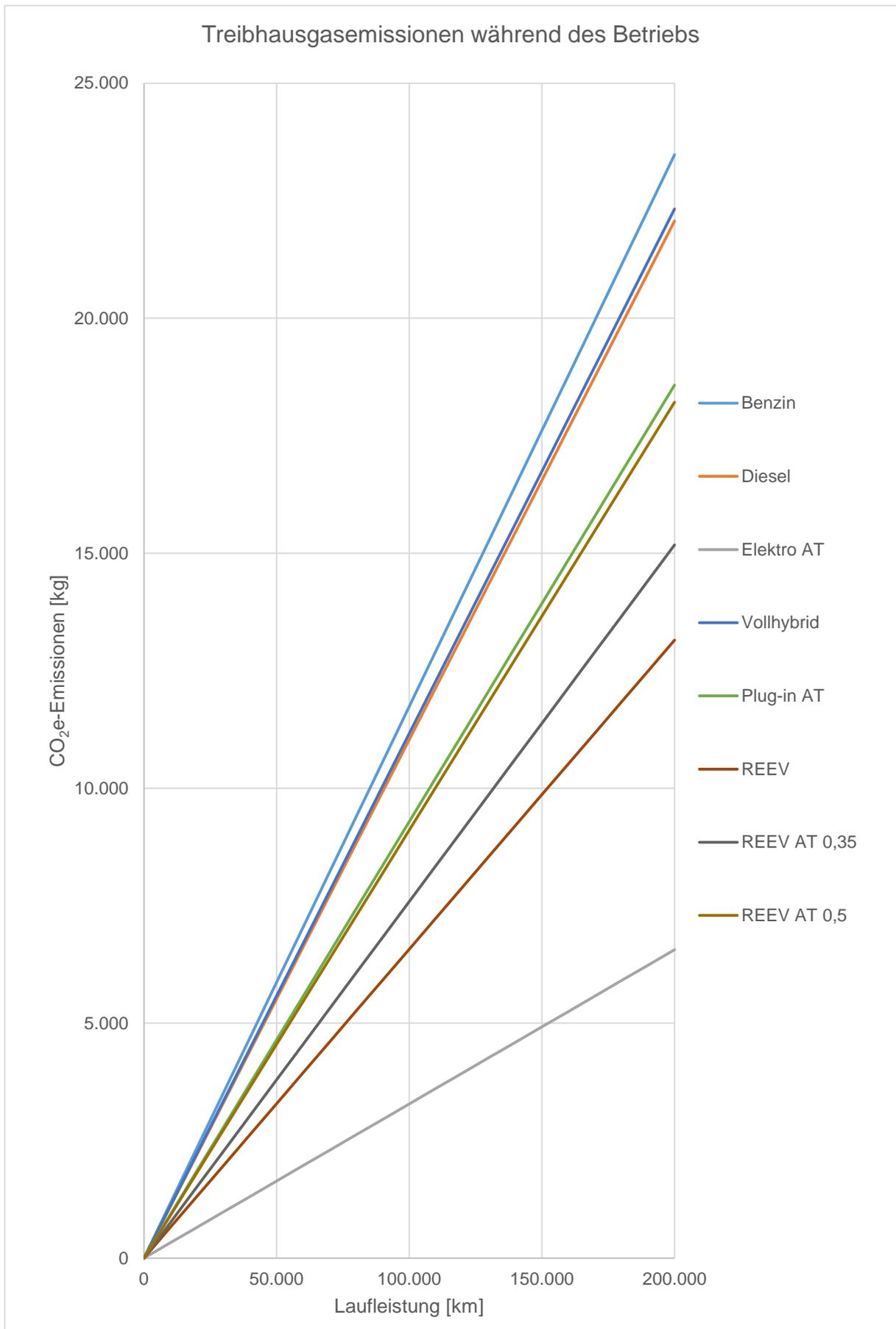


Abbildung 9.15: Emissionen an Treibhausgasen, abhängig von der Laufleistung. Österreichischer Strommix verwendet

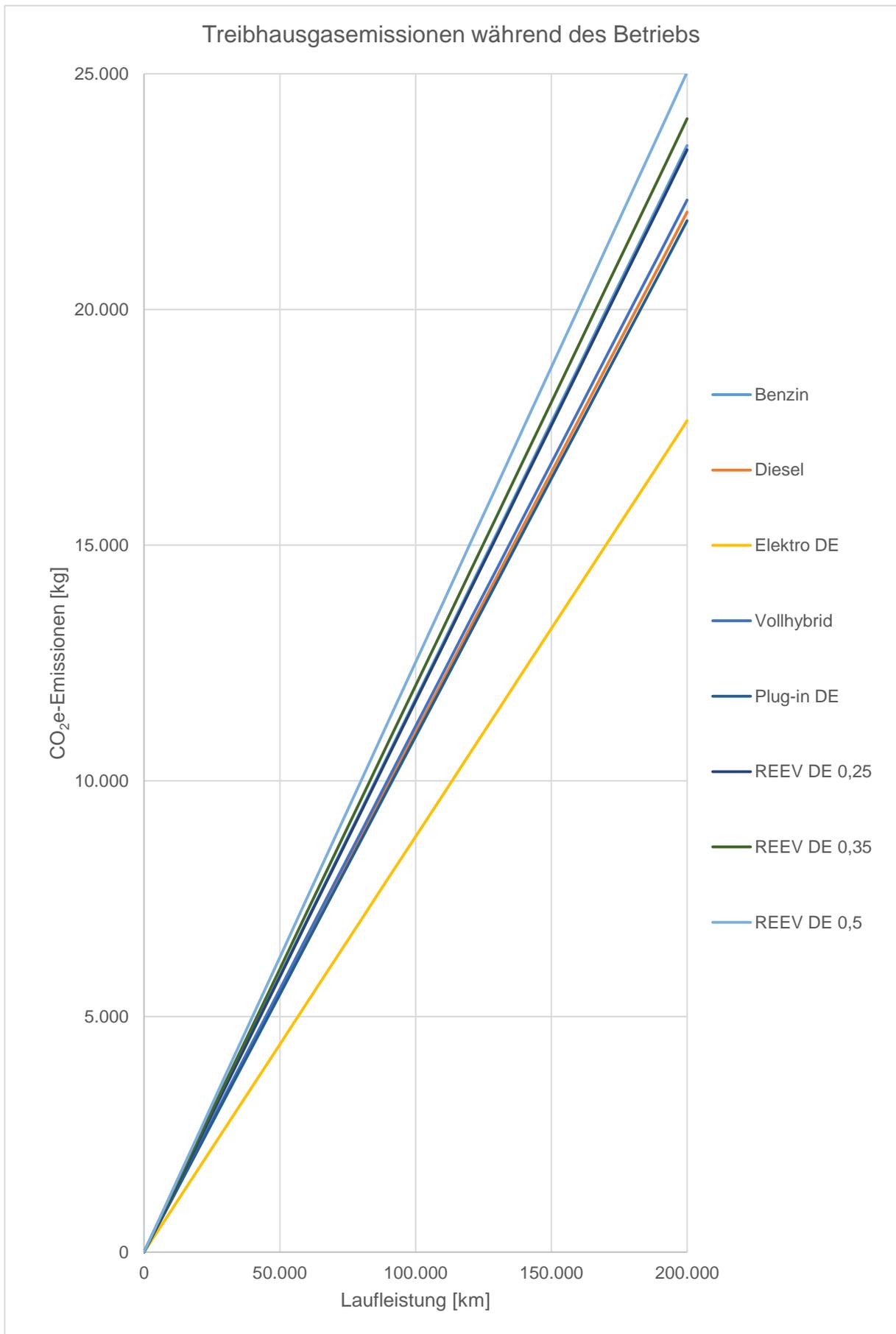


Abbildung 9.16: Treibhausgasemissionen während des Betriebs, deutscher Strommix verwendet

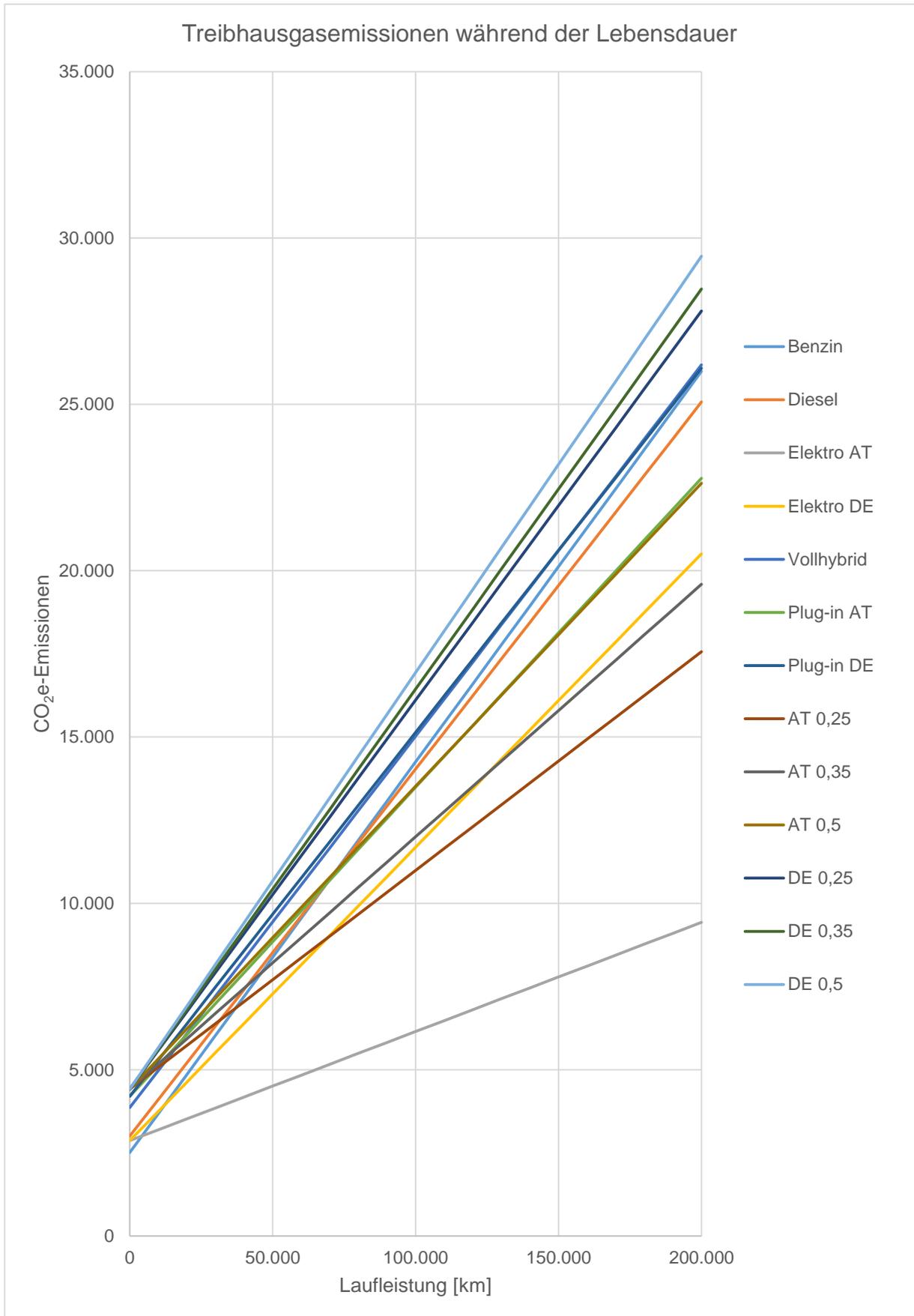


Abbildung 9.17: Treibhausgasemissionen während der Lebenszeit der Fahrzeuge (Produktion & Betrieb), ausgehend von 100% primären Werkstoffen

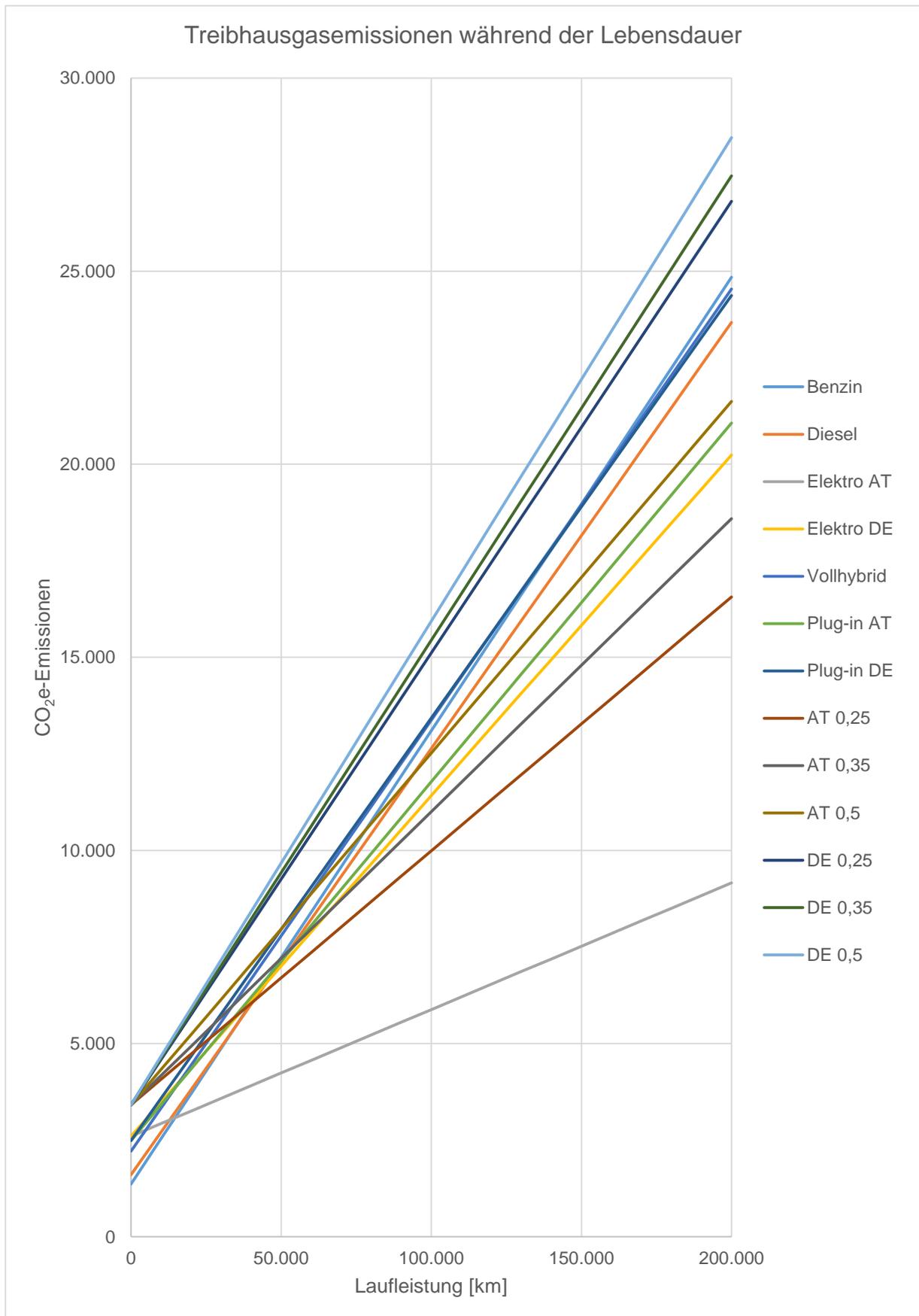


Abbildung 9.18: Treibhausgasemissionen während der Lebenszeit der Fahrzeuge (Produktion & Betrieb), ausgehend von 100% recycelten Werkstoffen

Auch wenn die Produktionsenergie dazugezählt wird, verändern sich das Fahrzeug mit den meisten und mit den wenigsten Emissionen nicht in ihrer Position. Das mit österreichischem Strom betriebene Elektrofahrzeug ist immer noch die abgasärmste Variante, Spitzenreiter bleibt das REEV mit 50% Hybridbetrieb bei deutschem Strommix. Erklären lässt sich das durch den seriellen Hybridbau, bei dem die Antriebskomponenten hintereinander geschaltet sind. Dadurch entsteht eine Wirkungsgradkette, bei der sich der Gesamtwirkungsgrad durch Multiplikation aller Einzelwirkungsgrade zusammensetzt. Dieser niedrige Gesamtwirkungsgrad des Hybridfahrzeugs erhöht den Verbrauch und somit den Ausstoß an Abgasen. In sind die Emissionen an Treibhausgasen zu Beginn des Betriebes und am Ende der festgelegten Lebensdauer enthalten. Die Werte für das Elektrofahrzeug und das REEV wurden mit dem österreichischen sowie dem deutschen Strommix berechnet, um die Bandbreite der europäischen Strommarktsituation wiederzugeben.

[kg CO <sub>2</sub> e]	Antriebskonzept			
Laufleistung	Benzin	Diesel	Elektrofahrzeug	Hybridfahrzeug
0,00	2.511,28	3.003,70	2.866,79	3.861,38
200.000,00	25.990,31	25.070,67	9.426,88	26.185,58
Laufleistung	AT PEV	AT REEV 25% hybrid	AT REEV 35% hybrid	AT REEV 50% hybrid
0,00	4.201,36	4.416,17	4.416,17	4.416,17
200.000,00	22.777,23	17.563,94	19.589,10	22.626,85
Laufleistung	DE PEV	DE REEV 25% hybrid	DE REEV 35% hybrid	DE REEV 50% hybrid
0,00	4.201,36	4.416,17	4.416,17	4.416,17
200.000,00	26.083,20	27.805,40	28.465,04	29.454,49

*Tabelle 9.19: Emissionen zu Beginn und am Ende der Betriebsphase, ausgehend von primären Werkstoffen*

[kg CO <sub>2</sub> e]	Antriebskonzept			
Laufleistung	Benzin	Diesel	Elektrofahrzeug	Hybridfahrzeug
0,00	1.362,64	1.605,12	2.600,65	2.212,75
200.000,00	24.841,67	23.672,09	9.160,75	24.536,95
Laufleistung	AT PEV	AT REEV 25% hybrid	AT REEV 35% hybrid	AT REEV 50% hybrid
0,00	2.490,12	3.417,18	3.417,18	3.417,18
200.000,00	21.065,99	16.564,95	18.590,12	21.627,87
Laufleistung	DE PEV	DE REEV 25% hybrid	DE REEV 35% hybrid	DE REEV 50% hybrid
0,00	2.490,12	3.417,18	3.417,18	3.417,18
200.000,00	24.371,95	26.806,41	27.466,05	28.455,51

*Tabelle 9.20: Emissionen zu Beginn und am Ende der Betriebsphase, ausgehend von sekundären Werkstoffen*

## 10 Conclusio

Ziel dieser Diplomarbeit war es, die Komponenten verschiedener Antriebsstrangkomponenten hinsichtlich ihres Energiebedarfs in der Produktion zu analysieren. Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellung zu ermitteln war Teil der Aufgabe.

Dazu gehörte die Betrachtung der Stromerzeugung, deren Emissionen länderspezifisch aufgeteilt werden konnten. Auch die Bereitstellung der Rohstoffe, die schon zuvor in einem eigenen Projekt behandelt wurde, konnte erweitert werden. Die Analyse der Komponentenfertigung, ein Schlüsselteil dieser Arbeit, setzte eine Beschäftigung mit Fertigungsprozessen voraus. Auffallend dabei war der hohe Energiebedarf, der für die Herstellung der Komponenten Batterie und Katalysatoren anfällt. Auch die Emission an Treibhausgasen ist ungewöhnlich hoch, relativiert sich beim Katalysator aber durch die geringe Menge der verwendeten Edelmetalle.

Des Weiteren wurde der Betrieb der unterschiedlichen Antriebstopologien mithilfe einer Fahrwiderstandssimulation betrachtet, um daraus unter Verwendung von Wirkungsgraden den Realverbrauch im Fahrzyklusbetrieb zu erhalten. Die erhaltenen Verbrauchswerte decken sich sehr gut mit den Erwartungswerten.

Die kombinierte Betrachtung von Produktion und Betrieb ermöglicht die Darstellung der Gesamtemissionen an Treibhausgasen und des Gesamtenergieverbrauchs bis zum Lebensende des Fahrzeugs. Dass die konventionellen Antriebe den höchsten Energiebedarf haben, kann mit dem schlechten Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren begründet werden. Das Hybridfahrzeug schneidet gesamt nur wenig besser ab. Es ist zwar im Betrieb genügsamer, gleicht das allerdings mit höherem Herstellungsaufwand aus. Das Fahrzeug mit dem niedrigsten gesamten Energieaufwand war das Elektrofahrzeug. In der Herstellung erfordert dieser Antriebsstrang zwar die zweitmeiste Energie, jedoch ist der Betrieb überaus effizient. Die Betrachtung der Treibhausgasemissionen zeigt deutlich, dass hybridisierte Fahrzeuge hier Vorteile bringen. Diese sind jedoch stark abhängig davon, welche Energieträger zur Stromerzeugung verwendet werden.

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien, *Gemis 4.8*.
- [2] PE International AG, *GaBi 5.0 Educational*.
- [3] Swiss Centre for Life Cycle Inventories, „The ecoinvent Database,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.ecoinvent.org/database/>. [Zugriff am 11 11 2013].
- [4] The MathWorks, Inc., *Matlab*.
- [5] International Organization for Standardization, *ISO 14040 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*, 2006.
- [6] W. Klöpffer, *Ökobilanz (LCA)*, WILEY-VCH Verlag, 2009.
- [7] International Organization for Standardization, *ISO 14044 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*, 2006.
- [8] J. Fava, F. Consoli, R. Denison, K. Dickson, T. Mohin und B. Vigon, *Conceptual Framework for Life-Cycle Impact Assessment*, 1993.
- [9] International Organization for Standardization, „ISO - International Organization for Standardization,“ [Online]. Available: <http://www.iso.org/>. [Zugriff am 25 11 2013].
- [10] E. Würdiger, *Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen: Vergleichende Ökobilanz für loose-fill-Packmittel aus Stärke bzw. Polystyrol*, Augsburg, 2002.
- [11] O. Jolliet, M. Margni und C. Humbert, „Impact 2002+: a new life cycle impact assessment methodology,“ *International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 8, Nr. 6, pp. 324-330, 2003.
- [12] „Matchboxxx Forum,“ [Online]. Available: <http://www.matchboxxx.de/Tipps/forum.php?fid=1&sec=showthread&id=16>. [Zugriff am 10 10 2013].

- [13] P. Hofmann, Hybridfahrzeuge, Wien: Springer-Verlag, 2010.
- [14] R. Ingruber, *Skriptum aus Innovative Fahrzeugantriebe*, 2013.
- [15] Tesla Motors, Inc., „Tesla Motors | Premium Electric Vehicles,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.teslamotors.com/>. [Zugriff am 11 11 2013].
- [16] BMW AG, „Der BMW i3 : Informieren,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.bmw.at/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2013/start.html>. [Zugriff am 18 11 2013].
- [17] Ford Motor Company, „Ford Focus Electric,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.ford.at/Pkw-Modelle/FordFocus/FordFocus-Electric>. [Zugriff am 18 11 2013].
- [18] Volkswagen AG 2013, „VW e-up!,“ 2013. [Online]. Available: [http://emosite.volkswagen.de/esn/up-eco-cheer/?culture=de\\_DE#upE](http://emosite.volkswagen.de/esn/up-eco-cheer/?culture=de_DE#upE). [Zugriff am 19 11 2013].
- [19] H.-D. Baehr und S. Kabelac, „Verbrennungsprozesse und Verbrennungskraftanlagen,“ in *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen*, Springer Verlag, 2006, pp. 445-524.
- [20] United States Environmental Protection Agency, „Climate Change,“ [Online]. Available: <http://www.epa.gov/climatechange/>. [Zugriff am 19 11 2013].
- [21] United Nations Framework Convention on Climate Change, „Kyoto Protocol,“ [Online]. Available: [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php). [Zugriff am 19 11 2013].
- [22] Intergovernmental Panel on Climate Change, „Direct Global Warming Potentials,“ in *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge/New York, Cambridge University Press, 2007.
- [23] Europäische Kommission, *An Energy Policy for Europe*, Brüssel, 2007.
- [24] Energie Control Austria, „Stromkennzeichnungsbericht 2012“.
- [25] D. Lübbert, „Deutscher Bundestag: Web-Archiv,“ [Online]. Available: [http://webarchiv.bundestag.de/archive/2007/0525/bic/analysen/2007/CO2-Bilanzen\\_verschiedener\\_Energietraeger\\_im\\_Vergleich.pdf](http://webarchiv.bundestag.de/archive/2007/0525/bic/analysen/2007/CO2-Bilanzen_verschiedener_Energietraeger_im_Vergleich.pdf). [Zugriff am 25 11 2013].

- [26] „United Nations Framework Convention on Climate Change,“ [Online]. Available: <http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/67D10YCTEJWHM54PFVN28QZGB3OLRU>. [Zugriff am 8 10 2013].
- [27] P. Maurer, Bericht zu Projekt Fahrzeugtechnik, Institut für Fahrzeugtechnik an der TU Graz, 2013.
- [28] United States Geological Survey, „Mineral Commodity Summaries 2012,“ U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, USA, 2012.
- [29] Stahlinstitut VDEh und Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Stahl Online - Roheisen- und Stahlerzeugung,“ [Online]. Available: [http://www.stahl-online.de/Deutsch/Linke\\_Navigation/Technik\\_Forschung/Produktionsverfahren/Roheisen-\\_und\\_Stahlerzeugung.php](http://www.stahl-online.de/Deutsch/Linke_Navigation/Technik_Forschung/Produktionsverfahren/Roheisen-_und_Stahlerzeugung.php). [Zugriff am 23 09 2013].
- [30] World Steel Association, „Annual crude steel production 2010,“ 2010.
- [31] D. Kellenberger, „Vergleich LCA-basierter Gebäudebewertungs- und Planungsinstrumente,“ EMPA.
- [32] J. Paeger, „Ökosystem Erde,“ [Online]. Available: <http://www.oekosystem-erde.de/html/rohstoffe.html>. [Zugriff am 17 10 2013].
- [33] D. Gruden, Umweltschutz in der Automobilindustrie, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [34] Stahlinstitut VDEh und Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Stahl Online - Energiewirtschaft,“ [Online]. Available: [http://www.stahl-online.de/Deutsch/Linke\\_Navigation/Technik\\_Forschung/Energie\\_und\\_Umwelttechnik/Energiewirtschaft.php#Energiewirtschaft](http://www.stahl-online.de/Deutsch/Linke_Navigation/Technik_Forschung/Energie_und_Umwelttechnik/Energiewirtschaft.php#Energiewirtschaft). [Zugriff am 17 10 2013].
- [35] Siemens AG, „Energiesparen bei der Stahlproduktion,“ 2011. [Online]. Available: <http://www.siemens.com/innovation/de/news/2011/energiesparen-bei-der-stahlproduktion.htm>. [Zugriff am 17 10 2013].
- [36] U.S. Energy Information Administration, „Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS),“ [Online]. Available: <http://www.eia.gov/consumption/manufacturing/briefs/steel/#energy-consumption>. [Zugriff am 17 10 2013].
- [37] American Iron and Steel Institute, „Sustainability and Steel in Automotive Applications,“ [Online]. Available: Sustainability and Steel in Automotive Applications. [Zugriff am 17 10 2013].

- [38] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH, „Abschätzung von Potenzialen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Automobilssektor,“ Wuppertal, 2007.
- [39] Umweltbundesamt GmbH, „Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich,“ Wien, 2010.
- [40] European Environment Agency, „B.2.C.1 Iron and steel production,“ in *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013*, 2013.
- [41] Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, „Recycling für den Klimaschutz,“ 2008.
- [42] United States Geological Survey, „Mineral Commodity Summary,“ 2013. [Online]. Available: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bauxite/mcs-2013-bauxi.pdf>. [Zugriff am 15 09 2013].
- [43] International Aluminium Institute, „World Aluminium - Mining and Refining,“ 2012. [Online]. Available: <http://bauxite.world-aluminium.org/home.html>. [Zugriff am 20 10 2013].
- [44] The International Aluminium Institute, „2010 Life Cycle Inventory Data for the Worldwide Primary Aluminium Industry,“ 2013.
- [45] International Aluminium Institute, „2010 Life Cycle Inventory for the Worldwide Primary Aluminium Industry,“ 2013. [Online]. Available: [http://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2013/09/13/2010\\_life\\_cycle\\_inventory\\_data\\_for\\_the\\_worldwide\\_primary\\_aluminium\\_industry\\_1.xls](http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/09/13/2010_life_cycle_inventory_data_for_the_worldwide_primary_aluminium_industry_1.xls). [Zugriff am 11 11 2013].
- [46] Umweltbundesamt Deutschland, „CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren von Brennstoffen,“ [Online]. Available: [http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.de%2Fsite%2Fdefault%2Ffiles%2Fmedien%2F377%2Fdokumente%2Fco2\\_faktoren\\_brennstoffe.xls&ei=EJuLUv6RNcrLtQaX6oHoBQ&usg=AFQjCNFcJ1hY3ft-q](http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.de%2Fsite%2Fdefault%2Ffiles%2Fmedien%2F377%2Fdokumente%2Fco2_faktoren_brennstoffe.xls&ei=EJuLUv6RNcrLtQaX6oHoBQ&usg=AFQjCNFcJ1hY3ft-q). [Zugriff am 31 07 2013].
- [47] Austria Metall GmbH, *Energiebilanz Cast-F 2012*, Ranshofen, 2012.
- [48] Gespräch mit Mag. Gupfinger, Austria Metall GmbH.

- [49] European Environment Agency, „B.2.C.3 Aluminium Production,“ in *EMEP/EEA air pollutant emission inventory*, 2013.
- [50] K. H. Bruch, D. Gohlke, C. Kögler, J. Krüger, I. v. Röpenack, E. Rombach, G. Rombach und P. Winkler, „Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und -verarbeitung,“ RWHT Aachen, Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie, Aachen, 1995.
- [51] GEMIS, *Kommentar zu Prozess "Metall/Kupfer-DE-primär-2010"*.
- [52] Aurubis AG, „Metallrecycling,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.aurubis.com/de/geschaeftsfelder/rohstoffe/recycling/metallrecycling/>. [Zugriff am 19 11 2013].
- [53] Aurubis AG, „Umweltreport 2012,“ Hamburg, 2012.
- [54] A. F. Holleman und N. Wiberg, Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102. Auflage Hrsg., de Gruyter, 2008, p. 1433.
- [55] C. Hagelüken, Autoabgaskatalysatoren, Renningen: expert verlag, 2005.
- [56] GEMIS, *Prozess "Edelmetall/Pt-primär-mix-westl. Welt"*.
- [57] A. Stamp, D. J. Lang und P. A. Wäger, „Environmental impacts of a transition toward e-mobility: the present and future role of lithium carbonate production,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 23, Nr. 1, pp. 104-112, 3 2012.
- [58] U. Wietelmann und R. J. Bauer, „Lithium and Lithium Compounds,“ in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Wiley-VCH, 2000, pp. 349-366.
- [59] G. W. Schweimer und M. Levin, „Life Cycle Inventory for the Golf A4,“ Volkswagen AG, 2007. [Online]. Available: [http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info\\_center/en/publications/2007/01/Golf\\_A4\\_\\_Life\\_Cycle\\_Inventory.-bin.acq/qual-BinaryStorageItem.Single.File/golfa4\\_english.pdf](http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/en/publications/2007/01/Golf_A4__Life_Cycle_Inventory.-bin.acq/qual-BinaryStorageItem.Single.File/golfa4_english.pdf). [Zugriff am 4 11 2013].
- [60] Deutsche Bundesstiftung Umwelt, „Weniger Energieeinsatz beim Schmieden,“ [Online]. Available: [http://www.dbu.de/123artikel2014\\_341.html](http://www.dbu.de/123artikel2014_341.html). [Zugriff am 1 11 2013].

- [61] B. Nacke und E. Wrona, „Analyse und Optimierung des Energiebedarfs von induktiven Schmiede-Erwärmern,“ *Schmiede-Journal*, pp. 22-23, 3 2002.
- [62] R. Herbertz, H. Hermanns, J. Höh, M. Langejürgen und A. Seitzer, „Energieeffizienz in der Massivumformung I,“ *SchmiedeJOURNAL*, pp. 24-29, 9 2012.
- [63] Europäische Kommission, *Kraftfahrzeugvertrieb und -kundendienst in der Europäischen Union - Verordnung (EG) Nr. 1400/2002*, 2002.
- [64] Volkswagen AG, „Der TSI-Motor Umweltprädikat - Hintergrundbericht,“ Wolfsburg, 2009.
- [65] Volkswagen AG, „Umwelterklärung 2012 Salzgitter,“ Wolfsburg, 2012.
- [66] BMW Motoren GmbH, „Umwelterklärung 2010/2011 Standort Steyr,“ Steyr, 2011.
- [67] P. Balzer, „Motorblog,“ 2012. [Online]. Available: <http://www.cbcity.de/automatikgetriebeentwicklung>. [Zugriff am 07 11 2013].
- [68] "Xavax", „Wikimedia,“ [Online]. Available: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b9/Doppelkupplungsgetriebe-A.svg>. [Zugriff am 20 10 2013].
- [69] Volkswagen AG, „Hintergrundbericht Umweltprädikat DSG,“ [Online]. Available: [http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/umweltpraedikate/up\\_dsg\\_hintergrundbericht/\\_jcr\\_content/renditions/rendition.file/umweltpraedikate\\_par\\_0033\\_file.pdf](http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/umweltpraedikate/up_dsg_hintergrundbericht/_jcr_content/renditions/rendition.file/umweltpraedikate_par_0033_file.pdf). [Zugriff am 15 10 2013].
- [70] Getrag AG, „Nachhaltigkeitsbericht 2012,“ Untergruppenbach, 2012.
- [71] I. Buchmann, „Battery University,“ [Online]. Available: <http://batteryuniversity.com/>. [Zugriff am 20 09 2013].
- [72] E. Riedel, *Allgemeine und Anorganische Chemie*, De Gruyter, 2010.
- [73] Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, „A Review of Battery Life Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs,“ Chicago, 2010.

- [74] D. A. Notter, M. Gauch, R. Widmer, P. Wager, A. Stamp, R. Zah and H.-J. Althaus, "Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles," *Environmental Science & Technology*, vol. 44, pp. 6550-6556, 2010.
- [75] C. Zhu, A. Nobuta, G. Saito, I. Nakatsugawa und T. Akiyama, „Solution combustion synthesis of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> fine powders for lithium ion batteries,“ *Advanced Powder Technology*, In Press, Corrected Proof.
- [76] K. Ishihara, N. Kirira, N. Terada und T. Iwahori, „Electrochemical Society Meeting,“ in *Environmental Burdens of Large Lithium-Ion Batteries Developed in a Japanese National Project*, Salt Lake City, 2002.
- [77] M. Torrent, M. Eusebi und P. Andrada, „Life cycle analysis on the design of induction motors,“ *International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 17, Nr. 1, pp. 1-8, 1 2012.
- [78] W. Boughanmi, J. Manata und D. Roger, „Life cycle assessment of a three-phase electrical machine in continuous operation,“ *IET Electric Power Applications*, pp. 277-285, 5 2012.
- [79] M. Torrent, M. Eusebi und P. Andrada, „Assessing the environmental impact of induction motors using manufacturer’s data and life cycle analysis,“ *IET Electric Power Applications*, Bd. 6, Nr. 8, pp. 473-483, 9 2012.
- [80] Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, „Herstellung von Stahlrohren,“ [Online]. Available: [http://www.dgm.de/download/tg/686/686\\_84.pdf](http://www.dgm.de/download/tg/686/686_84.pdf). [Zugriff am 4 11 2013].
- [81] Das Luxemburgische Portal des Bauwesens, „Rohrleitungen,“ 2009. [Online]. Available: <http://www.crtib.lu/Leitfaden/content/DE/113/C579/>. [Zugriff am 2 11 2013].
- [82] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 13322-2 Ortsbewegliche Gasflaschen - Wiederbefüllbare geschweißte Flaschen aus Stahl - Gestaltung und Konstruktion*, 2006.
- [83] General Motors Austria GmbH, „Opel Zafira Tourer - Technische Daten,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.opel.at/fahrzeuge/opel-modelluebersicht/personenwagen/zafira-tourer/spezifikationen/technische-daten.html>. [Zugriff am 2 11 2013].

- [84] R. Gerboni, N. Demaio, L. Maffia und S. Rossi, „LCA of a carbon fibre wrapped pressure vessel for automotive applications,“ in *Proceedings of the 6th International Conference on EcoBalance*, Turin, 2004.
- [85] W. Amatayakul und O. Ramnäs, „Life cycle assessment of a catalytic converter for passenger cars,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 9, Nr. 5, pp. 395-403, 10 2001.
- [86] E. L. Belcastro, *Life Cycle Analysis of a Ceramic Three-Way Catalytic Converter*, Blacksburg: VirginiaTech University Diplomarbeit, 2012.
- [87] S.K. Handels GmbH, „s.k. innovative solutions,“ [Online]. Available: <http://www.sk-handels-ag.de/dieselpartikelfilter-sk-handels-ag.html>. [Zugriff am 10 9 2013].
- [88] Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touringclub (ÖAMTC), „ÖAMTC - EcoTests,“ 2006. [Online]. Available: [http://www.oeamtc.at/html\\_seiten/ecotest/testablauf/testablauf.htm](http://www.oeamtc.at/html_seiten/ecotest/testablauf/testablauf.htm). [Zugriff am 24 11 2013].
- [89] European Federation for Transport and Environment AISBL, „Mind the Gap! Why official car fuel economy figures don't match up to reality,“ 2013.
- [90] S. Hausberger und M. Schmitzberger, „Emissionsverhalten von SUV - Sport Utility Vehicles,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2008.
- [91] W. Hirschberg, Skriptum Kraftfahrzeugtechnik, TU Graz, 2012.
- [92] Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik, „Batterieelektrische fahrzeuge in der Praxis,“ Wien, 2012.
- [93] DATAFACT - Autodaten und Fakten, „KFZ Zulassungen seit Jahresbeginn,“ 2013. [Online]. Available: [http://www.datafact.com/produkte/kfzwirt/leg/pkw\\_typ\\_kumuliert.html](http://www.datafact.com/produkte/kfzwirt/leg/pkw_typ_kumuliert.html). [Zugriff am 11 11 2013].
- [94] Toyota Deutschland GmbH, „Fakultät Ingenieurwissenschaft und Informatik, Hochschule Osnabrück,“ 2005. [Online]. Available: [http://www.ecs.hs-osnabrueck.de/uploads/media/TOYOTA-Prius-RX-400h\\_02.pdf](http://www.ecs.hs-osnabrueck.de/uploads/media/TOYOTA-Prius-RX-400h_02.pdf). [Zugriff am 11 11 2013].
- [95] Toyota Austria GmbH, „Toyota Prius Online Prospekt,“ 3 2012. [Online]. Available: [http://www.toyota.at/Images/11278\\_PRU\\_44\\_AUT\\_tcm303-1261944.pdf](http://www.toyota.at/Images/11278_PRU_44_AUT_tcm303-1261944.pdf). [Zugriff am 11 11 2013].

- [96] Technische Universität Wien, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, „Entwicklung von Szenarien der Verbreitung von PKW mit teil- und voll-elektrifiziertem Antriebsstrang unter verschiedenen politischen Rahmenbedingungen,“ Wien, 2009.
- [97] Mahle Powertrain Ltd., „MAHLE kompakter Range Extender Motor,“ 2011. [Online]. Available: [http://www.mahle-powertrain.com/C1257126002DFC22/vwContentByUNID/A708E950D66EA44BC12578860027969B/\\$FILE/Range\\_Extender\\_Engine\\_DE.pdf](http://www.mahle-powertrain.com/C1257126002DFC22/vwContentByUNID/A708E950D66EA44BC12578860027969B/$FILE/Range_Extender_Engine_DE.pdf). [Zugriff am 13 11 2013].
- [98] Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, „Kompakter Range-Extender von Kolbenschmidt Pierburg und FEV,“ 2011. [Online]. Available: <http://www.springerprofessional.de/servlet/segment/springer-professional/kompakter-range-extender-von-kolbenschmidt-pierburg-und-fev-14523/3951148.html>. [Zugriff am 13 11 2013].
- [99] H. Brunner, *VO Innovative Fahrzeugantriebe*. Technische Universität Graz, Institut für Fahrzeugtechnik, 2013.
- [100] Institut für Energie-und Umweltforschung Heidelberg GmbH, „Abwrackprämie und Umwelt - eine erste Bilanz,“ 31 8 2009. [Online]. Available: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ifeu\\_abwrackpraemie\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ifeu_abwrackpraemie_bf.pdf). [Zugriff am 5 11 2013].
- [101] VCÖ - Verkehrsclub Österreich, „Presseaussendung 2010-26,“ 2010. [Online]. Available: <http://www.vcoe.at/de/presse/aussendungen-archiv/details/items/2010-26?print=true>. [Zugriff am 5 11 2013].
- [102] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe,“ 2009. [Online]. Available: [http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug\\_app000030?SID=2100964848&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:lfu\\_klima\\_00022,BILDxCLASS:Artikel,BILDxTYPE:PDF\)](http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug_app000030?SID=2100964848&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:lfu_klima_00022,BILDxCLASS:Artikel,BILDxTYPE:PDF)). [Zugriff am 13 11 2013].
- [103] G. Bachner, *Eine vergleichende Treibhausgas-Lebenszyklusanalyse von Automobilen mit elektrischem Antrieb und Verbrennungskraftmaschine mit einer Anwendung in der Verkehrspolitik*, 2011.

Abbildung 2.1: Stark vereinfachter Lebensweg eines (materiellen) Produkts.....	3
Abbildung 2.2: Stoff- und Energieflüsse eines Produktsystems.....	5
Abbildung 2.3: Situation, die Allokation erfordert .....	6
Abbildung 2.4: Das SETAC-Dreieck und dessen Erweiterung in den LCA-Guidelines7	
Abbildung 2.5: Phasen und Anwendungen einer Ökobilanz nach ISO 14040 .....	8
Abbildung 2.6: Beispiel eines Produktbaumes.....	9
Abbildung 2.7: Vereinfachte Verfahren in der Sachbilanz .....	10
Abbildung 2.8: Einordnung der Auswertung innerhalb der Ökobilanz.....	13
Abbildung 3.2: Topologische Einteilung der Hybridantriebe .....	16
Abbildung 3.3: Beispiel für den elektrischen Aufbau eines Plug-In Hybridfahrzeugs	17
Abbildung 3.4: Wirkungsgradkette eines seriellen Hybridfahrzeugs (Quelle [8]) .....	19
Abbildung 3.5: Einwellen- und Zweiwellen-Parallelhybridsysteme (Quelle [8]).....	19
Abbildung 3.6: Elektrische Komponenten im Antriebsstrang des Elektrofahrzeugs..	20
Abbildung 5.1: Verteilung des Eisenerzabbaus .....	25
Abbildung 5.2: Verteilung der weltweiten Stahlerzeugung.....	26
Abbildung 5.3: Verteilung der verwendeten Energieträger in der Stahlerzeugung ...	27
Abbildung 5.4: Schema eines Lichtbogenofens.....	28
Abbildung 5.5: Verteilung des Bauxitabbaus .....	30
Abbildung 5.6: Prozesskette der Aluminiumherstellung.....	32
Abbildung 5.7: Kupferminenproduktion nach Ländern 2011 .....	37
Abbildung 5.8: Produktbaum zur Gewinnung von Platin.....	41
Abbildung 5.9: Methoden der Lithiumkarbonatgewinnung .....	44
Abbildung 5.10: Energieaufwand der primären Herstellung verschiedener Werkstoffe	
.....	48
Abbildung 7.1: Gewicht und Leistung ausgewählter 4-Zyl. - Ottomotoren .....	53
Abbildung 7.2: Gewicht und Leistung verschiedener VKM, in grau die 4-Zyl.	
Ottomotoren.....	53
Abbildung 7.3: Mittleres Gewicht der Motoren, nach Fahrzeugsegment .....	53
Abbildung 7.4: Werkstoffverteilung von Ottomotoren .....	54
Abbildung 7.5: Spezifische und gesamte Herstellungsenergie von Motoren, Cradle to	
Gate.....	56
Abbildung 7.6: Energieaufwand der Motorenproduktion abhängig vom Gewicht,	
aufgeteilt nach Energieträger.....	57
Abbildung 7.7: Erweiterung des Fahrbereichs durch Getriebe .....	59
Abbildung 7.8: Schematische Darstellung eines DSG .....	59
Abbildung 7.9: Werkstoffverteilung automatischer Getriebe .....	60
Abbildung 7.10: Herstellungsenergie Schaltgetriebe, Cradle to Gate .....	62
Abbildung 7.11: Energiebedarf der Schaltgetriebeherstellung abhängig vom Gewicht,	
nach Energieträgern aufgeschlüsselt .....	63
Abbildung 7.12: Herstellungsaufwand Automatikgetriebe, Cradle to Gate .....	63
Abbildung 7.13: Energiebedarf der Schaltgetriebeherstellung abhängig vom Gewicht,	
nach Energieträgern aufgeschlüsselt .....	64
Abbildung 7.14: Getriebeherstellung, Energiebedarf gesamt und spezifisch.....	65
Abbildung 7.15: Leistungsdichte verschiedener Akkumulatoren im Vergleich zur	
spezifischen Arbeit .....	66

Abbildung 7.16: Herstellungsaufwand über Energieinhalt für Li-Ion-Batterien.....	71
Abbildung 7.17: Gewicht und Leistung ausgewählter Elektromotoren für PKW .....	73
Abbildung 7.18: Verteilung der Werkstoffe nach Gewicht für verschiedene Asynchronmaschinen .....	73
Abbildung 7.19: Energieaufwand der Elektromotorenproduktion, Cradle to Gate.....	74
Abbildung 7.20: Fertigungsmöglichkeiten für Stahlrohre .....	75
Abbildung 7.21: Spezifischer Produktionsaufwand für Gastanks aus Stahl.....	76
Abbildung 7.22: Verbrauch der Tankherstellung, Stromerzeugung berücksichtigt ...	78
Abbildung 7.23: Schadstoffkonzentration in Abhängigkeit des Luftverhältnisses .....	79
Abbildung 7.24: Schema eines Drei-Wege Katalysators (Quelle: www.kfztech.de)..	80
Abbildung 7.25: Schema eines Partikelfilters.....	82
Abbildung 8.1: Geschwindigkeitsprofil NEDC-zyklus.....	84
Abbildung 8.2: Geschwindigkeitsverläufe der CADC-Zyklen .....	85
Abbildung 8.3: Verbrauch des Elektrofahrzeugs mit Range-Extender in Abhängigkeit von der elektrisch gefahrenen Strecke .....	92
Abbildung 9.1: Energiebedarf über die beiden Abschnitte Produktion und Betrieb, Benzin- und Dieselfahrzeug.....	94
Abbildung 9.2: CO <sub>2</sub> e-Emissionen der Antriebsstränge mit VKM.....	95
Abbildung 9.3: Energieverbrauch des Elektrofahrzeugs.....	96
Abbildung 9.4: Emissionen des Elektrofahrzeugs bei unterschiedlichen Strommischen .....	97
Abbildung 9.5: Verbrauch des Vollhybridfahrzeugs über die Lebensdauer .....	98
Abbildung 9.6: Verbrauch des PHEV in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke .....	100
Abbildung 9.7: CO <sub>2</sub> e-Emissionen über der Lebensdauer des PHEV.....	101
Abbildung 9.8: Energieverbrauch für drei Betriebsszenarien des REEV .....	102
Abbildung 9.9: CO <sub>2</sub> e-Emissionen im Leben des REEV, abh. von Strommix und Häufigkeit des elektrischen Betriebs.....	103
Abbildung 9.10: Produktionsaufwand der Antriebssysteme.....	104
Abbildung 9.11: Energiebedarf verschiedener Antriebskonzepte während des Betriebes .....	105
Abbildung 9.12: Energieverbrauch während Produktion und Betrieb der Antriebsstrangkonzepete, ausgehend von primären Werkstoffen .....	106
Abbildung 9.13: Energieverbrauch während Produktion und Betrieb der Antriebsstrangkonzepete, ausgehend von sekundären Werkstoffen.....	107
Abbildung 9.14: Bei der Produktion der Antriebe anfallende Treibhausgase.....	108
Abbildung 9.15: Emissionen an Treibhausgasen, abhängig von der Laufleistung. Österreichischer Strommix verwendet.....	109
Abbildung 9.16: Treibhausgasemissionen während des Betriebs, deutscher Strommix verwendet.....	110
Abbildung 9.17: Treibhausgasemissionen während der Lebenszeit der Fahrzeuge (Produktion & Betrieb), ausgehend von 100% primären Werkstoffen.....	111
Abbildung 9.18: Treibhausgasemissionen während der Lebenszeit der Fahrzeuge (Produktion & Betrieb), ausgehend von 100% recycelten Werkstoffen .....	112
Abbildung 15.1 Annäherung an den Zielwert der Iteration.....	xxiii

## 13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Beispiele zu Wirkungskategorien .....	11
Tabelle 4.1: Treibhauspotentiale mehrerer Gase .....	21
Tabelle 4.2: Emissionen bei verschiedenen Verwendungen von Erdölraffinationsprodukten.....	22
Tabelle 4.3: Emissionen von Erdgasanwendungen.....	22
Tabelle 4.4: Strommix Österreich und Emissionsfaktoren .....	23
Tabelle 4.5: Strommix Österreich und Emissionsfaktoren.....	24
Tabelle 4.6: Ausstoß an CO <sub>2</sub> -Äquivalenten zur Herstellung elektrischer Energie bestimmter Länder.....	24
Tabelle 5.1: Abbaustätten von Eisenerz .....	25
Tabelle 5.3: Energieaufwand der Stahlherstellung .....	26
Tabelle 5.4: Emissionsanteile der Energieträger bei Primärstahlerzeugung .....	27
Tabelle 5.5: THG-Emissionen der Stahlerzeugung, getrennt nach Quelle .....	28
Tabelle 5.6: Energieaufwand der Sekundärstahlherstellung (Elektroofen) .....	29
Tabelle 5.7: Umrechnung der CO <sub>2</sub> Verhältnisse auf den Stahloutput.....	29
Tabelle 5.8: CO <sub>2</sub> e-Emissionen von sekundärem Stahl.....	29
Tabelle 5.9: Abbaustätten und –mengen von Bauxit 2012 .....	30
Tabelle 5.11: Energiebedarf der Anodenherstellung .....	33
Tabelle 5.12: Energieverbrauch der einzelnen Herstellungsschritte.....	33
Tabelle 5.13: spezifischer Brennstoffverbrauch der Aluminiumherstellung .....	33
Tabelle 5.14: Gesamtenergieaufwand der Aluminiumherstellung.....	34
Tabelle 5.15: CO <sub>2</sub> -Emissionen der fossilen Brennstoffe bei primärer Aluminiumerzeugung.....	34
Tabelle 5.16: Treibhausgase der primären Aluminiumproduktion, ohne Stromerzeugung.....	34
Tabelle 5.17: Energiebilanz Umschmelzgießerei AMAG 1012 .....	35
Tabelle 5.18: Spezifischer Energieverbrauch Umschmelzgießerei AMAG 2012 .....	35
Tabelle 5.19: Produktion der Austria Metall GmbH 2012.....	36
Tabelle 5.20: Abgeleiteter Energieverbrauch Sekundäraluminiumproduktion .....	36
Tabelle 5.21: Bedarf an Energieträgern pro Tonne Aluminium.....	36
Tabelle 5.22: Treibhausgasemissionen bei sekundärer Aluminiumerzeugung.....	36
Tabelle 5.23: Energiebedarf zur Cu-Konzentraterzeugung .....	37
Tabelle 5.24: Energiebedarf zur Herstellung primärer Kupferkathoden.....	38
Tabelle 5.25: Emissionen nach Energiequelle bei Primärerzeugung einer Tonne Kupferkathoden .....	38
Tabelle 5.26: Anteil der Energieträger an der sekundären Kupferproduktion .....	39
Tabelle 5.27: Umrechnung auf Outputgrößen .....	39
Tabelle 5.28: Direkte Emissionen der Kupferproduktion.....	39
Tabelle 5.29: Emissionen nach Energiequelle für eine Tonne sekundäres Kupfer... ..	40
Tabelle 5.30: Mengen der Zwischenprodukte der Platingewinnung .....	42
Tabelle 5.31: Energetischer Aufwand der Schritte der Platingewinnung .....	42
Tabelle 5.32: Treibhausgasemissionen der Platingewinnung.....	43
Tabelle 5.33: Energieaufwand und Emissionen der Rhodiumherstellung.....	43
Tabelle 5.34: Energieaufwand zur Gewinnung von 1kg Sole mit 6% Li-Gehalt.....	45

Tabelle 5.35: Energieaufwand zur Herstellung von 1 kg $\text{Li}_2\text{CO}_3$ aus konzentrierter Sole .....	45
Tabelle 5.36: Energieaufwand zur Herstellung von 1 kg $\text{Li}_2\text{CO}_3$ aus Salzseen unter günstigen Bedingungen .....	45
Tabelle 5.37: Energieaufwand für den Abbau und die Konzentration von Spodumen .....	46
Tabelle 5.38: Treibhauspotential und KEA von $\text{Li}_2\text{CO}_3$ .....	46
Tabelle 5.39: Energieaufwand zur Gewinnung ausgewählter Edelmetalle .....	47
Tabelle 5.40: Energieaufwand und Emissionen zur Produktion verschiedener Werkstoffe, primär .....	47
Tabelle 5.41: Energieaufwand und Emissionen zur Produktion verschiedener Werkstoffe, sekundär.....	47
Tabelle 5.42: Vergleich der THG-Emissionen für zwei Länder mit extremen Emissionsfaktoren für die Stromerzeugung .....	48
Tabelle 6.1: Energieaufwand verschiedener Gießprozesse .....	49
Tabelle 6.2: Kohlendioxidemissionen verschiedener Gießprozesse.....	49
Tabelle 6.3: Energiebedarf zum Schmieden von Stahl .....	50
Tabelle 7.1: Übersicht der Fahrzeugsegmente.....	51
Tabelle 7.2: Gewicht und Leistung mehrerer Verbrennungsmotoren .....	52
Tabelle 7.3: Durchschnittliche Motormasse und -leistung nach Fahrzeugklasse.....	54
Tabelle 7.4: Gewichtsanteile der Komponenten eines Basismotors .....	54
Tabelle 7.5: Spezifische Kennzahlen, Werk Salzgitter .....	55
Tabelle 7.6: Kennzahlen des Motorenwerks Salzgitter .....	55
Tabelle 7.7: Energieinhalt der verwendeten Treibstoffe, BMW Steyr .....	55
Tabelle 7.8: Energiebedarf BMW Steyr 2011 .....	55
Tabelle 7.9: Output BMW Steyr 2011 .....	55
Tabelle 7.10: Energieträger im BMW-Werk Steyr.....	55
Tabelle 7.11: Motorkomponenten, Materialien und Fertigungsschritte .....	56
Tabelle 7.12: Energieaufwand der Motorenherstellung, Cradle-to-Gate.....	57
Tabelle 7.13: Energieverbrauch der Motorenproduktion nach Energieträger .....	58
Tabelle 7.14: Mittlere Getriebegehewichte nach Fahrzeugklasse .....	60
Tabelle 7.15: Gewichtsverteilung Getriebe VW Golf 4.....	60
Tabelle 7.16: Werkstoffe automatischer Getriebe.....	61
Tabelle 7.17: Input/Output-Bilanz des Getriebewerks Irapuato, Mexiko .....	61
Tabelle 7.18: Spezifische Werte des Getriebewerkes Irapuato, Mexiko .....	61
Tabelle 7.19: Herstellungsenergie Schaltgetriebe, Cradle to Gate .....	62
Tabelle 7.20: Spezifische und totale Herstellungsenergie von Automatikgetrieben, Cradle to Gate .....	64
Tabelle 7.21: Getriebeherstellung, Energiebedarf gesamt und spezifisch.....	65
Tabelle 7.22: Materialien in Li-Ion-Batterien .....	67
Tabelle 7.23: Energieaufwand zur Fertigung von Batterien .....	68
Tabelle 7.24: Emissionen der Batterieherstellung, Cradle to Gate .....	69
Tabelle 7.25: Umweltauswirkungen der Li-Ion-Batterieherstellung, günstige Verhältnisse.....	69
Tabelle 7.26: Umweltauswirkungen der Li-Ion-Batterieherstellung, ungünstige Verhältnisse.....	69
Tabelle 7.27: Gewichte der Traktionsbatterien ausgewählter Fahrzeuge .....	70

Tabelle 7.28: Emissionen der Batterien verschiedener Hybrid- & Elektrofahrzeuge	70
Tabelle 7.29: Herstellungsenergie von Bleiakkumulatoren	71
Tabelle 7.30: Materialverteilung einer 1,5 kW Asynchronmaschine	72
Tabelle 7.31: Materialanteile eines 10kW drei Phasen Elektromotors	72
Tabelle 7.32: Variationsbereich zur Gewichtsabschätzung	76
Tabelle 7.34: Zusammensetzung eines Typ-III Tanks	77
Tabelle 7.33: Strommix Italiens und der EU	77
Tabelle 7.35: Ermittlung des KEA des Aluminiumanteils	77
Tabelle 7.36: Ermittlung des Wirkungsgrades der Stromerzeugung	78
Tabelle 7.37: GWP des Kompositttanks	78
Tabelle 7.38: Materialzusammensetzung eines Drei-Wege Katalysators	80
Tabelle 7.39: Aufwand der Edelmetallherstellung für einen Katalysator	81
Tabelle 7.40: Aufwand der Materialien und der Fertigung eines Katalysators	81
Tabelle 7.41: Energieaufwand zur Herstellung eines DPF	82
Tabelle 8.1: Ausgangsbasis für die Simulation	86
Tabelle 8.2: Verbrauch und Wirkungsgrade von Benzin- und Dieselfahrzeug	87
Tabelle 8.3: Gewichtsänderung für das simulierte Elektrofahrzeug	88
Tabelle 8.4: Verbrauchswerte und Wirkungsgrad des Nissan Leaf	88
Tabelle 8.5: Verbrauchswerte und Wirkungsgrad des Elektrofahrzeuges	89
Tabelle 8.6: Gewichtsänderung für das simulierte Hybridfahrzeug	89
Tabelle 8.7: Idealer Energiebedarf des Simulations-Hybridfahrzeugs in den Testzyklen	89
Tabelle 8.8: Verbrauchswerte und Wirkungsgrad des Hybridfahrzeugs	89
Tabelle 8.9: Gewichtsänderung für das simulierte PHEV	90
Tabelle 8.10: Verbrauchswerte und Wirkungsgrad des PHEV	90
Tabelle 8.11: Gewichtsänderung für das simulierte Hybridfahrzeug mit Range Extender	90
Tabelle 8.12: Berechnung des kombinierten Verbrauchs der NEDC-Zyklen	91
Tabelle 8.13: Berechnung des kombinierten Verbrauchs der Artemis-Zyklen	91
Tabelle 8.14: Realer Verbrauch des REEV in Abhängigkeit von der elektrisch gefahrenen Strecke	92
Tabelle 9.1: Energieaufwand zur Herstellung der Komponenten	93
Tabelle 9.2: Treibhausgasemissionen der Komponentenherstellung	93
Tabelle 9.3 CO <sub>2</sub> -Emissionen von Fahrzeugtreibstoffen	93
Tabelle 9.4 CO <sub>2</sub> -Emissionen bei Betrieb der VKM-Fahrzeuge	93
Tabelle 9.5: CO <sub>2e</sub> -Emissionen der Antriebsstränge mit VKM	95
Tabelle 9.6: Herstellungsaufwand der Komponenten des Elektrofahrzeugs	96
Tabelle 9.7: Emissionen der Komponentenherstellung, Elektrofahrzeug	96
Tabelle 9.8: Verwendete Gewichte der Komponenten	98
Tabelle 9.9: Benötigte Energie zur Produktion eines 60 kg Automatikgetriebes	98
Tabelle 9.10: Treibhausgasemissionen im Betrieb des Hybridfahrzeugs	99
Tabelle 9.11: CO <sub>2e</sub> - Emissionen bei der Herstellung des Vollhybrid-Antriebsstrangs	99
Tabelle 9.12: Treibhausgasemissionen zu ausgewählten Laufleistungen	99
Tabelle 9.13: Verwendete Gewichte der Komponenten	100
Tabelle 9.15: CO <sub>2e</sub> - Emissionen bei der Herstellung des Plug-In-Antriebsstrangs	101

Tabelle 9.16: Verwendete Gewichte der Komponenten im Antriebsstrang des REEV .....	102
Tabelle 9.17: CO <sub>2</sub> e- Emissionen bei der Herstellung des REEV-Antriebsstrangs .	103
Tabelle 9.18: Werte des Energieverbrauchs, Produktion und am Lebensende .....	108
Tabelle 9.19: Emissionen zu Beginn und am Ende der Betriebsphase, ausgehend von primären Werkstoffen.....	113
Tabelle 9.20: Emissionen zu Beginn und am Ende der Betriebsphase, ausgehend von primären Werkstoffen.....	113
Tabelle 15.1: Materialverteilung und Komponentengewicht für einen 100kg Motor.	xvii
Tabelle 15.2: Gewichtsschwund durch Gießprozesse .....	xvii
Tabelle 15.3: Energiebedarf der Gießprozesse .....	xvii
Tabelle 15.4: Energiebedarf Schmieden .....	xvii
Tabelle 15.5: Verwendete Materialmengen in einem 100kg Motor .....	xviii
Tabelle 15.6: Energieaufwand Materialbereitstellung .....	xviii
Tabelle 15.7: Aufgeschlüsselter Energiebedarf .....	xviii
Tabelle 15.8: Produktionsaufwand für verschiedene Motorengewichte .....	xix
Tabelle 15.9: Material- und Gewichtsverteilung Automatikgetriebe .....	xx
Tabelle 15.10: Materialschwund durch Gießprozesse .....	xx
Tabelle 15.11: Energiebedarf der Gießprozesse .....	xx
Tabelle 15.12: Energiebedarf Schmiedeteile .....	xx
Tabelle 15.13: Energiebedarf mechanische Fertigung .....	xx
Tabelle 15.14: Energiebedarf Materialbereitstellung .....	xxi
Tabelle 15.15: Aufgeschlüsselter Energiebedarf .....	xxi
Tabelle 15.16: Produktionsaufwand für unterschiedliche Getriebegegewichte .....	xxi
Tabelle 15.17: Zusammensetzung und thermodynamische Werte von Erdgas Typ L .....	xxii
Tabelle 15.18: Eingangsgrößen für die ideale Gasgleichung .....	xxii
Tabelle 15.19: Volumen und Maße des Stahltanks .....	xxii
Tabelle 15.20 Iterationsschritte zum Ermitteln des Durchmessers .....	xxiii
Tabelle 15.21: Querschnittsflächen des Stahlzylinders .....	xxiii
Tabelle 15.22: Festkörpervolumina und Massen des Stahltanks.....	xxiii
Tabelle 15.23: Spezifischer Fertigungsaufwand für Stahltanks mit unterschiedlichem Fassungsvermögen, abhängig von der Zylinderhöhe .....	xxiv

## 14 Formelverzeichnis

Formel 1: Verbrennung von Kohlenwasserstoffen .....	21
Formel 2: Reaktionsgleichungen beim Entladen einer $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ Batterie .....	67
Formel 3: Luftwiderstand .....	85
Formel 4: Rollwiderstandsmomente .....	85
Formel 5: Steigungswiderstand .....	85
Formel 6: Beschleunigungswiderstand .....	85
Formel 7: Energie zum Überwinden der Fahrwiderstände .....	86
Formel 9 Volumen des Gastanks .....	xxii

## 15 Anhang

### 15.1 Berechnung des Produktionsaufwands des Motors

Herstellen der Gewichtsanteile der Komponenten und zuweisen der Fertigungsschritte, hier am Beispiel eines Motors mit 100 kg Masse, anhand von Tabelle 7.4.

Komponente	Kurbelgehäuse	Kurbelwelle	Zylinderkopf	Schwungrad	Nockenwelle
Gew.-Anteil [%]	52,09%	14,49%	14,03%	11,12%	3,83%
Gewicht [kg]	52,09	14,49	14,03	11,12	3,83
Material	Aluminium	Stahl	Aluminium	Stahl	Stahl
Bearbeitung	Guss	Schmieden	Guss	Guss	Schmieden
Komponente	Pleuel	Zahnkranz	Stößel	Einlassventile	Gesamt
Gew.-Anteil [%]	2,61%	0,88%	0,53%	0,42%	100,00%
Gewicht [kg]	2,61	0,88	0,53	0,42	100,00
Material	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl
Bearbeitung	Schmieden	Guss	-	-	-

Tabelle 15.1: Materialverteilung und Komponentengewicht für einen 100kg Motor

Gießen und schmieden mit Tabelle 6.1 und Tabelle 6.3:

	Aluguss	Stahlguss
Gewicht vor Guss	76,04 kg	12,48 kg
Gewicht nach Guss	66,12 kg	12,00 kg
Energiebedarf	3.234,33 MJ	79,71 MJ

Tabelle 15.2: Gewichtsschwund durch Gießprozesse

Bearbeitungs-schritt	Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg]				
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere
Aluguss	15,4	0,0	33,5	0,0	0,0
Stahlguss	4,3	0,0	0,0		2,3
Gesamt	1.069,8 MJ	0,5 MJ	2.216,2 MJ	0,0 MJ	27,5 MJ

Tabelle 15.3: Energiebedarf der Gießprozesse

Bearbeitungs-schritt	Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg]				
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere
Schmieden	9,6	0,0	0,0		
Gesamt	200,9 MJ	0,0 MJ	0,0	0,0	0,0

Tabelle 15.4: Energiebedarf Schmieden

Berechnen der Materialproduktion mithilfe Tabelle 5.40:

Material	Massen- anteil	Gewicht [kg]
Eisen/Stahl	30%	34,36
Leichtmetalle	66%	76,04
Buntmetalle	3%	4,00
Gesamt	100%	114,40

Tabelle 15.5: Verwendete Materialmengen in einem 100kg Motor

Material	Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg]				
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere
Eisen/Stahl	13,6	10,0	6,6	3,7	6,1
Leichtmetalle	56,0	7,1	11,1		4,3
Buntmetalle	18,1	9,0			
Gesamt	4.796,3	919,5	1.068,4	127,1	536,6

Tabelle 15.6: Energieaufwand Materialbereitstellung

Zusammenfassen der Einzelschritte

Arbeitsschritt	Spezifischer Energieaufwand [%]					Energieaufwand [MJ]
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere	
Materialbereitstellung	4.796,3	919,5	1.068,4	127,1	536,6	7.447,91
Gussteilfertigung	1.069,8	0,5	2.216,2	0,0	27,5	3.314,04
Schmieden	251,2	0,0	0,0	0,0	0,0	251,16
mechanische Fertigung	471,4	78,4	348,4	0,0	0,0	898,20
Gesamt	6.588,7 MJ	998,4 MJ	3.633,0 MJ	127,1 MJ	564,1 MJ	11.911,31 MJ

Mittelwert mechanische Fertigung

$$0,2495 \text{ MWh/Stk} = 898,20 \text{ MJ/Stk}$$

Tabelle 15.7: Aufgeschlüsselter Energiebedarf

Wiederholte Berechnung für unterschiedliche Motormassen:

		Motormasse [kg]						
		70	80	90	100	110	120	130
Produktionsaufwand [MJ]	elektrisch	4.753,51	5.365,24	5.976,97	6.588,70	7.200,43	7.812,16	8.423,89
	Öl	722,39	814,38	906,38	998,38	1.090,38	1.182,38	1.274,38
	Erdgas	2.647,64	2.976,10	3.304,56	3.633,02	3.961,48	4.289,94	4.618,40
	Koks	88,99	101,71	114,42	127,13	139,85	152,56	165,27
	Andere	394,85	451,26	507,66	564,07	620,48	676,88	733,29
	Gesamt	8.607,37	9.708,68	10.809,99	11.911,31	13.012,62	14.113,93	15.215,24
Spezifischer Produktionsaufwand [MJ/kg]	elektrisch	67,91	67,07	66,41	65,89	65,46	65,10	64,80
	Öl	10,32	10,18	10,07	9,98	9,91	9,85	9,80
	Erdgas	37,82	37,20	36,72	36,33	36,01	35,75	35,53
	Koks	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
	Andere	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64
	Gesamt	122,96	121,36	120,11	119,11	118,30	117,62	117,04

Tabelle 15.8: Produktionsaufwand für verschiedene Motorengewichte

## 15.2 Produktionsaufwand Getriebe

Hier am Beispiel eines Automatikgetriebes mit 50 kg Gewicht. Antrieb und Abtrieb bestehen aus mehreren Einzelteilen wie Wellen und Zahnrädern, die unterschiedliche Fertigungsschritte erfordern. Daher wird das Gewicht dieser Komponenten aufgeteilt und in diesem Beispiel zu 35% geschmiedet und zu 65% gegossen.

Komponente	Gehäuse	Antrieb mit Zahnrädern	Abtrieb mit Zahnrädern	Wandler	Schaltung	Andere	Gesamt
Gew.-Anteil [%]	29,26%	14,76%	18,39%	21,16%	2,77%	13,66%	100,00%
Gewicht [kg]	14,63	7,38	9,19	10,58	1,38	6,83	50,00
Material	Aluminium	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl	
Bearbeitung	Guss	Guss / Schmieden	Guss / Schmieden	Guss	mech.	mech.	

Tabelle 15.9: Material- und Gewichtsverteilung Automatikgetriebe

Guss und Schmieden:

	Aluguss	Stahlguss
Gewicht vor Guss	16,82 kg	22,21 kg
Gewicht nach Guss	14,63 kg	21,36 kg
Energiebedarf	715,62 MJ	141,86 MJ

Tabelle 15.10: Materialschwund durch Gießprozesse

Bearbeitungs-schritt	Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg]				
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere
Aluguss	15,4	0,0	33,5	0,0	0,0
Stahlguss	4,3	0,0	0,0		2,3
Gesamt	317,1 MJ	0,9 MJ	490,5 MJ	0,0 MJ	49,0 MJ

Tabelle 15.11: Energiebedarf der Gießprozesse

Bearbeitungs-schritt	Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg]				
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere
Schmieden	9,6	0,0	0,0		
Gesamt	55,7 MJ	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 15.12: Energiebedarf Schmiedeteile

Bearbeitungsschritt	Anteiliger Energieaufwand [%]				
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere
mechanische Fertigung	99,3%	0,1%	0,6%	0,0%	0,0%
Gesamt	65,4 MJ	0,1 MJ	0,4 MJ	0,0	0,0

Tabelle 15.13: Energiebedarf mechanische Fertigung

Materialbereitstellung:

Material	Spezifischer Energieaufwand [MJ/kg]				
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere
Eisen/Stahl	13,6	10,0	6,6	3,7	6,1
Leichtmetalle	56,0	7,1	11,1		4,3
Buntmetalle	18,1	9,0			
Gesamt	1.437,8 MJ	482,0 MJ	422,5 MJ	132,5 MJ	290,7 MJ

*Tabelle 15.14: Energiebedarf Materialbereitstellung*

Zusammenfassung der Einzelschritte:

Arbeitsschritt	Anteiliger Energieaufwand [%]					Energieaufwand [MJ]
	elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere	
Materialbereitstellung	1.437,8	482,0	422,5	132,5	290,7	2.765,44
Gussteilfertigung	317,1	0,9	490,5	0,0	49,0	857,49
Schmieden	69,6	0,0	0,0	0,0	0,0	69,61
mechanische Fertigung	65,4	0,1	0,4	0,0	0,0	65,85
Gesamt	1.889,9 MJ	483,0 MJ	913,4 MJ	132,5 MJ	339,7 MJ	3.758,39 MJ

*Tabelle 15.15: Aufgeschlüsselter Energiebedarf*

Wiederholte Berechnung für unterschiedliche Getriebemassen:

		Produktionsaufwand [MJ]					
		elektrisch	Öl	Erdgas	Koks	Andere	Gesamt
Getriebemasse [kg]	50	1.889,90	482,95	913,38	132,46	339,69	3.758,39
	55	2.072,35	531,24	1.004,68	145,71	373,66	4.127,64
	60	2.254,80	579,53	1.095,98	158,96	407,63	4.496,89
	65	2.437,25	627,82	1.187,28	172,20	441,60	4.866,15
	70	2.619,70	676,11	1.278,58	185,45	475,57	5.235,40
	75	2.802,15	724,40	1.369,88	198,70	509,53	5.604,66
	80	2.984,60	772,68	1.461,18	211,94	543,50	5.973,91
	85	3.167,05	820,97	1.552,48	225,19	577,47	6.343,16
	90	3.349,50	869,26	1.643,78	238,44	611,44	6.712,42

*Tabelle 15.16: Produktionsaufwand für unterschiedliche Getriebegewichte*

### 15.3 Berechnung des Stahltanks

#### Eigenschaften Erdgas, Typ L

	Methan	N	Ethan	Propan
$r_i$ [Vol-%]	85%	11%	2%	2%
$R_i$ [J/(Kg*K)]	518,24	296,76	276,5	189
$M_i$ [g/mol]	16,04	28,02	30,07	44,09
$\mu_i$	0,749	0,169	0,033	0,048
$M_M =$	18,20	[g/mol]		
$R_{\text{Gemisch}} =$	456,79	[J/(kg*K)]		

Tabelle 15.17: Zusammensetzung und thermodynamische Werte von Erdgas Typ L

$$M_m = \sum_i r_i M_i$$

$$\mu_i = r_i \frac{M_i}{M_m}$$

$$R_m = \sum_i \mu_i R_i$$

#### Benötigtes Volumen des Tanks über ideales Gas

$$p * V = m * R_m * T$$

Formel 8: Zustandsgleichung idealer Gasgemische

Tankinhalt	Druck	$R_{\text{Gemisch}}$	Temperatur
[kg]	[bar]	[J/kgK]	[K]
25	200	456,79	293,15

Tabelle 15.18: Eingangsgrößen für die ideale Gasgleichung

Volumen	Tankhöhe	$\varnothing$ innen	Dicke	$\varnothing$ außen
[m <sup>3</sup> ]	[m]	[m]	[mm]	m
0,167	0,90	0,45	2,5	0,46

Tabelle 15.19: Volumen und Maße des Stahltanks

Die Berechnung der Wanddicke  $b$  ist in EN 13322-2 festgelegt und ergibt für 34CrNiMo6 (SAE4340) etwa 1 mm für einen Prüfdruck von 300 bar. Da die Herstellerangaben bei etwa 4 mm liegen, wird mit dem Mittelwert von 2,5 mm gerechnet. Damit folgt die Berechnung des Volumens und Gewichts des Tanks. Das Volumen wird angenähert durch einen Zylinder mit aufgesetzter Halbkugel.

$$V_{ges} = h d_i^2 \frac{\pi}{4} + d_i^3 \frac{\pi}{12}$$

Formel 9 Volumen des Gastanks

Mit  $V, h = \text{const.}$  wird nach  $d$  numerisch gelöst

$$\frac{12V}{\pi} = 3h d^2 + d^3$$

$$\frac{12V}{\pi} - d^3 = 3hd^2$$

$$d_{n+1} = \sqrt{\left(\frac{12V}{\pi} - d_n^3\right) * \frac{1}{3h}}$$

$$d_0 = d_{i\text{Zyl}}$$

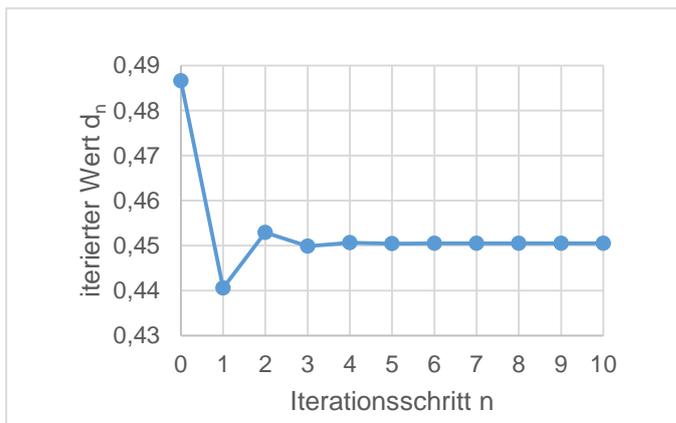


Abbildung 15.1 Annäherung an den Zielwert der Iteration

n	$d_n$
0	0,48662239
1	0,44059337
2	0,45290607
3	0,44988138
4	0,4506418
5	0,4504517
6	0,45049929
7	0,45048738
8	0,45049036
9	0,45048962
10	0,45048981

Tabelle 15.20 Iterationsschritte zum Ermitteln des Durchmessers

Damit sind die Maße bekannt und es können das Volumen und das Gewicht der Stahlhülle berechnet werden.

Ringfläche außen [m <sup>2</sup> ]	Ringfläche innen [m <sup>2</sup> ]	$\rho_{st}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0,1629	0,1594	7850

Tabelle 15.21: Querschnittsflächen des Stahlzylinders

	Volumen [dm <sup>3</sup> ]	Masse [kg]
Deckel	0,81	6,33
Boden	0,41	3,20
Mantel	3,20	25,14
Gesamt	4,42	34,66

Tabelle 15.22: Festkörpervolumina und Massen des Stahlanks

Mit den Werten für die Fertigungsprozesse werden anschließend die Zylinderhöhe und das Fassungsvermögen variiert und damit die jeweilige Masse und Produktionsaufwand für diese Parameter ermittelt. Durch Division dieser Werte erhält man die spezifische Herstellungsenergie. Sie ist in Tabelle 15.23 ablesbar.

		Fassungsvermögen [kg]																	
		25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10		
Höhe des Tankzylinders [m]	0,6	47,51	47,48	47,45	47,41	47,38	47,34	47,30	47,26	47,21	47,17	47,12	47,06	47,01	46,95	46,88	46,81		
	0,65	47,32	47,29	47,26	47,22	47,19	47,15	47,11	47,07	47,03	46,98	46,93	46,88	46,83	46,77	46,71	46,64		
	0,7	47,15	47,12	47,09	47,05	47,02	46,98	46,94	46,90	46,86	46,82	46,77	46,72	46,67	46,61	46,56	46,49		
	0,75	46,99	46,96	46,93	46,90	46,86	46,83	46,79	46,75	46,71	46,67	46,62	46,58	46,53	46,47	46,42	46,36		
	0,8	46,85	46,82	46,79	46,76	46,72	46,69	46,65	46,62	46,58	46,54	46,49	46,45	46,40	46,35	46,29	46,23		
	0,85	46,72	46,69	46,66	46,63	46,60	46,56	46,53	46,49	46,45	46,41	46,37	46,33	46,28	46,23	46,18	46,12		
	0,9	46,60	46,57	46,54	46,51	46,48	46,45	46,41	46,38	46,34	46,30	46,26	46,22	46,18	46,13	46,08	46,03		
	0,95	46,49	46,46	46,43	46,40	46,37	46,34	46,31	46,28	46,24	46,20	46,17	46,12	46,08	46,04	45,99	45,94		
	1	46,39	46,36	46,33	46,30	46,28	46,24	46,21	46,18	46,15	46,11	46,07	46,04	45,99	45,95	45,91	45,86		
	1,05	46,29	46,27	46,24	46,21	46,19	46,16	46,13	46,09	46,06	46,03	45,99	45,95	45,92	45,87	45,83	45,78		
	1,1	46,21	46,18	46,16	46,13	46,10	46,07	46,05	46,02	45,98	45,95	45,92	45,88	45,84	45,80	45,76	45,72		
	1,15	46,13	46,10	46,08	46,05	46,03	46,00	45,97	45,94	45,91	45,88	45,85	45,81	45,78	45,74	45,70	45,65		
1,2	46,05	46,03	46,01	45,98	45,96	45,93	45,90	45,87	45,85	45,81	45,78	45,75	45,71	45,68	45,64	45,60			
1,25	45,98	45,96	45,94	45,91	45,89	45,87	45,84	45,81	45,78	45,75	45,72	45,69	45,66	45,62	45,58	45,55			

Tabelle 15.23: Spezifischer Fertigungsaufwand für Stahl tanks mit unterschiedlichem Fassungsvermögen, abhängig von der Zylinderhöhe