TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Ökobilanz einer mobilen brennstoffzellenelektrischen Ladestation für BEV

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Hofmann

und

Dr. techn. Johannes Konrad MSc

E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Robin Julian Sanz BSc

01346739

Gröhrmühlgasse 4-6/30, 2700 Wiener Neustadt

05/2021 B 21009

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

IFA Institut für Fahrzeugantriebe & Automobiltechnik

Aufgabenstellung der Diplomarbeit

Herrn Robin Julian Sanz BSc, Matrikelnummer: 01346739 wird folgendes Thema gestellt:

Ökobilanz einer mobilen brennstoffzellenelektrischen Ladestation für BEV

Aufgabenstellung:

- Einarbeiten in das Tätigkeitsfeld
- Prüfung der vorhandenen Datengrundlage und zusätzliche Datenerfassung
- Erstellung einer vergleichenden Ökobilanz in Anlehnung an ISO 14040
- Abfassen einer Diplomarbeit sowie Dokumentation und Präsentation der Tätigkeiten

Dauer: 08/2020 bis 05/2021

Robin Julian Sanz BSc (Verfasser)

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Hofmann (Hauptbetreuer)

Dr. techn. Johannes Konrad MSc (Mitbetreuer)

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Geringer (Institutsvorstand)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

Institut für Fahrzeugantriebe & Automobiltechnik

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Ökobilanz einer mobilen brennstoffzellenelektrischen Ladestation für BEV

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin / einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum 13.06.2021 Unterschrift

Sperrvermerk:

Ich weise darauf hin, dass die Diplomarbeit vertrauliche Informationen und unternehmensinterne Daten beinhaltet. Daher ist eine Veröffentlichung oder Weitergabe von Inhalten an Dritte ohne die vorherige Einverständniserklärung des Institutes für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik nicht gestattet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die vorliegende Arbeit entstand im Umfeld des Projekts

Mobile Hydrogen Powersupply (MHP)

Das Projekt MHP wird mit Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Zero Emission Mobility“ durchgeführt.

Projektleiter:

Axel-Oscar Bernt
Product Manager Hydrogen Systems

MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG
Liebenauer Hauptstrasse 317, 8041 Graz, Austria

Partner:

MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG

Technische Universität Wien
Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touring Club (ÖAMTC)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die Auswirkungen auf die Umwelt, welche durch den Einsatz einer mobilen Wasserstoff-Energieerzeugungseinheit (MHP) zur Pannenhilfe für BEV, welche aufgrund einer entladenen Hochvoltbatterie liegengeblieben sind, werden anhand einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 aufgezeigt.

Die MHP erzeugt elektrische Energie mittels einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) und kann von einem PKW zur Einsatzstelle transportiert werden. Das BEV kann entweder über die PEMFC oder über die verbaute Hochvoltbatterie geladen werden. Es werden Ladeleistungen bis zu 22 kW erreicht. Die Masse der MHP beträgt 1008 kg.

Die Ökobilanz der MHP gliedert sich in drei Hauptphasen: Herstellung, Nutzung und Lebensende. Für die Bilanzierung der Herstellung werden die Transportdistanzen, sowie die Verpackung der Rohstoffe, der Komponenten und der fertigen MHP abgeschätzt. Die CO_2-Äquivalente, welche bei der Herstellung der Komponenten entstehen, werden anhand vorliegender Ökobilanzen erfasst. Die CO_2-Äquivalente der Rohstoffe werden aus der Datenbank GEMIS 4.9 entnommen. Für die Bilanzierung der Nutzung wird angenommen, dass der Wasserstoff zum Betrieb der MHP dem aktuellem europäischen Wasserstoffmix entspricht. Für den Transport der MHP zur Einsatzstelle wird ein Dieselfahrzeug angenommen. Der Bedarf an Wasserstoff wird anhand des Gesamtwirkungsgrades der MHP errechnet. Die zu erwartete Anzahl an auf Pannenhilfe angewiesene BEV, welche aufgrund einer entladenen Hochvoltbatterie liegengeblieben sind entstammt einer Experten-Zukunftsprognose. Für die Prozesse am Lebensende wird ein „quasi-closed-loop System“ für das Recycling verwendet.

Alle Ergebnisse werden dabei auf die funktionelle Einheit, von einer Kilowattstunde elektrische Energie (kWh_e), normiert. Der Einfluss der einzelnen Prozesse an den gesamten CO_2-Äquivalenten des Lebensweges wird anhand einer Sensitivitätsanalyse überprüft.

Aus den Ergebnissen der Ökobilanz geht hervor, dass die gesamten CO_2-Äquivalente der MHP 3,14 kg/kWh_e betragen, und zu 85,54% während der Nutzung entstehen. Wird statt dem aktuellen europäischen Wasserstoffmix, jedoch Wasserstoff zum Betrieb verwendet, welcher durch Elektrolyse aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt wird, und anstelle eines Dieselfahrzeuges ein HFCV zum Transport der MHP eingesetzt, reduzieren sich die CO_2-Äquivalente auf 0,94 $kgCO_2e/kWh_e$. Bei der Gegenüberstellung dieser CO_2-Äquivalente, führt der Einsatz der MHP im Gegensatz zu einem Dieselgenerator mit einem Diesel-PKW zu einer Reduktion der CO_2-Äquivalente für den gesamten Lebensweg von 65,74%.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abstract

The effects on the environment caused by the use of a mobile hydrogen power generation unit (MHP) for breakdown assistance for BEVs that have broken down due to a discharged high-voltage battery are shown using a life cycle assessment in accordance with DIN EN ISO 14040.

The MHP generates electrical energy by means of a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) and can be transported to the scene by a car. The BEV can be charged either via the PEMFC or via the built-in high-voltage battery. Charging capacities of up to 22 kW can be achieved. The mass of the MHP is 1008 kg.

The MHP's life cycle assessment is divided into three main phases: production, use and end of life. For the accounting of the production, the transport distances as well as the packaging of the raw materials of the components and the finished MHP are estimated. The CO_2 equivalents that arise during the manufacture of the components are recorded on the basis of available life cycle assessments. The CO_2 equivalents of the raw materials are taken from the GEMIS 4.9 database. For the usage, it is assumed that the hydrogen used to operate the MHP corresponds to the current European hydrogen mix. A diesel vehicle is assumed for the transport of the MHP to the breakdown site. The demand for hydrogen is calculated based on the overall efficiency of the MHP. The expected number of BEVs requiring breakdown assistance that have broken down due to a discharged high-voltage battery comes from an expert forecast. For the processes at the end of life, a "quasi-closed-loop system" is used for recycling.

All results are standardized to the functional unit of one kilowatt hour of electrical energy (kWh_e). The influence of the individual processes on the total CO_2 equivalents of the life cycle is checked using a sensitivity analysis.

The results of the life cycle assessment show that the total CO_2 equivalents of the MHP are 3.14 kg/kWh_e, in which 85.54% are generated during usage. If instead of the current European hydrogen mix, hydrogen is used for operation, which is generated by electrolysis from renewable energy sources, and an HFCV is used instead of a diesel vehicle to transport the MHP, the CO_2 equivalents are reduced to 0.94 $kgCO_2e/kWh_e$. When comparing these CO_2 equivalents, the use of the MHP, in contrast to a diesel generator with a diesel car, leads to a reduction in CO_2 equivalents of 65,74% for the entire life cycle.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung II
Abstract III
Inhaltsverzeichnis IV
Nomenklatur VI
1 Einleitung 1
2 Grundlagen zur Ökobilanz 2
2.1 Historische Entwicklung 2
2.2 Zweck einer Ökobilanz 3
2.3 Aufbau einer Ökobilanz 3
2.3.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens 5
2.3.2 Sachbilanz 8
2.3.3 Wirkungsabschätzung 9
2.3.4 Auswertung 10
3 Ökobilanz – MHP 12
3.1 Produkt – MHP 12
3.1.1 Projektziel 13
3.1.2 Komponenten der MHP 14
3.2 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens 15
3.2.1 Ziel 15
3.2.2 Funktion des Produktsystems 15
3.2.3 Funktionelle Einheit 17
3.2.4 Abschneidekriterium 17
3.2.5 Allokationsverfahren 17
3.2.6 Methode für die Wirkungsabschätzung 18
3.2.7 Anforderung an die Daten 18
3.2.8 Annahmen und Einschränkungen 18
3.3 Sachbilanz 20
3.3.1 Herstellung 21
3.3.2 Nutzung 29

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.3.3 Lebensende ... 36
3.4 Wirkungsabschätzung ... 39
3.5 Auswertung ... 39
3.5.1 Lebensweg ... 39
3.5.2 Herstellung ... 40
3.5.3 Einfluss der Rohstoffe ... 43
3.5.4 Nutzung ... 44
3.5.5 Lebensende ... 45
3.5.6 Herstellung und Lebensende ... 45
3.5.7 Gegenüberstellung MHP und Dieselgenerator ... 46
3.5.8 Sensitivitätsanalyse ... 48
4 Zusammenfassung ... 55
Literaturverzeichnis ... 57
Anhang A: Materialzusammensetzung der Komponenten ... 67
Anhang B: Ergebnisse der Sachbilanz ... 73

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Nomenklatur

Abkürzungen

AWM	Aktueller Wasserstoffmix (EU)
BEV	Battery Electric Vehicle
BOP	Balance Of Plant
BVG	Biomassevergasung
D	Dieselfahrzeug
EGR	Erdgasreformation
EOL	End Of Life
EÖS	Elektrolyse aus aktuellem Ökostrom (AT)
BEVÖS	BEV – Aktueller Ökostrom (AT)
ESM	Elektrolyse aus aktuellem Strommix (AT)
BEVSM	BEV – Aktueller Strommix (AT)
GEMIS 4.9	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme (Version 4.9)
HFCVÖS	Hydrogen Fuel-Cell Vehicle – Aktueller Ökostrom (AT)
IFA	Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik
KFZ	Kraftfahrzeug
KVG	Kohlevergasung
LCA	Life Cycle Assessment
MHP	Mobile Hydrogen Powersupply
PEMFC	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
SD	Shut-Down Phase
SU	Start-Up Phase

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Chemische Elemente

CF_4	Tetrafluormethan
CH_4	Methan
CO_2	Kohlenstoffdioxid
H_2	Wasserstoff
N_2O	Distickstoffmonoxid

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einleitung

Seit Beginn der 2010er Jahre kann hinsichtlich getroffener Einschränkungen für Verbrennungsmotoren, als auch einem erhöhten Umweltbewusstsein der Menschheit ein Umschwung in Richtung elektrischer Mobilität beobachtet werden. Grundlegend für diesen Umschwung war das definierte Ziel des Pariser Abkommens zur Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C. Dieses Ziel hat zur Reglementierung der CO_2-Flottenvorgaben und damit einhergehend, zu einem Anstieg an Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben geführt.

Dabei stellt diese Veränderung neben der Bereitstellung der benötigten Ladeinfrastruktur und der Stromversorgung, vor allem den Bereich der Pannenhilfe von BEV, welche aufgrund einer entladenen Hochvoltbatterie liegegeblieben sind, vor große Herausforderungen. Speziell für letztgenanntes konnte sich bisher noch keine einheitliche Lösung durchsetzen.

Eine Möglichkeit die Problemstellung dieser Art von Pannenhilfe, ökologisch und ökonomisch effizient umzusetzen, kann dabei durch den Einsatz einer speziell auf die Anforderungen von BEV abgestimmten, mobilen Wasserstoff-Energieversorgungseinheit (MHP) erreicht werden.

Ziel dieser Diplomarbeit ist eine skalierbare Ökobilanz, der MHP in Anlehnung an DIN EN ISO 14040. Dabei wird ein Anwendungsszenario definiert, welches das Laden von BEV beinhaltet, welche auf Pannenhilfe angewiesen sind. Zusätzlich werden die Ergebnisse diese Analyse, einer vergleichenden Ökobilanz eines Dieselgenerators gegenübergestellt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2 Grundlagen zur Ökobilanz

Eine Ökobilanz ist eine Analyse bei welcher die Umweltbelastungen von Produkten oder Prozessen während des gesamten Lebensweges, zusammengefasst und bewertet werden.

Damit ein besseres Verständnis der in Kapitel 3 durchgeführten Ökobilanz der MHP geschaffen wird, werden nachfolgend neben der historischen Entwicklung bis hin zur heutzutage gängigen Norm, der Zweck sowie der Aufbau und die Bestandteile einer Ökobilanz vorgestellt.

2.1 Historische Entwicklung

Die ersten Ökobilanzen, welche aufgrund der stark anwachsenden Abfallmengen und Engpässen bei der Energieversorgung bei Produktionsbetrieben entstanden sind, und den heutigen Studien ähneln wurden erstmals 1970 durchgeführt. Jedoch kann bei diesen Untersuchungen noch nicht von einer Betrachtung aller Phasen eines Lebensweges oder von einer normierten Methodik gesprochen werden. Vorwiegend wurden bei diesen Analysen, Ressourcenverbräuche und die damit entstehenden Emissionen untersucht [1]. Diese Art von Ökobilanzen, werden heutzutage als Sach-Ökobilanzen bezeichnet [2].

Durch die „Society of Enviromental Toxicology and Chemistry“ (SETAC), welche in den frühen 90er Jahren die Entwicklung von normierten Ökobilanzen vorangetrieben hat, wurde erstmals 1990 durch die Konzeptionierung des SETAC-Dreiecks eine Strukturierung entwickelt [1]. Das SETAC-Dreieck ist in Abbildung 2-1 ersichtlich.

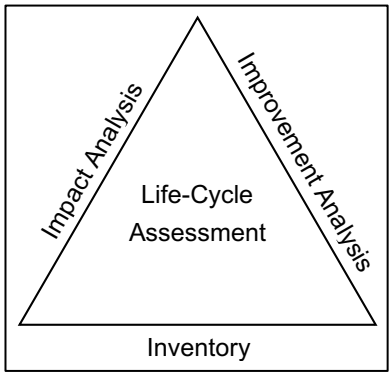

Abbildung 2-1: SETAC Dreieck vgl. [3]

Die drei Komponenten des Dreiecks werden nach deutscher Fassung als Sachbilanz (Inventory), Wirkungsbilanz (Impact Analysis) und Schwachstellen- und Optimierungsanalyse (Improvement Analysis) bezeichnet [4]. Diese Struktur wurde größtenteils bei der Entwicklung der Normung nach ISO beibehalten, wobei die Auswertung die Komponente „Improvement Analysis“ ersetzt hat [1].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die heutzutage verwendet Rahmennorm DIN EN ISO 14040 wurde zuletzt 2006 geändert, wobei die verbindlichen Anteile, in der Norm DIN EN ISO 14044 zusammengefasst sind [5].

2.2 Zweck einer Ökobilanz

Genormte Ökobilanzen, nach DIN EN ISO 14040 werden dann durchgeführt, wenn die Umweltaspekte und die potentiellen Umweltwirkungen, welche im Verlauf des gesamten Lebensweges eines Produkts auftreten, untersucht werden sollen [1]. Durch diese Untersuchung können mögliche umweltspezifische Risiken und Schwachstellen sowie Potentiale für eine ökologische Optimierung der Produkte aufgezeigt werden. Auch für Marketingzwecke oder politische Entscheidungsprozesse werden Ökobilanzen durchgeführt [6]. Dabei werden nicht nur die Umweltwirkungen während der Herstellung, der Nutzungsphase und der Entsorgung, sondern auch alle vor-, und nachgeschalteten Prozesse wie der Herstellung von Vorprodukten, Rohstoffen, Betriebs-, und Hilfsstoffen betrachtet [1]. Daher spricht man vom Lebensweg bei Ökobilanzen auch von „craddle to grave“, „von der Wiege bis ins Grab“ [7]. Abbildung 2-2 zeigt mögliche Phasen eines vereinfachten Produktlebensweges, welche bei der Ökobilanz untersucht werden können.

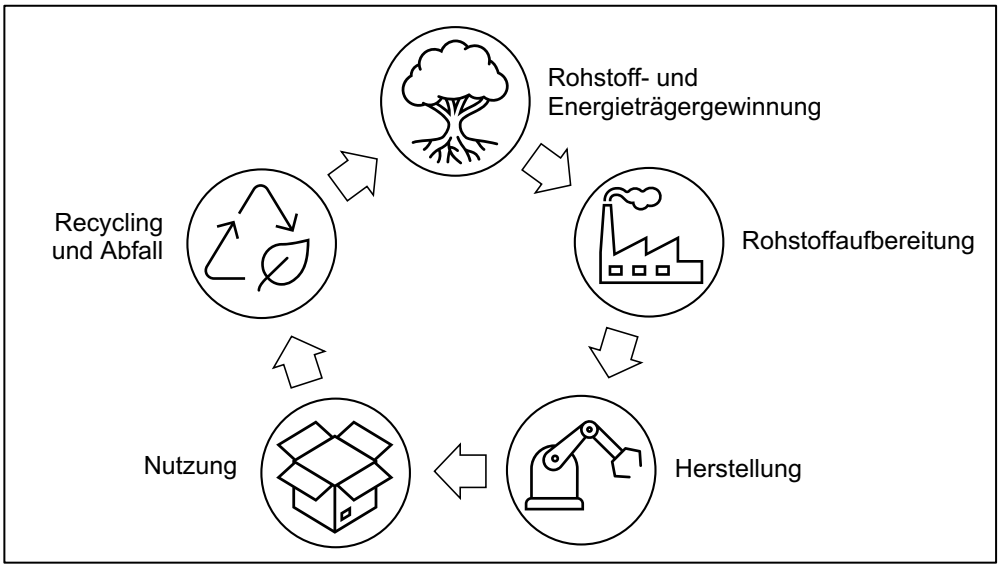

Abbildung 2-2: Vereinfachter Lebensweg eines Produkts vgl. [1]

2.3 Aufbau einer Ökobilanz

Allgemein wird zwischen Produktökobilanzen, vergleichenden Ökobilanzen und ganzheitlichen Bilanzierungen unterschieden. Die Produktökobilanz berücksichtigt all jene Umweltaspekte, welche während eines Produktlebens entstehen [1]. Umweltaspekte beinhalten nach der von der europäischen Union entwickelten EMAS-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Verordnung (Öko-Audit) alle jene Bestandteile einer Tätigkeit, eines Produkts oder einer Dienstleistung eines Unternehmens, welche eine Auswirkung auf die Umwelt haben, oder haben können [8].

Bei vergleichenden Ökobilanzen wird eine Gegenüberstellung verschiedener Produkte oder Prozesse vorgenommen.

Werden zusätzlich auch noch wirtschaftliche-, technische-, und oder soziale Aspekte berücksichtigt, spricht man von einer ganzheitlichen Bilanzierung [1].

Eine normgerechte Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 umfasst vier Phasen. Zu diesen zählen: die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Auswertung. Wird nur eine Sachbilanz-Studie durchgeführt entfällt die Wirkungsabschätzung [6].

Die Durchführung einer Ökobilanz ist ein iterativer Prozess, da die Definitionen und Ergebnisse einer Phase, auf die darauf folgende Einfluss haben [1]. Abbildung 2-3 zeigt die vier umfassenden Phasen der Ökobilanz.

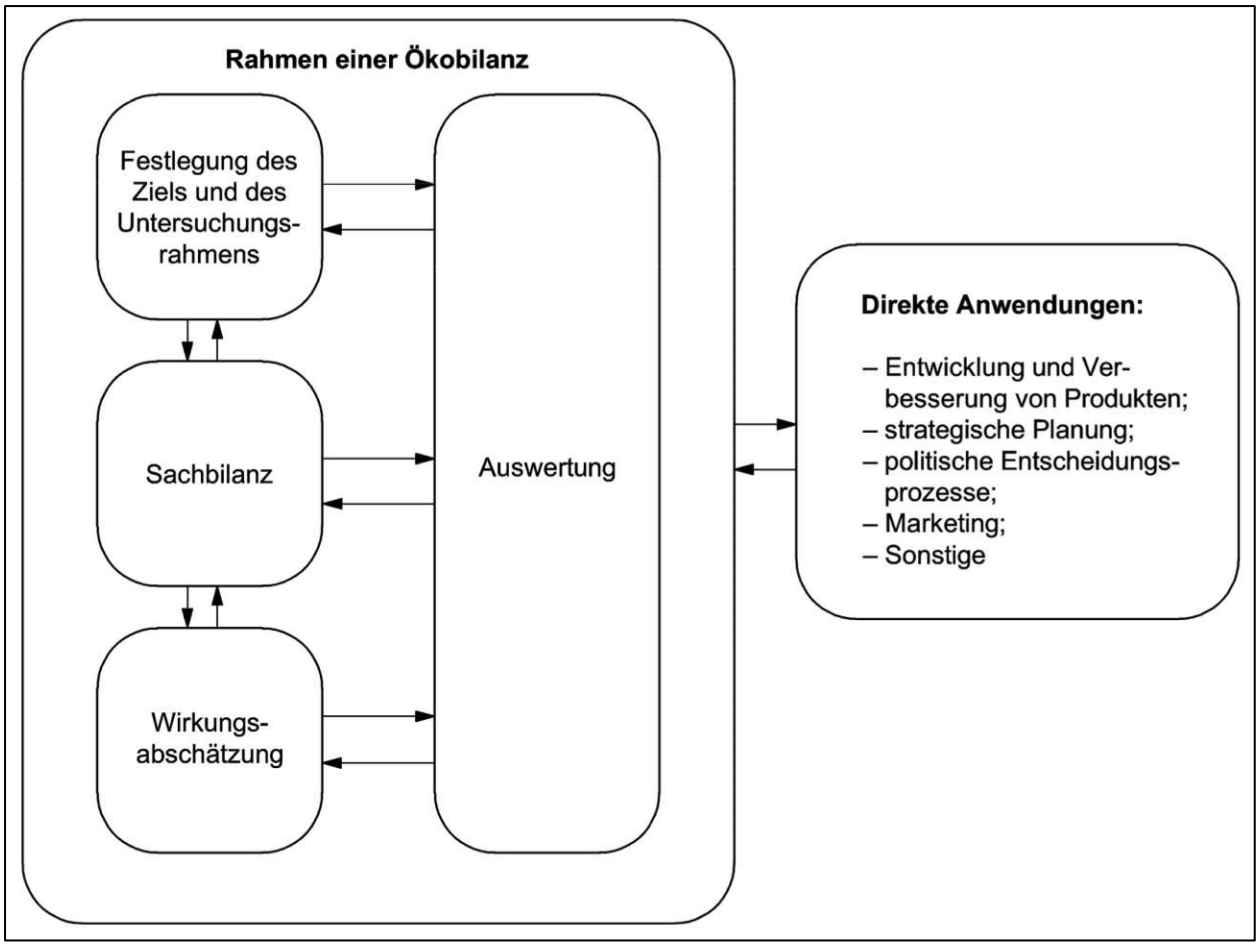

Abbildung 2-3: Phasen der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [6]

Nachfolgend werden die vier Phasen der Ökobilanz beschrieben.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2.3.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die Phase der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens ist die erste Phase einer Ökobilanz. Dabei werden neben der Zielsetzung, der Funktion und funktionellen Einheit, zusätzliche Definitionen vorgenommen, welche das Produktsystem beschreiben [6]. Dabei müssen alle Definitionen hinreichend genau beschrieben werden, damit die Ergebnisse der Analyse widerspruchsfrei sind, und einer kritischen Konsistenzprüfung standhalten. Bei dieser Konsistenzprüfung wird gewährleistet, dass die Ökobilanz die Vorgaben, welche von der Norm gestellt werden erfüllt [1].

Nachfolgend werden die nach DIN EN ISO 14040 beinhaltenden Bestandteile dieser Phase erläutert.

Ziel

Bei der Definition des Ziels, welcher der erste Schritt bei der Erstellung einer Ökobilanz ist, wird die beabsichtigte Anwendung und der Grund, weshalb die Studie durchgeführt wird beschrieben. Zusätzlich wird die Zielgruppe der Studie, und der Verwendungszweck, für welche die Ergebnisse der Untersuchung angedacht sind, definiert. Anhand der Beschreibung des Ziels werden anschließend alle weiteren Phasen und Bestandteile der Ökobilanz aufgebaut [6].

Produktsystem

Bei Ökobilanzen werden nicht Produkte, sondern Produktsysteme miteinander verglichen [1]. Als Produktsystem versteht man die Zusammenfassung aller Prozesse eines Produkts, welche für die zu untersuchende Funktion benötigt werden. Ein Prozess bezeichnet dabei die kleinste Zerlegung für die Erfassung von Daten, welche in der Sachbilanz vorgenommen wird. Diese Prozesse sind einerseits durch Zwischenproduktflüsse (In-, und Outputflüsse) miteinander und durch Elementarflüsse mit der Umwelt verbunden [6]. Unter Elementarflüssen versteht man Stoff-, oder Energieflüsse, welche ohne vorherige Behandlung in die Umwelt, z.B. durch Abwasser-, oder Abluftreinigung abgeleitet werden [8].

Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit bezeichnet man den Bezugswert, auf welchen alle Ergebnisse, in Form von CO_2-Äquivalenten bezogen werden. Bei einer Ökobilanz für Kraftfahrzeuge wird beispielsweise gefahrene Kilometer als funktionelle Einheit verwendet. CO_2-Äquivalente beschreiben die summierte Auswirkung aller Treibhausgase auf das Klima. Dabei wird die Gasmenge eines Treibhausgases mit dem jeweiligen CO_2-Äquivalent multipliziert. CO_2-Äquivalente ausgewählter Treibhausgase sind in Tabelle 2-1 ersichtlich.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tabelle 2-1: CO_2-Äquivalente ausgewählter Treibhausgase [9]

Chemisches Element	Summenformel	CO_2-Äquivalent
Kohlendioxid	CO_2	1
Methan	CH_4	28
Distickstoffmonoxid	N_2O	265
Tetrafluormethan	CF_4	6630

Vor allem bei vergleichenden Ökobilanzen hat die funktionelle Einheit eine grundlegende Bedeutung, da nur durch eine Normierung der Ergebnisse verschiedene Produkte vergleichbar gemacht werden können [2].

Allokationsverfahren

In der Regel entstehen bei der Herstellung von Produkten Nebenprodukte. Unter Nebenprodukte versteht man Produkte, welche bei einem Herstellungsverfahren zusätzlich entstehen, und nicht dem Hauptzweck der Produktion darstellen. Daher müssen die Input-, und Outputflüsse auf das zu untersuchende Produktsystem und alle anfallenden Nebenprodukte aufgeteilt werden [1]. Die Wahl des Allokationsverfahren sowie gängiger Methoden werden in Abschnitt 2.3.2 eingehend erklärt. Das Allokationsverfahren definiert die Aufteilung der CO_2-Äquivalente auf unterschiedliche Produktsysteme.

Datenqualität

Bei der Durchführung einer Ökobilanz werden meistens, bereits vorliegende Bilanzierungen für Rohstoffe oder Prozesse aus Datenbanken entnommen [1]. Häufig werden die Datenbanken GaBi, Ecoinvent, ProBas, ELCD oder GEMIS herangezogen. Damit die Ökobilanz über eine notwendige Zuverlässigkeit verfügt, werden am Beginn Anforderungen an die Daten hinsichtlich des Erscheinungsjahrs und der Art der Quelle definiert.

Systemgrenze

Nicht alle Prozesse eines Produktsystems müssen bei einer Ökobilanz untersucht werden. Die Systemgrenze schafft dabei einen Rahmen, innerhalb dessen ein Produktsystem betrachtet wird. Die Systemgrenze wird dabei aus den Zieldefinitionen abgeleitet. Da sich diese Definitionen im Verlauf der Durchführung der Ökobilanz ändern können, kann es erforderlich sein, dass auch die Systemgrenze angepasst wird. Außerhalb der Systemgrenze befindet sich die Systemumgebung. Abbildung 2-4 zeigt den möglichen Aufbau eines Produktsystems mit den beinhaltenden Prozessen, den

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Input-, Output-, und Elementarflüssen und der Systemgrenze [1]. In-, und Outputflüsse treten zwischen den Prozessen auf. Elementarflüsse treten über die Systemgrenze ein und aus.

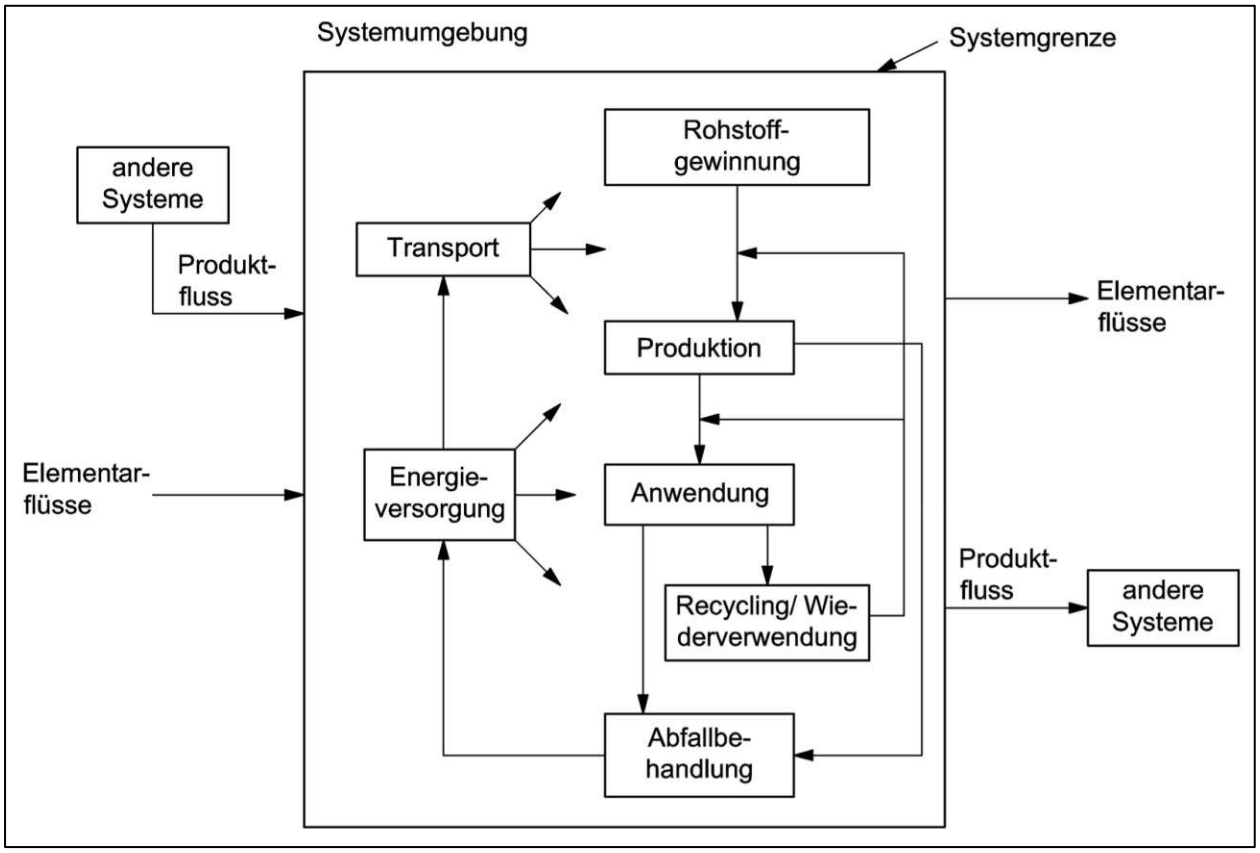

Abbildung 2-4: Beispiel eines Produktsystems nach DIN EN ISO 14040 [6]

Abschneidekriterium

Durch das Abschneidekriterium werden geringfügige Inputs bei großen Produktsystemen nicht in der Bilanzierung berücksichtigt. Dadurch wird der Aufwand der Datenerfassung auf ein vertretbares Maß, bei jedoch nicht beeinträchtigter Aussagekraft der Ergebnisse reduziert. Die Aussagekraft bleibt dadurch erhalten, da nur ein geringer Anteil der Inputs abgeschnitten wird [2]. Nach DIN EN ISO 14044 kann dieses Kriterium anhand der Masse, der Energie oder der Umweltrelevanz definiert werden [5]. Als Abschneidekriterium kommt oft, aufgrund der einfachen Erfassung, die massenbezogene 1-Prozentregel zum Einsatz [1]. Dabei werden all jene Materialinputs nicht in der Bilanzierung berücksichtigt, welche weniger als 1% der Gesamtmasse betragen, wobei jedoch die insgesamt abgeschnittene Masse nicht mehr als 5% betragen darf. Zusätzlich muss aber sichergestellt sein, dass die abgeschnittene Menge nicht über eine hohe Umweltrelevanz aufweist (z.B. radioaktive Materialien, seltene Erden).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Wirkungskategorie und Wirkungsabschätzung

Bevor die einzelnen Prozesse quantifiziert werden können, muss festgelegt werden, auf welche Umweltthemen diese untersucht werden sollen. Die Bestandteile der Wirkungskategorie und der Wirkungsabschätzung sowie eine mögliche Auswahl für Ökobilanzen sind in Abschnitt 2.3.3 angeführt.

Annahmen und Einschränkungen

Oftmals sind nicht alle Aspekte eines Prozesses bekannt, oder die Erfassung der Daten ist mit einer sehr hohen Komplexität verbunden. Damit trotzdem eine Analyse durchführbar ist, werden die Daten fachmännisch durch Annahmen und Einschränkungen abgeschätzt. Diese Annahmen und Einschränkungen müssen am Ende einer Ökobilanz mittels einer Sensitivitätsanalyse überprüft werden. Die Vorgehensweise dieser Sensitivitätsanalyse wird in Abschnitt 2.3.4 beschrieben.

2.3.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz ist die zweite Phase einer Ökobilanz, und mit dem größten zeitlichen Aufwand verbunden [2]. Aufbauend auf den Definitionen des Untersuchungsrahmens, werden dabei für jeden Prozess die Input-, und Outputflüsse ermittelt. Vor allem in dieser Phase ist die Eigenschaft des iterativen Ansatzes einer Ökobilanz stark ausgeprägt, da kleine Änderungen hinsichtlich Datenanforderungen, Annahmen oder Einschränkungen großen Einfluss auf das Verfahren der Bilanzierung haben. Die Sachbilanz beinhaltet dabei die Datenerhebung, die Datenberechnung sowie die Allokation von Flüssen und gliedert die Input-, und Outputflüsse anhand der Phasen des Lebensweges. Die Ergebnisse der Sachbilanz sind Rohstoff-, und Energiemengen, welche noch keinen Bezug zur Umweltwirkung haben.

Datenerhebung

Bei der Datenerhebung werden global für alle Prozessmodule die Input-, und Outputflüsse ermittelt. Prinzipiell werden die Daten, welche für jedes Prozessmodul bilanziert werden, anhand von Energie-, Rohstoff oder Betriebsstoffinputs gemessen [1].

Datenberechnung

Die Daten, welche nach der Datenerhebung für das gesamte Produktsystem vorliegen, werden bei der Datenberechnung den einzelnen Prozessen zugewiesen und auf die funktionelle Einheit bezogen [6].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Allokation

Entstehen während des Herstellungsprozess sogenannte Koppelprodukte, welche abfallende Nebenprodukte des zu untersuchenden Produktsystems beinhalten, müssen die entstandenen Umweltlasten auf mehrere Produkte aufgeteilt werden. Diese Aufteilung wird als Allokation bezeichnet, und ist aufgrund der Problematik bei der Erkennung der anfallenden Koppelprodukte und deren Menge mit einer hohen Komplexität verbunden. Dabei kann eine Aufteilung hinsichtlich der Masse, physikalischen-, oder ökonomischen Gesichtspunkten gewählt werden. Die Wahl wird dabei je nach Eignung der jeweiligen Ökobilanz getroffen.

Für den Recyclingprozess wird häufig das „quasi-closed-loop System“ verwendet. Hierbei werden die bilanztechnischen Gutschriften des Recyclings wieder in das gleiche System zurückgeführt. Dies führt dazu, dass keine recyclingbezogene Allokation berücksichtigt werden muss [1].

Dieses Prinzip wird folgendermaßen umgesetzt: Bei der Bilanzierung der Herstellung, werden zuerst nur Primärrohstoffe berücksichtigt, obwohl in der Regel auch Sekundärrohstoffe verwendet werden. Primärrohstoffe sind Rohstoffe welche, für einen erstmaligen Gebrauch hergestellt werden. Sekundärrohstoffe sind wiederaufbereitete Rohstoffe. Erst am Lebensende werden die CO_2-Äquivalent-Gutschriften, welche durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen entstehen, den Ergebnissen des Produkts gutgeschrieben. Dabei fallen beim Recycling zur Bereitstellung von Sekundärrohstoffen auch CO_2-Äquivalente an, welche in der Bilanzierung berücksichtigt werden müssen.

2.3.3 Wirkungsabschätzung

Bei der Phase der Wirkungsabschätzung werden die Ergebnisse der Sachbilanz hinsichtlich der potenziellen Umweltwirkungen beurteilt. Die Wirkungsabschätzung enthält nach DIN EN ISO 14040 drei verbindliche Bestandteile. Zu diesen zählen: die Auswahl von Wirkungskategorie, Wirkungsindikator und des Charakterisierungsmodells. Die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse (Klassifizierung) und Berechnung der Wirkungsindikatorwerte (Charakterisierung) sind optionale Bestandteile [6].

Bei der Wirkungsabschätzung wird folgendermaßen vorgegangen: Zuerst wird die Wirkungskategorie ausgewählt. Diese Kategorie, stellt den Einfluss des Produkts oder des Prozesses in Bezug auf die Umweltkategorie dar. Mögliche Wirkungskategorien sind Klimaänderung, Versauerung oder stratosphärischer Ozonabbau. Je nach Wirkungskategorie unterscheidet sich der Wirkungsindikator. Dieser stellt die Wirkungskategorie quantifizierbar, in Bezug auf die funktionelle Einheit dar (CO_2-, SO_2,-NO_x-Äquivalente je funktionelle Einheit). Damit die Ergebnisse der Sachbilanz in den

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

gemeinsamen Wirkungsindikator umgewandelt werden können (Klassifizierung und Charakterisierung), wird ein Charakterisierungsfaktor benötigt. Dieser Charakterisierungsfaktor wird aus dem Charakterisierungsmodell ausgewählt. In der Regel wird für das Charakterisierungsmodell das Szenario „Baseline über 100 Jahre“ des fünften Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der vereinten Nationen für Klimaänderungen (IPCC AR5) [9] herangezogen. Nach der Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu dem Wirkungsindikator liegen die Ergebnisse der Ökobilanz vor. Diese beinhalten alle Phasen des Lebensweges und sind auf die funktionelle Einheit bezogen dargestellt.

Abbildung 2-5 zeigt die Vorgangsweise bei der Wirkungsgradabschätzung anhand eines Beispiels für Schwefeldioxid.

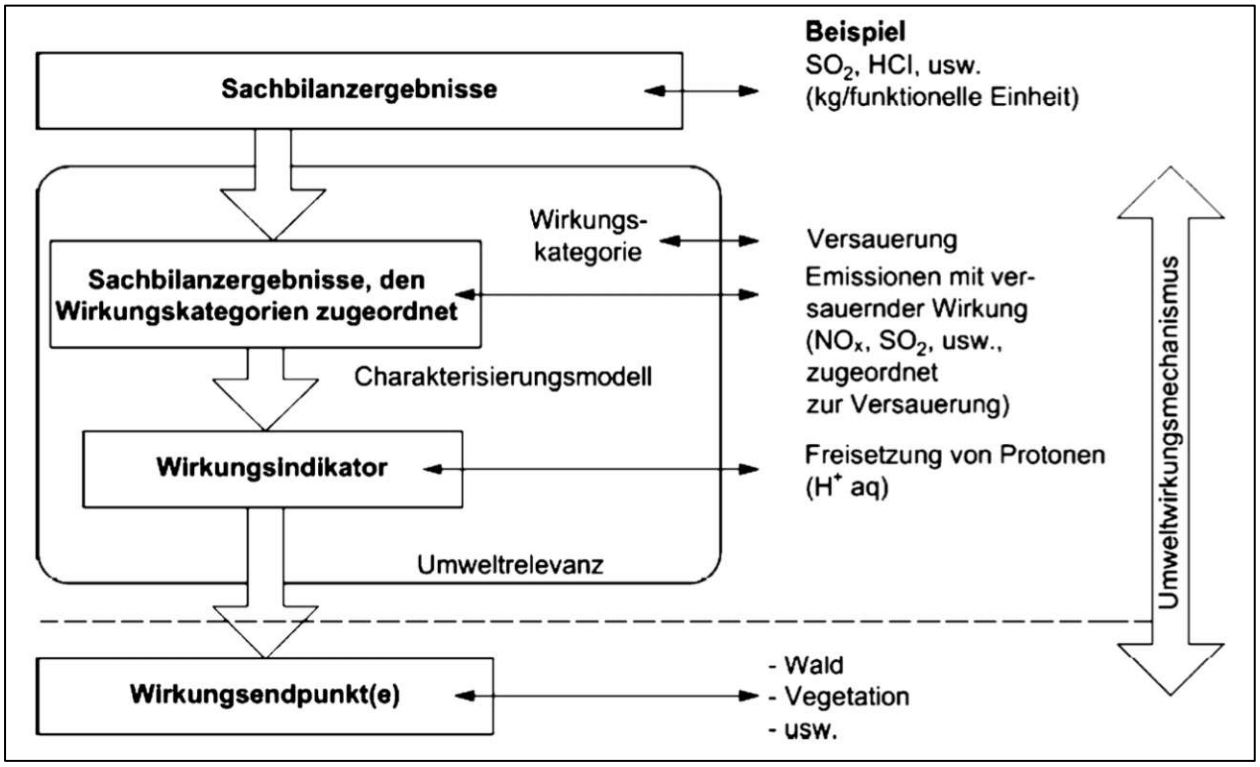

Abbildung 2-5: Vorgangsweise bei der Wirkungsgradabschätzung [10]

2.3.4 Auswertung

Nach DIN EN ISO 14044 werden in der Phase der Auswertung die Ergebnisse der Ökobilanz den Lebenswegabschnitten aufgeteilt und grafisch aufbereitet [6]. Die Ergebnisse, müssen dabei den Zielen und Anforderungen der Ökobilanz entsprechen. Zusätzlich können aus den Ergebnissen der Auswertung Schlussfolgerungen und Empfehlungen ausgearbeitet werden. Dabei können Potentiale zur Einsparung von CO_2-Äquivalenten einzelner Prozesse oder Lebenswegphasen aufgezeigt, oder der Vergleich zu ähnlichen Produkten oder Prozessen hergestellt werden. Abschließend werden in dieser Phase der Ökobilanz auch die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse unterzogen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ist ein Teil der Auswertung einer Ökobilanz, in welcher die Annahmen und Einschränkungen, die in der Phase der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens definiert wurden, überprüft werden. Dabei werden die zu untersuchenden Annahmen und Einschränkungen einer Variation unterzogen. Hierbei wird beispielsweise folgendermaßen vorgegangen: Die Transportdistanzen bei der Herstellung wurden mit 1000 km angenommen. Bei der Sensitivitätsanalyse wird nun eine Veränderung um ± 50% durchgeführt und überprüft, wie sich die Ergebnisse verändern. Infolgedessen kann durch die Sensitivitätsanalyse der Einfluss eines Prozesses auf die gesamten CO_2-Äquivalente sichtbar gemacht werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3 Ökobilanz – MHP

Nachfolgend wird zuerst das Produkt, welches mittels einer Ökobilanz untersucht werden soll, vorgestellt. Anschließend werden die eingesetzten Methoden der vier Phasen der Ökobilanz nach Kapitel 2 beschrieben. Dabei folgt die Struktur der durchgeführten Ökobilanz der Vorgabe durch die Norm DIN EN ISO 14040.

3.1 Produkt – MHP

Das Produkt MHP (Mobile Hydrogen Powersupply), kann von einem PKW gezogen, und für die Pannenhilfe von BEV, welche aufgrund einer entladenen Hochvoltbatterie liegengeblieben sind, verwendet werden. Abbildung 3-1 zeigt ein CAD-Modell der MHP.

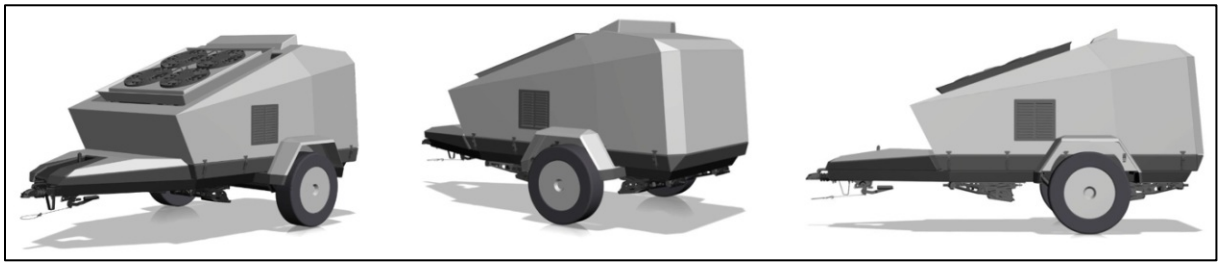

Abbildung 3-1: CAD-Modell der MHP [11]

Für die Erzeugung der elektrischen Energie verwendet die MHP eine Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC). Der Wasserstoff wird in einem Typ-4 Wasserstoffspeicherbehälter (Kunststoffinnenbehälter mit vollständiger außen angebrachten Kohlefaserverstärkung) gespeichert.

Die MHP verfügt einen Niedervoltkreis, welcher zur Versorgung der Nebenaggregate dient. Über den Hochvoltkreis wird das BEV geladen. Abbildung 3-2 zeigt die Systemdarstellung der MHP.

Befindet sich die MHP im Betrieb kann entweder direkt über die Brennstoffzelle, die Hochvoltbatterie oder einer Kombination aus beiden geladen werden. Die Hochvoltbatterie versorgt jedoch immer die elektrischen Nebenaggregate mit elektrischer Energie. Die Nieder-, und Hochvoltbatterie stellen gemeinsam die elektrische Energie für die Start-, und Shut-Down-Prozedur bereit.

Der Ladevorgang eines BEVs erfolgt über CCS-, oder Typ 2-Stecker.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

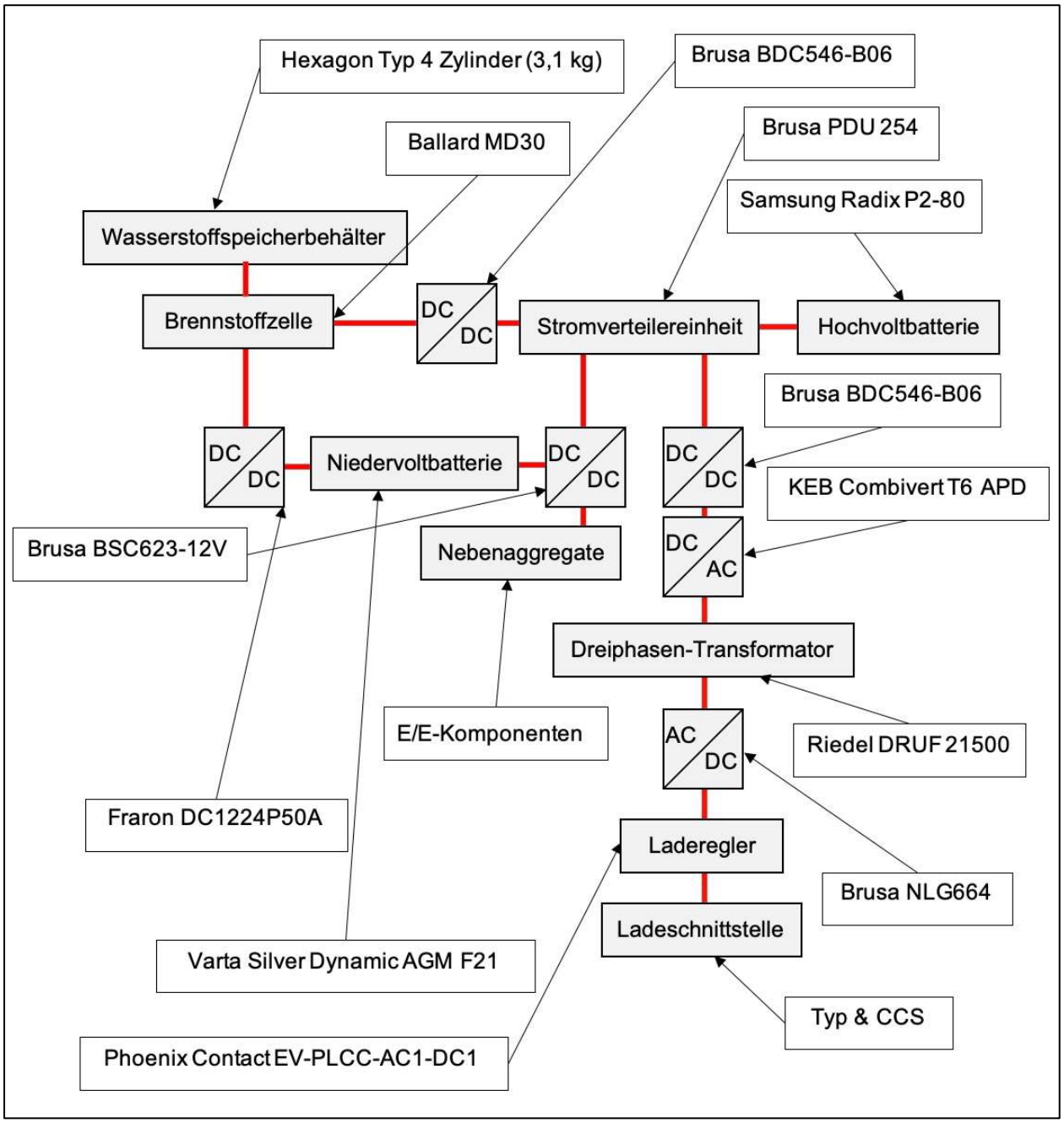

Abbildung 3-2: Systemdarstellung der MHP

Das Unternehmen Magna entwickelt und stellt die MHP her, wobei Magna die einzelnen Komponenten zukauft. Die MHP wird beim ÖAMTC zum Einsatz kommen.

3.1.1 Projektziel

Das Projektziel der MHP ist die Bereitstellung von elektrischer Energie, mit einer maximalen Ladeleistung von 20 kW, für BEV welche aufgrund einer entladenen Hochvoltbatterie liegengeblieben sind.

Diese Ladeleistung ist ausreichend, da die MHP nur für die Pannenhilfe von BEV, und nicht als stationäre Ladestation eingesetzt wird. Eine höhere Ladeleistung führt zu

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

deutlich größeren Komponenten, und zu einer Einschränkung der Transporteigenschaften der MHP.

3.1.2 Komponenten der MHP

Die Komponenten der MHP, werden nach Magna in zehn Baugruppen untergeordnet. Diese Baugruppen sind in Tabelle 3-1 dargestellt. Eine genaue Bezeichnung der Baugruppen und der Komponenten, ist in Abschnitt 3.3 angeführt.

Tabelle 3-1: Baugruppen und Komponenten der MHP

Baugruppe	Abkürzung	Komponenten
Anhängersystem	-	Fahrgestell des Anhängers, Bereifung und Felgen
Brennstoffzellensystem	FCS	Brennstoffzelle mit dazugehörigen Kälteschutzmantel und Trägerrahmen
Kathodensystem	ASS	Luftkompressor mit dazugehörigem Regler, Luftfilter, Trägerrahmen und Silikonschläuchen
Wasserstoffspeichersystem	HSS	Wasserstoffspeicherbehälter mit Verrohrung und Ventilen und Trägerrahmen
Kühlsystem	CS	Unterteilung in Brennstoffzellen-, und Hochvoltkühlsystem: Kühlmittelpumpen, Kühlmittelbehälter, Wärmeübertrager, Silikonschläuche, Kühlflüssigkeiten, diverse Lüfter und Lüftergehäuse
Auspuffsystem	ES	Auspuffrohre und Silikonschläuche
Hochvoltsystem	HVS	Hochvoltbatterie, DC/DC-Wandler, AC/DC-Wandler, Laderegler, DC/AC-Wandler Stromverteilereinheit (PDU), Transformator, Hochvoltkabel und Trägerrahmen
Niedervoltsystem	LVS	Niedervoltbatterie, DC/DC-Wandler, Niedervoltkabel, Steuergerät, Sicherungsboxen und Notausschalter
Ladesystem	CHU	Ladestecker und dazugehörige Ladekabel
Gehäuse	-	Trägerrahmen und Verkleidung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.2 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Nachfolgend wird die Phase der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens der MHP, anhand der in Abschnitt 2.3.1 beschrieben Methodik erläutert.

3.2.1 Ziel

Für das Produkt MHP, soll eine skalierbare Ökobilanz in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 für die Nutzung im Großraum von Wien erstellt werden. Diese geographische Wahl wird aufgrund der zwei folgenden Argumente getroffen: Zwei der fünf Wasserstofftankstellen in Österreich befinden sich in Wien und der Umgebung von Wien. Hinsichtlich der besseren Eignung für Carsharing Anbieter, und möglicher Fahrverbote für Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, wird ein hoher Zuwachs an BEV für Großstädte erwartet [12], [13].

Dabei soll die Pannenhilfe für BEV aufgrund von einer entladenen Hochvoltbatterie untersucht werden. Die ermittelten CO_2-Äquivalente der MHP sollen mit einem konventionellen mobilen Dieselgenerator verglichen werden. Anhand dieses Vergleichs kann das ökologische Potential der MHP aufgezeigt werden.

Die aus dieser Ökobilanz abgeleiteten Ergebnisse können dabei richtungsweisende Informationen für Entscheidungsträger im Mobilitäts- und Energiesektor darstellen.

3.2.2 Funktion des Produktsystems

Die Funktion der MHP ist die emissionsarme Erzeugung von elektrischer Energie, durch den Einsatz eines mobilen Brennstoffzellensystems.

Der Lebensweg des Produkts gliedert sich in drei Phasen: Herstellung, Nutzung und Lebensende, welchen die jeweiligen Prozessmodule zugeteilt sind.

Abbildung 3-3 zeigt die Prozessmodule der Phasen des Lebensweges, die Input-, und Outputflüsse der einzelnen Prozesse, die Elementarflüsse welche an die Umwelt abgegeben werden, sowie die Systemgrenze, die eine Abgrenzung der nicht zu untersuchenden Prozesse schafft.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

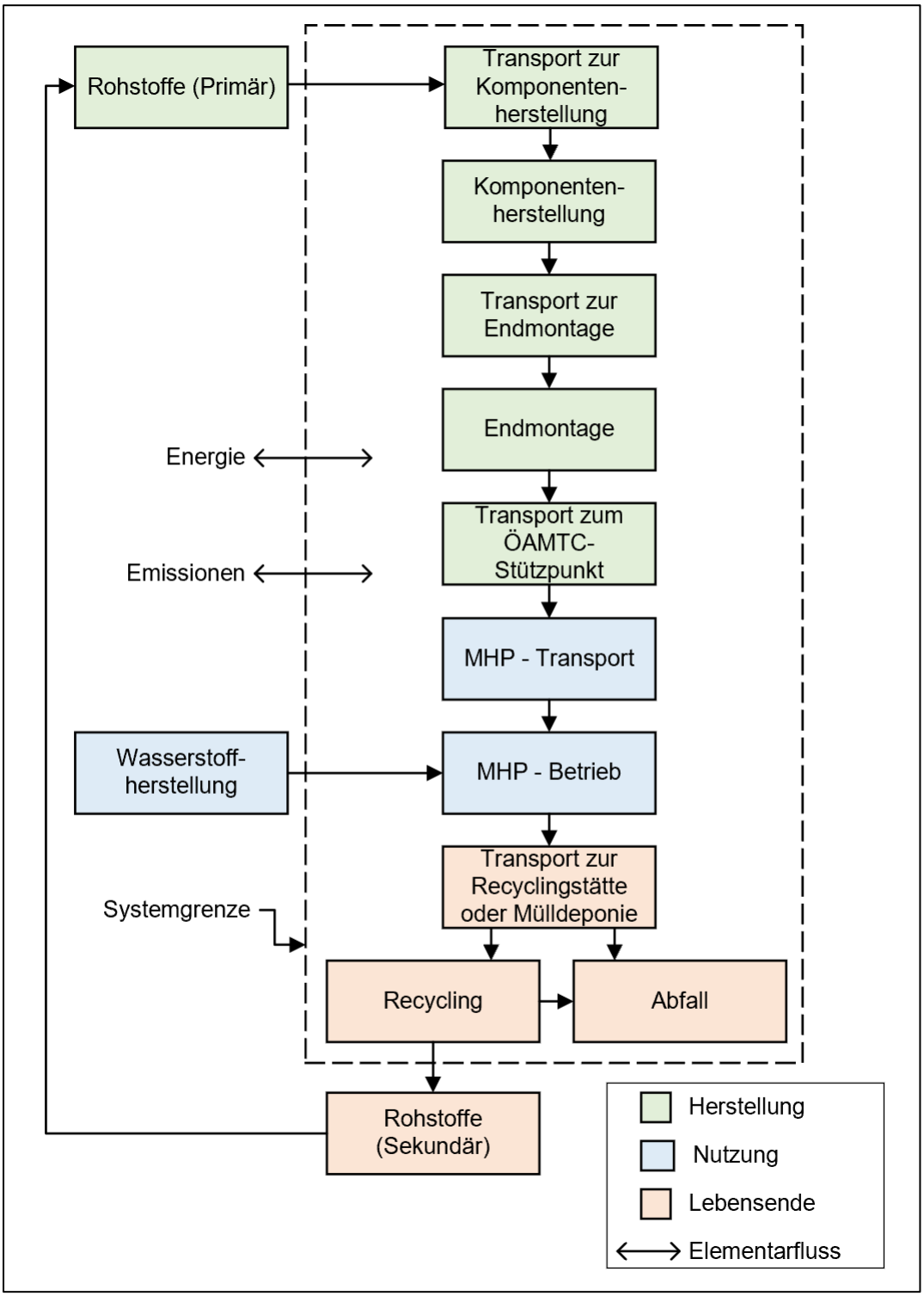

Abbildung 3-3: Produktsystem der MHP

Dabei sind die Prozesse, welche der Herstellung zugeordnet sind, grün, der Nutzung blau und des Lebensendes rot dargestellt. Die genaue Beschreibung der Prozesse ist in Abschnitt 3.3 angeführt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.2.3 Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit wird eine Kilowattstunde elektrische Energie (kWh_e) gewählt, da dadurch die Pannenhilfe für BEV welche aufgrund einer entladenen Hochvoltbatterie liegengeblieben sind, unabhängig von der Ladestrategie repräsentiert werden kann. Die Ladestrategie ist die Energiemenge, die für die das BEV bereitgestellt wird.

3.2.4 Abschneidekriterium

Für das Abschneidekriterium wird eine 1-Prozentregel, bezogen auf die Masse verwendet. Dabei werden die Baugruppen, die Komponenten der Baugruppen, und die Rohstoffe der Komponenten separat betrachtet.

Demnach werden all jene Baugruppen der MHP welche weniger als 1% der Gesamtmasse der MHP ausmachen, nicht in der Sachbilanz berücksichtigt. Die Summe aller abgeschnitten Baugruppen darf jedoch nicht mehr als 5% der Gesamtmasse der MHP betragen.

Für alle berücksichtigten Baugruppen wird selbiges Verfahren bezüglich der Komponenten angewendet, wobei wiederum alle Komponenten, welche weniger als 1% der Masse der Baugruppe betragen abgeschnitten werden. Gleichzeitig darf die abgeschnittene Masse der Komponenten nicht mehr als 5% der Masse der Baugruppe ausmachen.

Gleiches wird wiederum für die Rohstoffe der Komponenten angewendet. Alle Rohstoffe einer Komponente, welche weniger als 1% der Masse der Komponente betragen werden abgeschnitten. Die abgeschnittene Masse an Rohstoffen darf nicht mehr als 5% der Masse der Komponente betragen.

Durch diese Vorgangsweise wird eine sehr genaue Bilanzierung ermöglicht.

3.2.5 Allokationsverfahren

Für die Bilanzierung der Herstellung der Komponenten werden vorhandene Ökobilanzen herangezogen. In diesen sind bereits die Koppelprodukte berücksichtigt.

Für die Erfassung des Recyclings wird das „quasi-closed-loop System“ verwendet. Dabei fließen die bilanztechnischen Gutschriften des Recyclings wieder in das gleiche System zurück.

Daher muss für diese Ökobilanz keine Allokation angewendet werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.2.6 Methode für die Wirkungsabschätzung

Als Wirkungskategorie wird die Klimaänderung ausgewählt. Für das Charakterisierungsmodell wird das Szenario „Baseline über 100 Jahre“ des fünften Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der vereinten Nationen für Klimaänderungen (IPCC AR5) verwendet [9]. Diesem Modell werden die Treibhauspotentiale jedes Treibhausgases entnommen. Als Wirkungsindikator werden CO_2-Äquivalente je funktioneller Einheit ($kgCO_2e/kWh_e$) gewählt.

3.2.7 Anforderung an die Daten

Damit die Ergebnisse der Ökobilanz dem Stand der Technik entsprechen, wird an die Daten, die folgende Forderung gestellt. Rohstoffdaten dürfen nicht älter als 20 Jahre, vergleichende Ökobilanzen nicht älter als 10 Jahre sein.

Die Datenerhebung der Komponenten gliedert sich in drei Prioritätsstufen. Primär werden bereits bestehende Ökobilanzen herangezogen. Wobei die Skalierung über die im Herstellerdatenblatt ausgewiesene Komponentenmasse erfolgt. Sollten keine bestehenden Ökobilanzen vorliegen, wird zweitrangig die Materialzusammensetzung anhand des Herstellerdatenblatts abgeschätzt und bilanziert. Liegen weder bestehende Ökobilanzen noch Herstellerdatenblätter vor, so wird die Masse sowie die Materialzusammensetzung der Komponente anhand von Fotos abgeschätzt. Eine genauerer Datenerhebung ist nicht möglich, da keine Detaildaten der Komponentenhersteller, bezüglich der verbauten Rohstoffe vorliegen.

Die CO_2-Äquivalente der Rohstoffe werden aus der Datenbank GEMIS 4.9 entnommen.

3.2.8 Annahmen und Einschränkungen

Die nachfolgenden allgemeinen Annahmen und Einschränkungen gelten für die komplette Ökobilanz. Zusätzlich werden für die drei Phasen des Lebensweges, weitere Annahmen getroffen. Die gewählten Annahmen der drei Phasen des Lebensweges werden hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen mittels einer Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 3.5.8 überprüft, da diese direkt die Ergebnisse beeinflussen.

Allgemeine Annahmen und Einschränkungen

Für die Bilanzierung wird der Einsatz von einer MHP ausgegangen. Die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer der MHP bis zur Abschreibung wird mit 10 Jahren festgelegt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Basisannahmen für die Herstellung

Für die Herstellung werden nur Primärrohstoffe verwendet, die Gutschriften, welche durch das Recycling entstehen fließen erst anhand des gewählten „quasi-closed-loop Systems“ am Lebensende in das Produktsystem zurück.

Der Rohstoffbedarf und der Energieaufwand bei der Herstellung der Komponenten stammt aus vergleichbaren Studien. Diese werden anhand der in den Herstellerdatenblättern ausgewiesenen Masse der in der MHP verbauten Komponenten, welche in Abschnitt 3.3.1 angeführt sind skaliert. Für die zur Herstellung benötigte Energie wird der aktuelle europäische Energiemix (EU-27) verwendet. Diese Wahl ist dadurch begründet, da die Produktionsstandorte der Komponenten nicht bekannt sind.

Die drei Transportprozesse sind in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Transportdistanz der Rohstoffe zur Komponentenherstellung, und der Komponenten zur Endmontage wird mit jeweils 22.400 km abgeschätzt, und nach diversen Transportmitteln aufgeteilt. Die Transportdistanz wird auf 21.000 km Überseeschiff (Shanghai-Rotterdam), 1.200 km Güterbahn (Rotterdam-Wien) und 200 km LKW (Wien-Graz) aufgeteilt. Der Transport zum ÖAMTC-Stützpunkt wird mit 200 km LKW (Graz-Wien) abgeschätzt.

Die Verpackung wird mit 10% der transportierten Masse abgeschätzt. Für die Materialzusammensetzung der Verpackung wird 90% Karton und 10% Polyethylen angenommen.

Diese Basisannahmen für die Herstellung, welche in Tabelle 3-2 ersichtlich sind, bilden die Grundlage für die Sachbilanz.

Tabelle 3-2: Basisannahmen für die Herstellung

Rohstoffe	Primärrohstoffe
Rohstoffbedarf	nach vergleichbaren Studien oder abgeschätzt
Energieaufwand	nach vergleichbaren Studien oder abgeschätzt
Verpackung	10% der Komponentenmasse
Transportdistanz	22.400 km (diverse Transportmittel), 200 km LKW

Basisannahmen für die Nutzung

Die MHP wird an einem ÖAMTC-Stützpunkt stationiert. Daher setzt sich die Transportdistanz aus einer Kombination der Strecken vom ÖAMTC-Stützpunkt, zum Einsatzstelle und vom ÖAMTC-Stützpunkt zur Wasserstofftankstelle, wenn der Wasserstoffspeicher leer ist, zusammen. Die Beschreibung der Berechnung der Transportdistanz ist in Abschnitt 3.3.2 angeführt.

Dabei wird der Einsatz eines PKWs mit Verbrennungsmotor als Transportfahrzeug für die MHP angenommen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Nachdem keine Daten hinsichtlich des österreichischen Wasserstoffmix vorliegen, wird der aktuelle europäische Wasserstoffmix für den Betrieb der MHP herangezogen. Die BEV-Ladeleistung wird mit 20 kW angenommen. Dies entspricht in etwa dem Maximum der BEV-Ladeleistung, welche die MHP bereitstellen kann. Für die Pannenhilfe liegengebliebener BEV aufgrund einer entladenen Hochvoltbatterie wird 5 kWh elektrische Energie bereitgestellt.

Tabelle 3-3 zeigt die Basisannahmen der Nutzung, welche für die Bilanzierung verwendet werden. Mögliche Variationen dieser Annahmen sind in Kapitel 3.5.8 dargestellt.

Tabelle 3-3: Basisannahmen für die Nutzung

Transportweg - Einsatz	ÖAMTC-Stützpunkt → Einsatzstelle → ÖAMTC-Stützpunkt
Transportweg - Betankung	ÖAMTC-Stützpunkt → Tankstelle → ÖAMTC-Stützpunkt
Wasserstoffherstellung	Aktueller europäischer Wasserstoffmix
Transportfahrzeug	Dieselfahrzeug
Ladeleistung	20 kW
Elektrische Energie	5 kWh

Basisannahmen für die Lebensende-Prozesse

Die Transportdistanz am Lebensende zur Recyclingstätte oder Deponie wird mit 200 km abgeschätzt.

Der Grad an wiederverwendbaren Rohstoffen wird anhand der jeweiligen rohstoffspezifischen Quote gemessen.

Die Basisannahmen zur Bilanzierung des Lebensendes sind in Tabelle 3-4 angeführt, und werden hinsichtlich der Auswirkungen in Abschnitt 3.5.8 überprüft.

Tabelle 3-4: Basisannahmen für das Lebensende

Transportwege	200 km
Recycling	Nach rohstoffspezifischer Quote

3.3 Sachbilanz

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Datenerhebungs-, und Datenberechnungsverfahren zur Ermittlung der Input-, und Outputflüsse der Prozesse, während der drei Phasen des Lebensweges der MHP beschrieben. Diese werden für jedes Prozessmodul erfasst, und auf die funktionelle Einheit bezogen. Für die Sachbilanz

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

werden die Annahmen und Einschränkungen nach Abschnitt 3.2.8 herangezogen. Die Sachbilanz der MHP ist im LCA-Berechnungstool dokumentiert [14].

3.3.1 Herstellung

Die erste Phase des Lebensweges bildet die Herstellung der MHP. Dabei erfolgt die Herstellung der MHP als Einzelfertigung. Der Herstellung sind die Prozesse Rohstoffe (Primär), Transport der Rohstoffe zur Komponentenherstellung, Komponentenherstellung, Transport der Komponenten zur Endmontage, Endmontage und Transport zum ÖAMTC-Stützpunkt zugeordnet. Für die Bilanzierung werden die Basisannahmen für die Herstellung nach Tabelle 3-2, und die Allgemeinen Annahmen und Einschränkungen nach Abschnitt 3.2.8 verwendet.

Abbildung 3-4 zeigt das Produktsystem Herstellung in einem höheren Detailierungsgrad. Die jeweiligen Prozesse sind nachfolgend im Detail beschrieben.

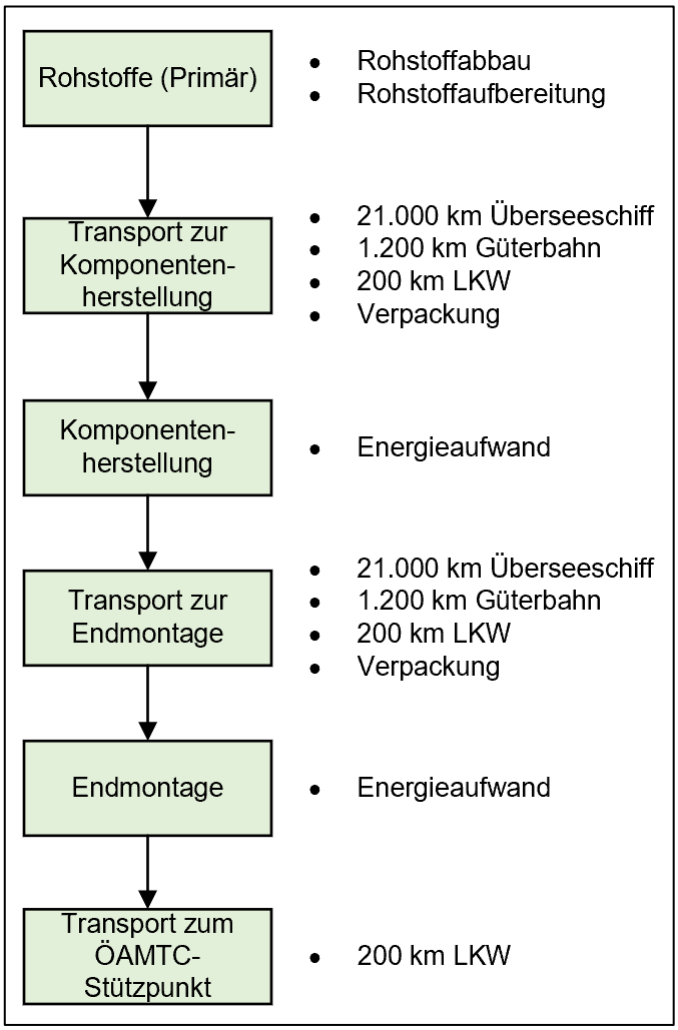

Abbildung 3-4: Detaillierte Darstellung der Prozesse – Herstellung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Rohstoffe (Primär)

Hinsichtlich des „quasi-closed-loop Systems“, werden zur Herstellung nur Primärrohstoffe herangezogen. Die CO_2-Äquivalente der einzelnen Primärrohstoffe, welche bereits die erzeugten CO_2-Äquivalente von Rohstoffabbau und Rohstoffaufbereitung beinhalten, werden dabei aus der Datenbank GEMIS 4.9 entnommen.

Transport

Bei der Herstellung fallen dreimal CO_2-Äquivalente aufgrund der Transportprozesse an. Erstens müssen die Rohstoffe zur Komponentenfertigung transportiert werden. Zweitens werden die Komponenten zur Endmontage transportiert. Drittens wird die MHP zum ÖAMTC-Stützpunkt transportiert. Aufgrund der Tatsache, dass die Standorte der Komponentenwerke nicht bekannt sind, werden diese Transportdistanzen abgeschätzt. Die getroffene Abschätzung wird in Abschnitt 3.2.8 beschrieben.

Komponenten Herstellung

Die Vorgangsweise der Datenerhebung gliedert sich nach den drei Prioritätsstufen, welche in Abschnitt 3.2.7 beschrieben sind.

Für die Bilanzierung der Komponenten, werden die aus der Erhebung gewonnenen Massenanteile, den Primärrohstoffen zugeordnet.

Nachfolgend werden die bilanzierten Komponenten jeder Baugruppe beschrieben. Die Zuordnung erfolgt dabei anhand der Gliederung nach Tabelle 3-1.

Die Materialzusammensetzung der einzelnen Komponenten sind in Anhang A angeführt.

Anhängersystem (Trailer)

Die Materialzusammensetzung sowie die Masse des Anhängergestells der Felgen, der Reifen und des Kotflügels entstammen den Angaben von Magna. Für die Bilanzierung der Bereifung wird eine bereits vorhandene Ökobilanz verwendet [15]. In Tabelle 3-5 sind die der Komponenten zugehörigen Komponenten und deren Masse ausgewiesen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 3-5: Komponenten des Anhängersystems

Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
Anhängergestell	-	215
Felge (2x)	-	24
Reifen (2x)	-	31,6
Kotflügel (2x)	-	4,4
Gesamt		275

Brennstoffzellensystem (Fuel Cell System)

Für die Ballard MD30 PEMFC, erfolgt die Bilanzierung anhand einer bereits bestehenden Ökobilanz [16], [17]. Laut Angaben von Magna besteht der Frostschutzmantel aus einem Kunststoffgehäuse mit darin befindlichen Kupferheizspulen und einer Glaswolle Isolierung. Die Masse des Frostschutzmantels sowie des Rahmengestells entstammt den Angaben von Magna. Tabelle 3-6 zeigt die Komponenten des Brennstoffzellensystems.

Tabelle 3-6: Komponenten des Brennstoffzellensystems

Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
Brennstoffzelle	Ballard MD30	125
Frostschutzmantel	-	28,6
Trägerrahmen	-	10
Gesamt		163,6

Kathodensystem (Air Supply System)

Für die Zufuhr der Luft kommt ein Kompressor, welcher durch einen Kompressor-Regler gesteuert wird, zum Einsatz. Für die Materialzusammensetzung des Reglers wird eine vergleichende Ökobilanz-Inventarbilanz für Leistungselektronikkomponenten verwendet [18], [19]. Für die Bilanzierung der Silikonschläuche werden unterschiedliche Durchmesser und Ausführungen und deren produktspezifische Datenblätter herangezogen [20], [21]. Die Masse des Trägerrahmens, des Kompressors, des Kompressor-Reglers, sowie des Luftfilters entsprechen den Angaben von Magna. Die Komponenten des Kathodensystems sind in Tabelle 3-7 angeführt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 3-7: Komponenten des Kathodensystems

Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
Kompressor	-	37
Kompressor-Regler	-	1,6
Luftfilter	-	5
Trägerrahmen	-	10
Silikonschläuche	Matzen & Timm Silikonkühlerschlauch	1,1
Silikonschläuche	Matzen & Timm Silikonschlauch-Bogen 45°	0,1
Gesamt		54,8

Wasserstoffspeichersystem (Hydrogen Storage System)

Zur Speicherung des Wasserstoffs wird ein Typ-4 Wasserstoffspeicherbehälter verwendet, wobei für die Materialzusammensetzung eine bereits bestehende Inventarbilanz herangezogen wird [22], [23]. In dieser Inventarbilanz sind bereits sämtliche BOP-Teile berücksichtigt. Zu diesen zählen z.B. Ventile und Leitungen. Die Masse des Trägerrahmens entstammt den Angaben von Magna. Tabelle 3-8 zeigt die Komponenten der Baugruppe Wasserstoffspeichersystem.

Tabelle 3-8: Komponenten des Wasserstoffspeichersystems

Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
Wasserstoffspeicherbehälter	Hexagon Typ 4 Zylinder (3,1 kg)	59
Trägerrahmen	-	7,5
Gesamt		66,5

Kühlsystem (Cooling System)

Aufgrund dessen, dass unterschiedliche Kühlflüssigkeiten zum Einsatz kommen wird das Kühlsystem in einen Hochvolt-, und in einen Brennstoffzellenkreislauf unterteilt. Zu den Komponenten des Hochvoltkühlkreislaufes zählen die Kühlmittelpumpe, diverse Silikonschläuche, der Kunststoff-Kühlmittelbehälter, der Wärmeübertrager zwei baugleiche Lüfter sowie die Kühlflüssigkeit [24], [17], [25], [26], [27]. Dem Brennstoffzellenkühlkreislauf sind zwei baugleiche Lüfter, ein Kühlmittelbehälter aus Kunststoff, Silikonschläuche, ein Wärmeübertrager sowie die Brennstoffzellenkühlflüssigkeit zugeordnet [26], [25], [17], [28]. Die im System befindliche Kühlflüssigkeit wird aus der Addition aller Hohlräume des Kreislaufes errechnet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Zusätzlich sind im Kühlsystem weitere Komponenten verbaut, welche sowohl dem Hochvolt- als auch dem Brennstoffzellenkreislauf zuordenbar sind. Dazu zählen das Lüftergehäuse aus Kohlestofffaser, und zwei Lüfter zur konvektiven Kühlung der Komponenten [29]. Für die Bilanzierung werden die produktspezifischen Datenblätter herangezogen. In Tabelle 3-9 sind die Komponenten des Hochvolt- (HV), Brennstoffzellen- (BZ), sowie Gesamtsystem (G) dargestellt.

Tabelle 3-9: Komponenten des Kühlsystems

Kreislauf	Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
HV	Kühlmittelpumpe	Pierburg CWA-100.2	1
HV	Silikonschläuche	Matzen & Timm Silikonkühlerschlauch	1,7
HV	Kühlmittelbehälter	Mann+Hummel MCR 15	0,7
HV	Wärmeübertrager	-	4,8
HV	Lüfter (2x)	Spal Automotive VA164-ABL805HT/R-116A	11,6
HV	Kühlflüssigkeit	Eurolub Kühlerfrostschutz ANF	4,5
BZ	Wärmeübertrager	-	12,6
BZ	Lüfter (2x)	Spal Automotive VA164-ABL805HT/R-116A	11,6
BZ	Kühlmittelbehälter	Mann+Hummel MCR 25	0,9
BZ	Silikonschläuche	Matzen & Timm Silikonkühlerschlauch	2,1
BZ	Kühlflüssigkeit	Glysantin FC G 20-00/50	6,6
G	Lüftergehäuse	Eigenanfertigung	1
G	Lüfter (2x)	Spal Automotive VA116-ABL505P-105A	5,6
	Gesamt		64,7

Auspuffsystem (Exhaust System)

Die zur Ableitung des Produktwassers verwendeten Rohre aus Aluminium, entsprechen den Angaben von Magna. Diverse Silikonschläuche mit unterschiedlichen Durchmessern und Ausführungen werden anhand von Datenblättern bilanziert [20], [30]. Die Komponenten dieser Baugruppe sind in Tabelle 3-10 angeführt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 3-10: Komponenten des Auspuffsystems

Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
Aluminiumrohre	Eigenanfertigung	5
Silikonschläuche	Matzen & Timm Silikonkühlerschlauch	0,3
Silikonschläuche	Matzen & Timm Silikonschlauch-Bogen 90°	0,8
Gesamt		6,1

Hochvoltsystem (High Voltage System)

Das Hochvoltsystem beinhaltet neben der Hochvoltbatterie, und der Leistungselektronik auch die Hochvoltverkabelung der MHP. Die Bilanzierung der Hochvoltbatterie, wird anhand der Masse welche im Herstellerdatenblatt ausgewiesen ist, und einer vorhandenen Ökobilanz vorgenommen [31], [32]. Der Leistungselektronik sind eine Stromverteilereinheit, zwei HV-DC/DC-Wandler, ein HV-NV-DC/DC-Wandler, ein AC/DC-Wandler, ein DC/AC-Wandler, ein Regler sowie ein Dreiphasen-Transformator zugeordnet [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39]. Alle beschriebenen Komponenten werden anhand einer bereits vorhandenen Ökobilanz und den entsprechenden Datenblättern bilanziert [18], [19]. Die Bilanzierung der 70 mm^2 und 90 mm^2 Hochvoltkabel werden mittels Datenblättern und Abschätzung der Kabellänge von jeweils fünf Metern berechnet [40]. Zusätzlich ist dem Hochvoltsystem noch ein Trägerrahmen zugeordnet. Die Masse des Trägerrahmens entspricht den Angaben von Magna. Tabelle 3-11 zeigt die bilanzierten Komponenten des Hochvoltsystems.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 3-11: Komponenten des Hochvoltsystems

Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
Hochvoltbatterie	Samsung Radix P2-80	112
HV-DC/DC-Wandler (2x)	Brusa BDC546-B06	50,4
Stromverteilereinheit	Brusa PDU 254	3,9
DC/AC-Wandler	KEB Combivert T6 APD	30,9
AC/DC-Wandler	Brusa NLG664	12
Laderegler	Phoenix Contact EV-PLCC-AC1-DC1	0,7
HV-NV-DC/DC-Wandler	Brusa BSC623-12V	4,8
Dreiphasen-Transformator	Riedel DRUF 21500	48,6
Hochvoltkabel	RADOX screened battery cable 70mm^2	4,3
Hochvoltkabel	RADOX screened battery cable 90mm^2	5,8
Trägerrahmen	-	5
Gesamt		278,4

Niedervoltsystem (Low Voltage System)

Die Materialzusammensetzung des verwendeten Bleiakkumulators, wird anhand des Datenblatts und einer vorhandenen Ökobilanz bestimmt [41], [42]. Die Materialzusammensetzung des NV-DC/DC-Wandler, wird über das produktspezifische Datenblatt ermittelt [43]. Die Bilanzierung erfolgt über eine vorhandene Ökobilanz [18], [19]. Die Masse der zwei Schaltboxen, des Sicherungskastens, welcher einmal in kleiner und dreimal in großer Ausführung vorhanden ist, sowie der Batterieschalter entspricht den Angaben von Magna. Die Materialzusammensetzung des Niedervoltkabels wird laut Datenblatt des Komponentenherstellers berücksichtigt [40]. Für den Batterieanschluss werden 3 Meter, und für die Einbindung der Sensoren werden 10 Meter berücksichtigt. Die Komponenten des Niedervoltsystems sind in Tabelle 3-12 ersichtlich.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 3-12: Komponenten des Niedervoltsystems

Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
Bleiakkumulator	Varta Silver Dynamic AGM F21	22,8
NV-DC/DC-Wandler	Fraron DC1224P50A	3,8
Schaltbox (2x)	-	11
Sicherungskasten (klein)	-	0,1
Sicherungskasten (groß) (3x)	-	0,8
Batterieschalter	-	0,1
Niedervoltkabel	RADOX screened battery cable 30mm^2	1,2
Niedervoltkabel	RADOX screened battery cable 1mm^2	0,7
Gesamt		40,5

Ladesystem (Charging Unit)

Bei der MHP kommen ein CCS-, und Typ-2-Stecker zum Einsatz [44], [45]. Die Länge der Kabel wird mit jeweils fünf Meter angenommen, wobei die Materialzusammensetzung anhand der Datenblätter bestimmt wird [46], [47]. Tabelle 3-13 beinhaltet die Komponenten des Ladesystems.

Tabelle 3-13: Komponenten des Ladesystems

Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
CCS-Stecker	Phoenix Contact EV T2M4CC-DC125A	0,5
CCS-Kabel	Radox 155 battery cable, flexible	6,1
Typ-2-Stecker	DUOSIDA DUO T2 32M 3P	0,3
Typ-2-Kabel	Radox screened multi core cable	2,4
Gesamt		9,3

Gehäuse (Body)

Die Baugruppe Gehäuse besteht aus einer Aluminiumwanne, einem Trägerrahmen und einer Verkleidung. Die Materialzusammensetzung und die Masse entstammen den Angaben von Magna. Tabelle 3-14 zeigt die Komponenten des Gehäuses.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 3-14: Komponenten des Gehäuses

Komponente	Produktbezeichnung	Masse [kg]
Aluminiumwanne	-	96
Trägerrahmen	-	18
Verkleidung	-	36
Gesamt		150

Endmontage

Bei der Endmontage werden die einzelnen Komponenten zur MHP zusammengebaut, wobei nur noch Energiebedarf anfällt welcher abgeschätzt berücksichtigt wird.

3.3.2 Nutzung

Dieser Abschnitt beschreibt alle Prozesse, welche der Nutzung zugeordnet sind. Diese Prozesse, sowie ihre jeweiligen Eigenschaften sind in Abbildung 3-5 dargestellt.

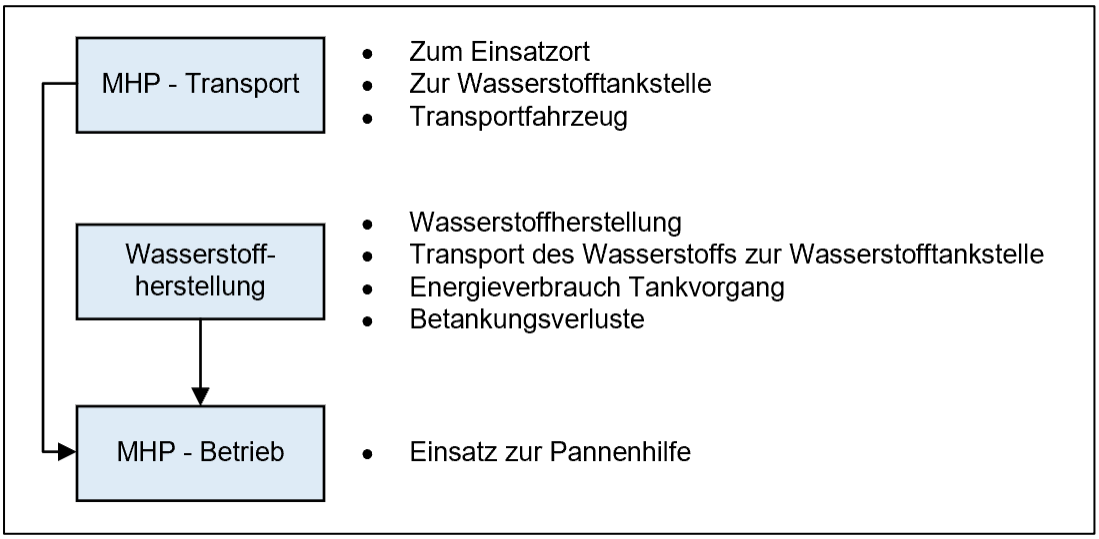

Abbildung 3-5: Detaillierte Darstellung der Prozesse – Nutzung

Für die Bilanzierung werden die Basisannahmen bezüglich der Nutzung nach Tabelle 3-3, und die allgemeinen Annahmen und Einschränkungen nach Abschnitt 3.2.8 herangezogen.

Wasserstoffherstellung

Die Wasserstoffherstellung setzt sich nach dem aktuellen europäischen Mix aus 95% fossilen Energieträgern, und 5% Elektrolyse zusammen. Der Anteil an fossilen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Energieträgern gliedert sich wiederum in 70% Erdgasreformation und 30% Kohlevergasung [48].

Entsprechend der Herstellungsmethode des Wasserstoffs, fallen unterschiedlich hohe CO_2-Äquivalente an, welche in Tabelle 3-15 ersichtlich sind.

Tabelle 3-15: CO_2-Äquivalente möglicher Wasserstoffherstellungsverfahren/Wasserstoffmix

Herstellungsverfahren/Wasserstoffmix	Abkürzung	CO_2-Äquivalent [$kgCO_2e/kgH_2$]
Kohlevergasung	KVG	24,20
Aktueller Wasserstoffmix (EU)	AWM	15,04
Erdgasreformation	EGR	12,13
Elektrolyse aus aktuellem Strommix (AT)	ESM	9,89
Biomassevergasung	BVG	2,67
Elektrolyse aus aktuellem Ökostrom (AT)	EÖS	0,87

Für die CO_2-Äquivalente der Kohlevergasung, Erdgasreformation und Biomassevergasung werden die Ergebnisse aus einer vorhandenen Ökobilanz verwendet [49]. Die CO_2-Äquivalente des aktuellen Wasserstoffmix (EU), der Elektrolyse aus aktuellem Strommix (AT) sowie der Elektrolyse aus aktuellem Ökostrom (AT) werden aus der Datenbank GEMIS 4.9 bezogen. Dabei werden die Anteile des aktuellen Wasserstoffmix (EU) anhand der beschriebenen Verteilung gegliedert. Der für die Elektrolyse aus aktuellem Strommix (AT) und der Elektrolyse aus aktuellem Ökostrom (AT) benötigte Strom wird anhand des aktuellen gesamten Strommix und des aktuellen Ökostrommix von Österreich für das Jahr 2019 angepasst [50], [51]. Diese Anpassung wird dadurch begründet, da bei Bilanzierung noch keine Daten zur Verteilung des aktuellen österreichischen Strommix für das Jahr 2020 vorliegen. In den CO_2-Äquivalenten sind bereits sämtliche Verluste, in Form von Transportwegen des Wasserstoffs zur Tankstelle, des Energieaufwandes des Tankvorganges, sowie Betankungsverluste beinhaltet.

MHP - Betrieb

Nachfolgend wird die Berechnung der benötigten Masse an Wasserstoff für einen Einsatz dargestellt. Anhand dieser Masse wird der Bedarf für die zehnjährige Einsatzdauer errechnet.

In Tabelle 3-16 ist die Berechnung des Systemwirkungsgrades angeführt. Der Berechnung folgt dabei der Systemdarstellung aus Abbildung 3-2. Es wird von einer Ladeleistung von 20 kW nach Tabelle 3-3 ausgegangen. An der Stromverteilereinheit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

wird nach Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Komponenten, welche den Herstellerdatenblättern entstammt eine Leistung zum Laden des BEV von 22,64 kW benötigt [33], [36], [37]. Der Wirkungsgrad des Dreiphasen-Transformator wird mit 99% angenommen [52]. Die Leistungsaufnahme der E/E-Komponenten ist aufgrund der Dauerleistung des HV-NV-DC/DC-Wandlers mit 2,8 kW beschränkt [34]. Nach Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Komponenten, welche den Herstellerdatenblättern entsprechen, wird eine Leistung von 3,69 kW an der Stromverteilereinheit zum Betrieb der E/E-Komponenten benötigt [34], [43]. Daher wird eine Leistung von 26,33 kW an der Stromverteilereinheit benötigt. Nach Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Stromverteilereinheit und des HV-DC/DC-Wandlers nach den Herstellerblättern, und dem Wirkungsgrad der Brennstoffzelle, welcher anhand einer linearen Gleichung aus einer Prüfstandsmessung des IFA gebildet wird, beträgt der Systemwirkungsgrad der MHP 38,5% [33], [53].

Tabelle 3-16: Berechnung des Systemwirkungsgrads

			Wirkungsgrad [1]	Leistung [kW]
Laden des BEV	Komponenten nach der Stromverteilereinheit	Ladeleistung	-	20
		Wirkungsgrad HV-DC/DC-Wandler	0,99	-
		Wirkungsgrad DC/AC-Wandler	0,96	-
		Wirkungsgrad Dreiphasen-Transformator	0,99	-
		Wirkungsgrad AC/DC-Wandler	0,94	-
		Leistung an der Stromverteilereinheit	-	22,64
	Versorgung der Nebenaggregate	Leistungsaufnahme	-	2,8
		Wirkungsgrad HV-NV-DC/DC-Wandler	0,95	-
		Wirkungsgrad NV-DC/DC-Wandler	0,80	-
		Leistung an der Stromverteilereinheit	-	3,69
	Komponenten vor der Stromverteilereinheit	Wirkungsgrad Stromverteilereinheit	0,95	-
		Wirkungsgrad HV-DC/DC-Wandler	0,99	-
		Wirkungsgrad Brennstoffzelle	0,54	-
		Wasserstoff Leistung der Brennstoffzelle	-	51,98
Systemwirkungsgrad			0,385	-

Tabelle 3-17 zeigt die Berechnung der benötigten elektrischen Energie für die Startup und Shutdown Sequenz. Diese wird von der Hochvoltbatterie bereitgestellt, von der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Brennstoffzelle erzeugt und entspricht den Ergebnissen des Berechnungstools des IFA [54]. Nach Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Komponenten, welche den Herstellerdatenblättern entstammen, muss die Brennstoffzelle 0,27 kWh elektrische Energie für die Startup und Shutdown Sequenz erzeugen [53], [33]. Der Wirkungsgrad der Hochvoltbatterie wird mit 95% angenommen [55].

Tabelle 3-17: Berechnung der elektrischen Energie für die Startup und Shutdown Sequenz

		Wirkungsgrad [1]	Elektrische Energie [kWh]
Elektrische Energie für Startup & Shutdown	Benötigte elektrische Energie für SU	-	0,002
	Benötigte elektrische Energie für SD	-	0,12
	Wirkungsgrad Brennstoffzelle	0,54	-
	Wirkungsgrad HV-DC/DC-Wandler	0,99	-
	Wirkungsgrad Stromverteilereinheit	0,95	-
	Wirkungsgrad Hochvoltbatterie	0,95	-
	Wirkungsgrad Stromverteilereinheit	0,95	-
	Wirkungsgrad HV-DC/DC-Wandler	0,99	-
	Elektrische Energie für SU&SD	-	0,27

Tabelle 3-18 zeigt die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades und der benötigten Masse an Wasserstoff pro Einsatz. Aus dem Systemwirkungsgrad nach Tabelle 3-16 und der bereitgestellten elektrischen Energie nach Tabelle 3-3, errechnet sich die benötigte elektrische Energie der Brennstoffzelle zum Laden des BEV. Diese elektrische Energie ergibt zusammen mit der elektrischen Energie, welche für die Startup und Shutdown Sequenz benötigt wird, die gesamte elektrische Energie, welche die Brennstoffzelle bereitstellen muss. Der Gesamtwirkungsgrad der MHP beträgt 37,7%. Für die Bereitstellung der elektrischen Energie für das Wiederaufladen eines BEV wird daher 0,4 kg Wasserstoff benötigt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 3-18: Berechnung des Gesamtwirkungsgrades und der benötigten Masse an Wasserstoff pro Einsatz

	Wirkungs-grad [1]	Elektrische Energie [kWh]	Wasser-stoff [kg]
Elektrische Energie - Laden des BEV	-	13,00	-
Elektrische Energie - SU&SD	-	0,27	-
Gesamte elektrische Energie	-	13,27	-
Gesamtwirkungsgrad	0,377	-	-
Wasserstoff pro Einsatz	-	-	0,40

Damit die Anzahl auf Pannenhilfe angewiesene BEV für die Jahre 2021-2030 bestimmt werden kann, wird der Expertenbericht - Mobilität & Klimaschutz 2030 zum zukünftigen Bestand an BEV in Österreich herangezogen [56]. Bei dieser Prognose wird das Szenario 1: „Technologische Entwicklung“ zur Bilanzierung verwendet. Dieses Szenario folgt bisherigen Trends mit der Berücksichtigung von zu erwartenden zukünftigen Entwicklungen im Bereich der Hybridisierung, Effizienz- und Reichweitensteigerung. Zusätzlich wird von gleichbleibender steuerlicher Behandlung der Antriebsarten, vom vermehrten Einsatz von alternativen Kraftstoffen, aber von einem Auslaufen der Ankaufsförderung für BEV ausgegangen. Für die Wahrscheinlichkeit, dass ein BEV auf Pannenhilfe angewiesen ist, werden die Berichte zu Pannensituationen des ÖAMTC für die Jahre 2016 und 2019 herangezogen [57]. Der darin ausgewiesene jährliche Anstieg an Pannensituationen von 0,63% auf 0,75% wird für die Zukunft linear fortgesetzt. Durch diese Vorgangsweise wird der Anstieg von nicht technikaffinen Anwendern abgedeckt. Die Skalierung auf den Großraum Wiens erfolgt über die Anzahl von Elektroautos der einzelnen Bundesländer [58]. Abbildung 3-6 zeigt diese jährliche zukünftige Anzahl von Pannenhilfen sowie die Ausfallswahrscheinlichkeit. Der Gesamtbedarf an Wasserstoff errechnet sich aus der zukünftigen Anzahl an auf Pannenhilfe angewiesenen BEV und dem Bedarf an Wasserstoff je BEV nach Tabelle 3-18.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

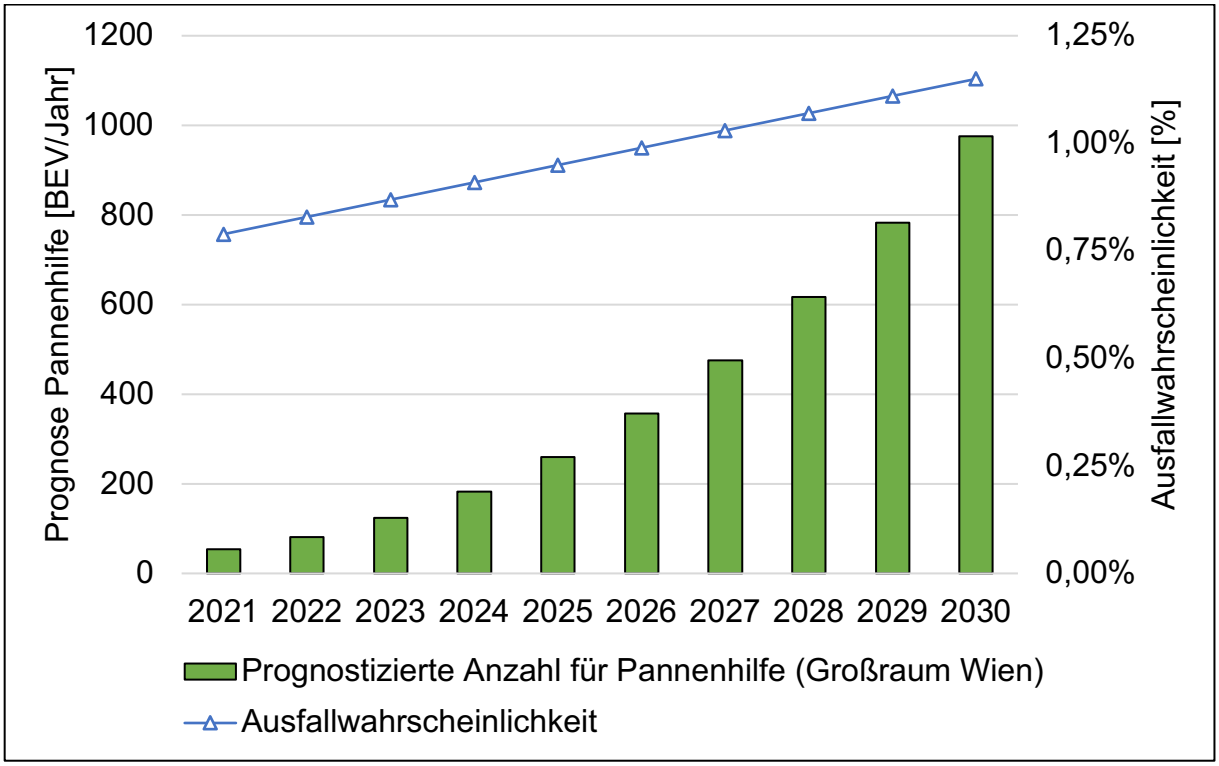

Abbildung 3-6: Prognose zur zukünftigen Pannenhilfe von BEV für den Zeitraum 2021-2030

Abbildung 3-7 zeigt den berechneten jährlichen Bedarf an Wasserstoff, für den Prozess MHP – Betrieb.

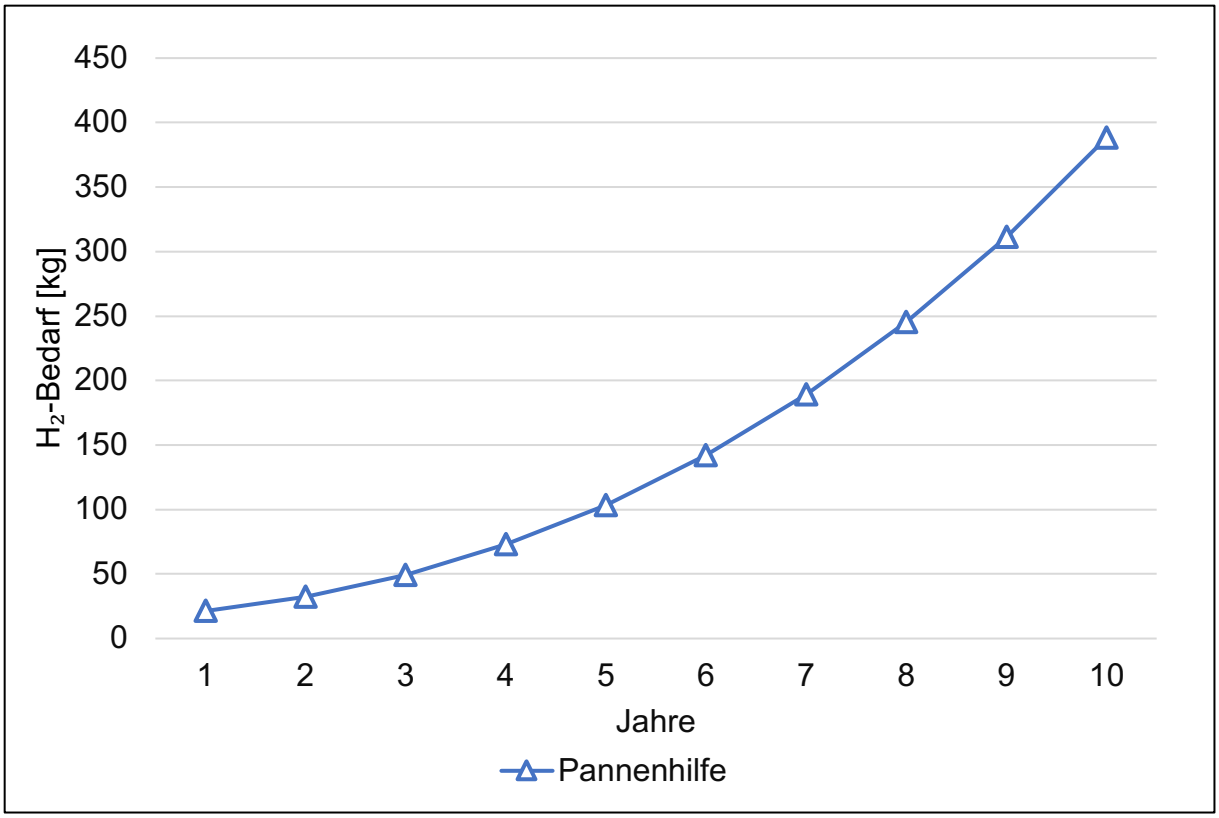

Abbildung 3-7: Jährlicher Bedarf an Wasserstoff der MHP

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Hinsichtlich der steigenden Anzahl an BEV resultiert der Bedarf an Wasserstoff zu einer jährlichen Zunahme von bis zu 6 - 16%. Insgesamt werden 1556,51 kg Wasserstoff für den zehnjährigen Betrieb benötigt.

MHP - Transport

Die Transportdistanzen setzen sich einerseits aus der Distanz vom ÖAMTC-Stützpunkt zum Einsatzstelle, und anderseits aus den Transportwegen zur Wasserstofftankstelle zusammen. Die Häufigkeit der Betankung und damit der Transportweg pro Kilowattstunde elektrischer Energie hängt dabei von der Größe des Wasserstoffspeichers sowie der bereitgestellten elektrischen Energie ab. Je größer der Wasserstoffspeicherbehälter ist, desto seltener muss die Tankstelle angefahren werden. Wenn die MHP mit einer niedrigen Effizienz (höhere Leistung der Brennstoffzelle) betrieben wird, kann mit der gleichen Menge an Wasserstoff weniger elektrische Energie erzeugt werden. Dadurch muss der Wasserstoffspeicher öfter aufgefüllt werden, dies führt zu einer erhöhten Transportdistanz.

Da diese Ökobilanz für den Großraum von Wien angedacht ist, wird die Transportdistanz zum Einsatzstelle, unter Zuhilfenahme der Landesfläche von Wien errechnet [59]. Die Landesfläche wird als Kreis angenommen und der Durchmesser, welcher die Fahrtstrecke zum Einsatzstelle und wieder retour darstellt, ermittelt. Nachdem nur eine MHP untersucht wird, muss diese die gesamte Landesfläche bedienen. Daher beträgt die Fahrstrecke zum Einsatzstelle und wieder retour, 22,98 km.

Für die Betankung wird die größte Strecke von jedem ÖAMTC-Stützpunkt zu einer der beiden Wasserstofftankstellen in Wien und Vösendorf und wieder retour herangezogen, und der Mittelwert gebildet. Dieser beträgt 43,83 km und fällt dann an, wenn der Wasserstoffspeicherbehälter der MHP leer ist.

Für das Laden eines BEV werden nach vorhergehender Berechnung 0,4 kg Wasserstoff benötigt. Daher werden pro vollem Wasserstoffspeicherbehälter 7,61 Einsätze zur Pannenhilfe ermöglicht, bevor der Wasserstoffspeicherbehälter der MHP aufgefüllt werden muss. Dadurch ergibt sich die Transportdistanz pro funktioneller Einheit nach Tabelle 3-19.

Tabelle 3-19: Gesamte Transportdistanz der MHP pro Kilowattstunde elektrischer Energie

Art des Transportes	Transportdistanz [km/kWh$_e$]
Transportdistanz zum Einsatzstelle	4,60
Transportdistanz zur Tankstelle	1,09
Gesamt	5,69

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Für die CO_2-Äquivalente pro Kilometer, welche durch das Transportfahrzeug entstehen wird eine bereits vorhandene Ökobilanz für PKW-basierten Verkehrssystemen herangezogen [60]. Darin sind Ergebnisse für den Betrieb des BEV und des HFCV mit Ökostrom aus Wasser,- Windkraft und Photovaltaik ausgewiesen. Aus diesen Ergebnissen wird der aktuelle Ökostrom anhand der österreichischen Ökostromverteilung für das Jahr 2019 errechnet [51]. Für den Zusatzverbrauch von 37%, welcher durch die Anhängerlast entsteht, werden die Ergebnisse aus einer Untersuchung von beladenen KFZ-Anhängen herangezogen [61]. Tabelle 3-20 beinhaltet die CO_2-Äquivalente pro gefahrenen Kilometer der möglichen Transportfahrzeuge, mit bereits inkludierten Zusatzverbrauch durch das Ziehen des Anhängers.

Tabelle 3-20: CO_2-Äquivalente möglicher Transportfahrzeuge

Transportfahrzeug	Treibstoff	Abkürzung	CO_2-Äquivalent [$kgCO_2e/km$]
Dieselfahrzeug	Diesel	D	0,260
BEV	Aktueller Strommix (AT)	BEVSM	0,121
BEV	Aktueller Ökostrom (AT)	BEVÖS	0,077
HFCV	Aktueller Ökostrom (AT)	HFCVÖS	0,074

Die CO_2-Äquivalente für den Transport der MHP zum Einsatzstelle errechnen sich aus der Multiplikation der Ergebnisse aus Tabelle 3-19 und Tabelle 3-20.

3.3.3 Lebensende

Dieser Abschnitt beschreibt das Lebensende der MHP. Zu diesem zählen die Prozesse Transport zur Recyclingstätte oder Mülldeponie, Recycling, Abfall und Sekundärrohstoffe, welche zusätzlich mit den jeweiligen Eigenschaften in Abbildung 3-8 dargestellt sind.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

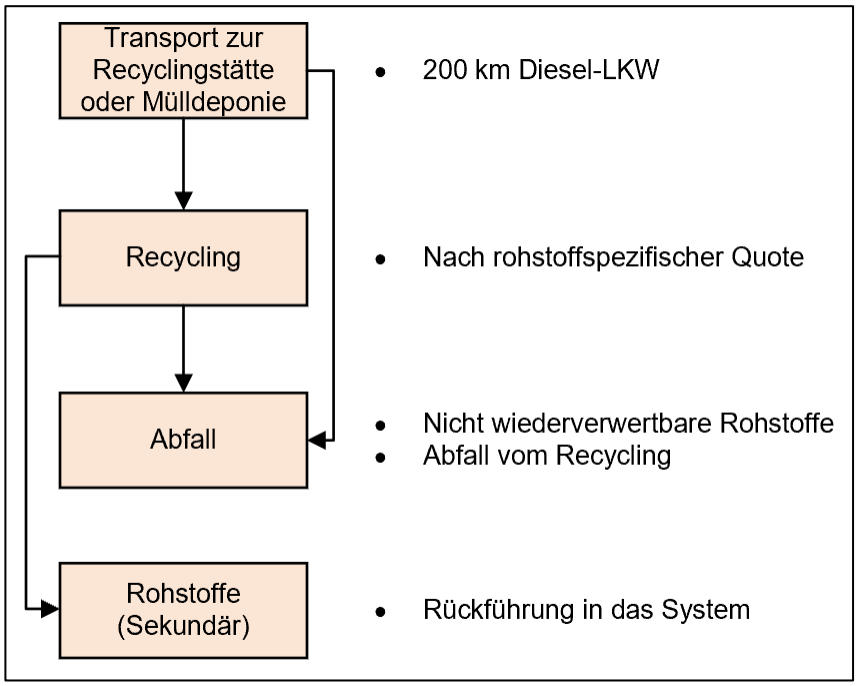

Abbildung 3-8: Detaillierte Darstellung der Prozesse – Lebensende

Für die Bilanzierung werden die Basisannahmen nach Tabelle 3-4, und die Allgemeinen Annahmen und Einschränkungen nach Abschnitt 3.2.8 herangezogen.

Transport

Der Transport, zur Recyclingstätte oder Mülldeponie, erfolgt dabei mit einem Diesel-LKW. Dafür werden Daten aus GEMIS 4.9 für die zukünftige Prognose einer Ökobilanz für Diesel-LKW für das Jahr 2030 herangezogen. Die CO_2-Äquivalente des Transports errechnen sich aus dem Gesamtgewicht der MHP und der angenommenen Transportstrecke von 200 km (Wien-Graz).

Recycling

Für das Recycling werden jene Rohstoffe der MHP herangezogen, welche bezogen auf die Gesamtmasse den größten Anteil aufweisen und durch Wiederverwertung in das System rückführbar sind. Der Anteil der recycelten Rohstoffe, folgt dabei der rohstoffspezifischen Quote welche in Tabelle 3-21 angegeben ist.

Die recycelten Rohstoffe haben nach Tabelle 3-22 einen Gesamtanteil von 74,8% an der Gesamtmasse der MHP.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 3-21: Rohstoffspezifische Recyclingquote und Masse der recycelten Rohstoffe

Rohstoff	Quote	Recycelter Rohstoffanteil MHP [kg]
Aluminium [62]	90%	251,67
Stahl [63]	75%	349,77
Kunststoff [64]	36,6%	43,86
Kupfer [65]	45%	95,38
Blei [66]	45,6%	13,88
Gesamt		754,56

Tabelle 3-22: Massenanteil an recycelten Rohstoffen der MHP

Recycelte Rohstoffe	754,56	[kg]
Nicht recycelte Rohstoffe	254,05	[kg]
Gesamt	1008,61	[kg]

Rohstoffe (Sekundär)

Bei dem für diese Ökobilanz verwendeten „quasi-closed-loop System“, fließen die Gutschriften durch Recycling wieder in das gleiche System zurück.

Die gutgeschriebenen CO_2-Äquivalente errechnen sich dabei aus der Differenz der CO_2-Äquivalente der Primärrohstoffe, und den CO_2-Äquivalenten, welche durch die Erzeugung der Sekundärrohstoffe entstehen. Die Daten bezüglich der Sekundärrohstoffe werden der Datenbank GEMIS 4.9 entnommen und sind in Tabelle 3-23 ersichtlich.

Tabelle 3-23: Gutschrift der CO_2-Äquivalente durch Recycling der berücksichtigten wiederverwertbaren Rohstoffe

Rohstoff	CO_2-Äquivalent Primärrohstoff [$kgCO_2e/kg$]	CO_2-Äquivalent Sekundärrohstoff [$kgCO_2e/kg$]	CO_2-Äquivalent Gutschrift [$kgCO_2e/kg$]
Aluminium	16,21	0,30	15,91
Stahl	1,77	0,47	1,31
Kunststoff	3,04	2,22	0,81
Kupfer	4,87	1,78	3,09
Blei	1,89	0,09	1,80

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abfall

Die Rohstoffe, welche nicht wiederverwertbar sind, und die durch die rohstoffspezifische Quote nicht rückführbare Menge, wird eine Endlagerung auf einer Mülldeponie vorgesehen. Bei diesem Prozess entstehen 1,19 Kilogramm CO_2-Äquivalente pro Kilogramm Abfall. Diese Daten entstammen der Datenbank GEMIS 4.9.

3.4 Wirkungsabschätzung

Die gewählte Wirkungskategorie, der Wirkungsindikator, sowie das Charakterisierungsmodell sind in Abschnitt 3.2.6 angeführt. Die Daten aus der Datenbank GEMIS 4.9 enthalten bereits den Wirkungsindikator. Deshalb entfällt die Wirkungsabschätzung.

3.5 Auswertung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Sachbilanz mit den getroffenen Annahmen und Einschränkungen aus Abschnitt 3.2.8 grafisch aufbereitet und erläutert. Nachfolgend werden die Ergebnisse der drei Phasen des Lebensweges beschrieben.

Die in der Auswertung dargestellten Werte sind auf zwei Nachkommastellen gerundet, die genauen Ergebnisse sind in Anhang B tabellarisch angeführt. Die Phase der Auswertung der MHP ist im LCA-Berechnungstool dokumentiert [14].

3.5.1 Lebensweg

Die CO_2-Äquivalente der einzelnen Abschnitte des Lebensweges, sowie deren prozentueller Anteil an den gesamten CO_2-Äquivalenten ist in Abbildung 3-9 ersichtlich.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

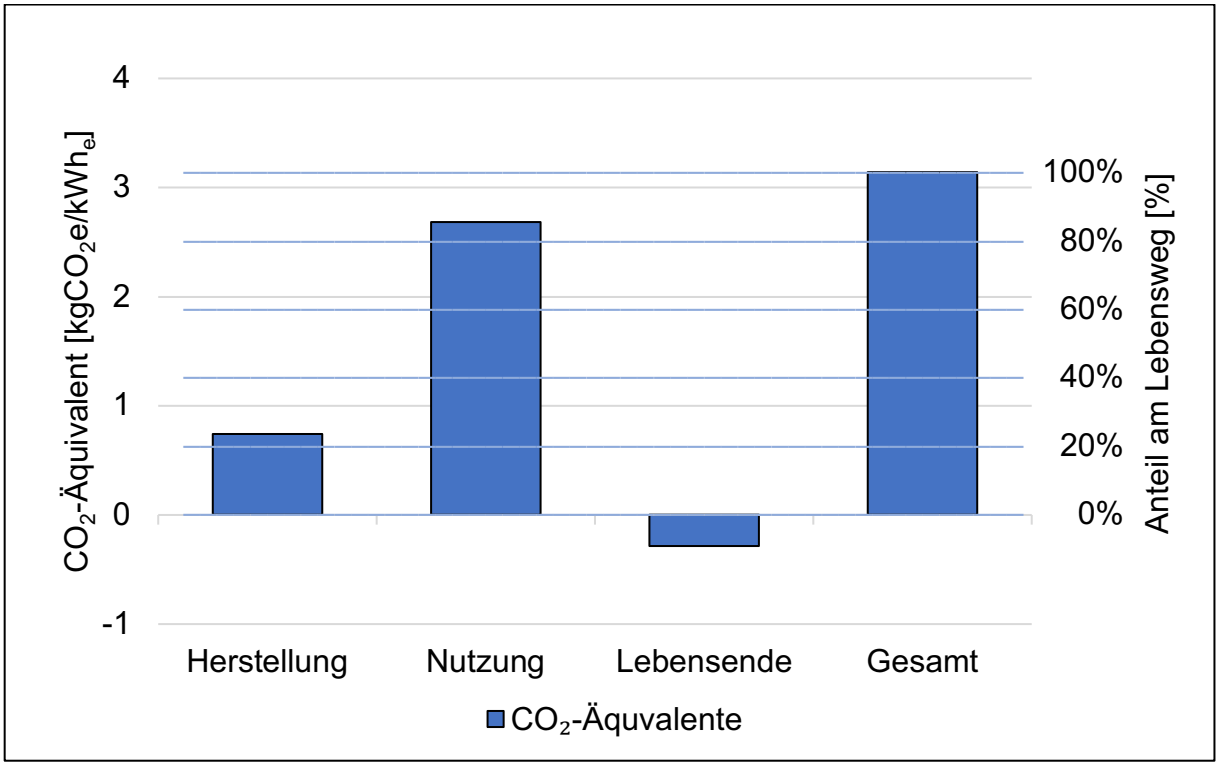

Abbildung 3-9: Erzeugte CO_2-Äquivalente für den Lebensweg der MHP

Während des gesamten Lebensweges entstehen 3,14 $kgCO_2e/kWh_e$. 85,54% der CO_2-Äquivalente bezogen auf die CO_2-Äquivalente des gesamten Lebensweges entstehen in der Phase der Nutzung. Dieser hohe Anteil ist vor allem auf die CO_2-Äquivalente des Transportfahrzeugs und die umweltschädliche Herstellung von Wasserstoff zurückzuführen. Die Möglichkeiten, welche zu einer Reduktion der CO_2-Äquivalente führen werden durch den Einsatz der Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 3.5.8 ersichtlich.

3.5.2 Herstellung

Die CO_2-Äquivalente, welche bei den Prozessen der Herstellung entstehen, sind hinsichtlich des Ursprungs in Rohstoffe (Primär), Energieaufwand, Transport und Verpackung aufgeteilt. Der erzeugten CO_2-Äquivalente, sowie der prozentuelle Anteil dieser Aufteilung zeigt Abbildung 3-10. Dabei werden der Transport der Rohstoffe zur Komponentenherstellung, der Transport der Komponenten zur Endmontage und der Transport zum ÖAMTC-Stützpunkt zu einem einzelnen Transportprozess zusammengefasst.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

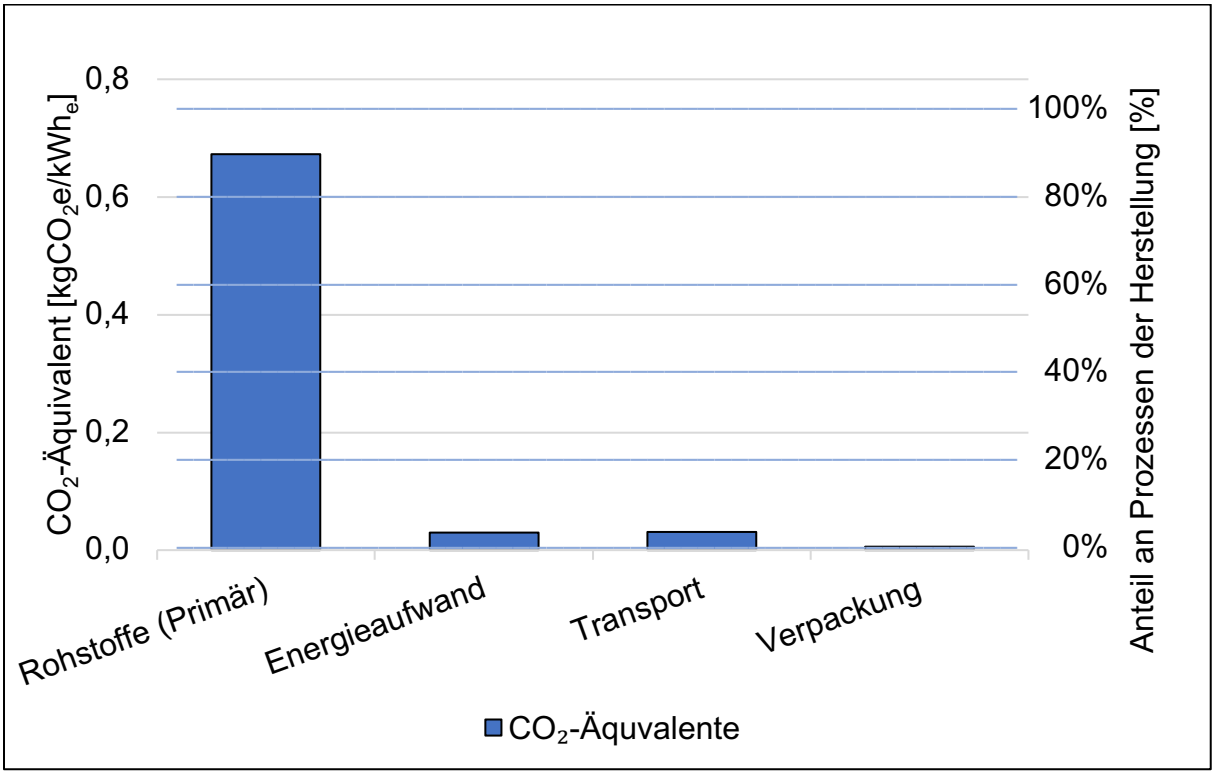

Abbildung 3-10: CO_2-Äquivalente und Gewichtung der Prozesse der Herstellung der MHP

Demnach sind der Großteil der CO_2-Äquivalente aufgrund der eingesetzten Primärrohstoffe zurückzuführen. Die beim Transport entstehenden CO_2-Äquivalente haben aufgrund der geringen Masse der MHP nur einen geringen Einfluss an den gesamten CO_2-Äquivalenten der Herstellung. Selbiges gilt auch für die Verpackung.

Damit eine aussagekräftige Analyse der Baugruppen ermöglicht wird, werden alle CO_2-Äquivalente der Prozesse der Herstellung den jeweiligen Baugruppen zugeteilt. Die Zuteilung ist in Abbildung 3-11 grafisch dargestellt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

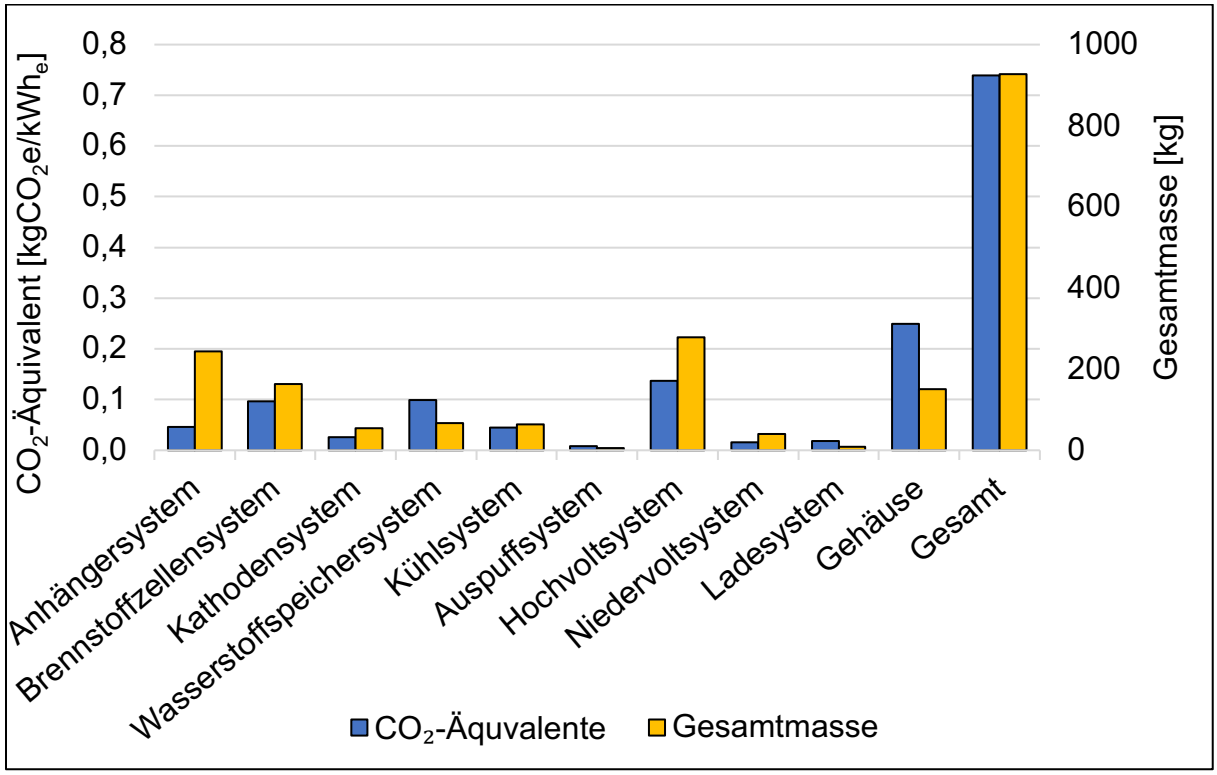

Abbildung 3-11: Erzeugte CO_2-Äquivalente der Prozesse der Herstellung der Baugruppen und Gesamtmasse

Bei der Herstellung entstehen 0,74 $kgCO_2e/kWh_e$. Das Gehäuse hat aufgrund des hohen Anteils von Aluminium und Kohlefaser den größten Anteil an den CO_2-Äquivalenten. Das Anhängersystem hat zwar eine ähnliche Gesamtmasse wie das Hochvoltsystem, jedoch deutlich geringere CO_2-Äquivalente. Dies ist dadurch begründet, da das Anhängersystem im Gegensatz zum Hochvoltsystem über einen hohen Stahlanteil verfügt. 29,78% der CO_2-Äquivalente des Hochvoltsystems sind dabei auf die Herstellung der Hochvoltbatterie zurückzuführen. Dies entspricht 6,08% an den gesamten CO_2-Äquivalenten, welche bei der Herstellung der MHP anfallen. Das Hochvoltsystem besteht hauptsächlich aus Kupfer und Aluminium. Die Herstellung des Rohstoffs Stahl erzeugt geringere CO_2-Äquivalente als die des Kupfers und Aluminiums. Die CO_2-Äquivalente des Brennstoffzellensystems entstehen zu größten Teilen durch die umweltbelastende Herstellung von Platin und Tetrafluorethylen. Das Kathodensystem besteht ähnlich wie das Hochvoltsystem hauptsächlich aus Kupfer und Aluminium. Der hohe Anteil von Kohlefaser führt zwar zu einer geringen Masse des Wasserstoffspeichersystems, jedoch hinsichtlich der umweltschädlichen Herstellung zu hohen CO_2-Äquivalenten. Kohlefaser, Aluminium, Glycerin und Ethylenglycol sind hauptverantwortlich für die CO_2-Äquivalente des Kühlsystems. Das Auspuffsystem, Niedervoltsystem und das Ladesystem, haben nur einen geringen Einfluss an den gesamten CO_2-Äquivalenten der Herstellung, da diese weder über eine hohe Gesamtmasse verfügen noch umweltbelastende Rohstoffe mit der Ausnahme von Blei beinhalten. Blei kommt beim Niedervoltsystem für den Bleiakkumulator zum Einsatz.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.5.3 Einfluss der Rohstoffe

Der Großteil der CO_2-Äquivalente während der Herstellung sind auf die eingesetzten Rohstoffe zurückzuführen. Aus diesem Grund werden jene zehn Rohstoffe, welche einerseits den größten Anteil an der Gesamtmasse der MHP ausmachen, und anderseits die meisten CO_2-Äquivalente erzeugen, genauer analysiert. Abbildung 3-12 zeigt die CO_2-Äquivalente und die Gesamtmasse der unterschiedlichen Rohstoffe für den Prozess Komponentenherstellung. Damit das Potential durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen ersichtlich wird, sind für die Rohstoffe Aluminium, Stahl, Kupfer und Polyethylen die CO_2-Äquivalent-Gutschriften berücksichtigt.

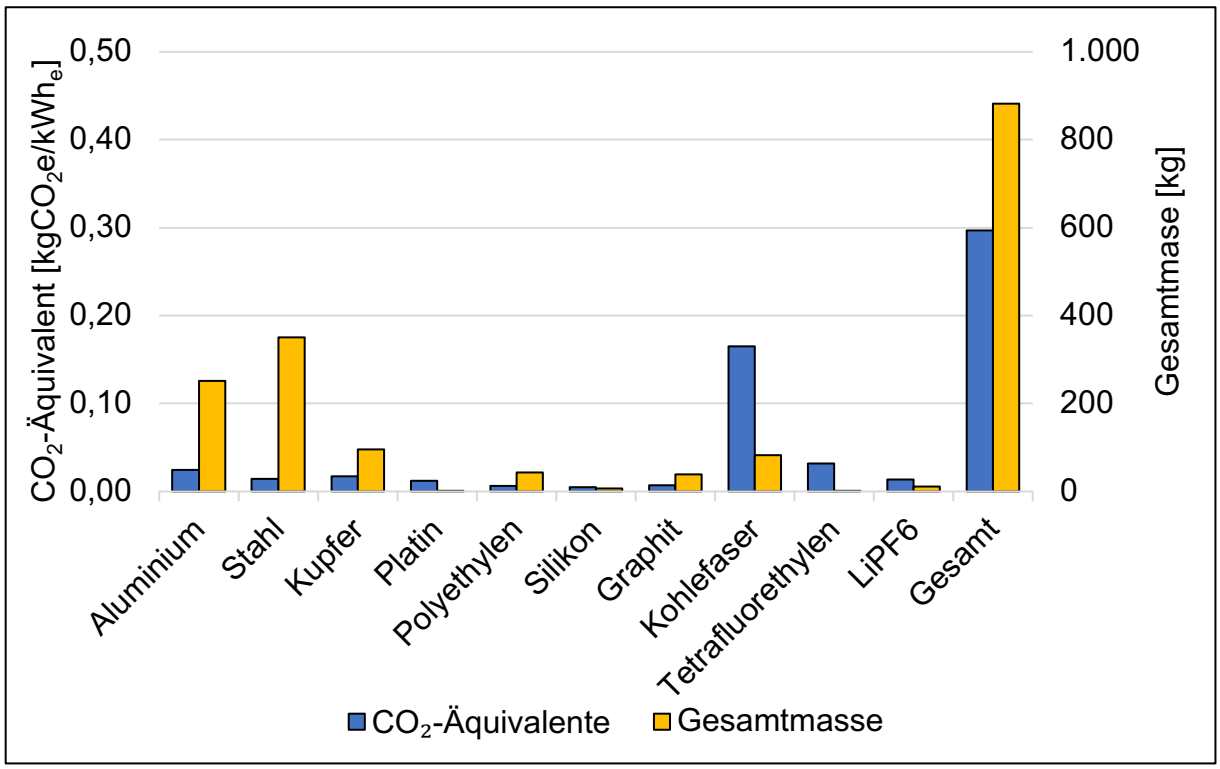

Abbildung 3-12: CO_2-Äquivalente und Gesamtmasse der häufigsten Rohstoffe

Dabei ist ersichtlich, dass Aluminium, Stahl und Kupfer mit einer verbauten Masse von 696,83 kg, nur einen geringen Anteil an den CO_2-Äquivalenten der Herstellung, aufgrund der guten Eigenschaft zur Wiederverwertbarkeit haben. Die recycelten metallischen Rohstoffe haben einen Anteil von 21,23% an den CO_2-Äquivalenten der MHP, welche durch die Rohstoffe entstehen. Der Rohstoff Platin, welcher zu großen Teilen auf die verwendete Katalysatorbeschichtung der Elektrode der Brennstoffzelle entfällt, verfügt über sehr hohe massebezogene CO_2-Äquivalente, welche angesichts einer extrem umweltschädlichen Produktionskette bedingt sind [67]. Die nichtmetallischen Rohstoffe, Polyethylen und Silikon haben sowohl bezogen auf die Masse als auch die CO_2-Äquivalente eine geringe Auswirkung. Graphit, Tetrafluorethylen und Lithiumhexafluorophosphat haben zwar mit 133,85 kg einen geringen Beitrag an der Gesamtmasse der MHP, jedoch aufgrund der umweltschädlichen Produktionskette bei

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

der Herstellung des Rohstoffes, mit 16,51% einen beträchtlichen Anteil an den CO_2-Äquivalenten, welche auf die Rohstoffe zurückzuführen sind [68]. Mit 51,86% verfügt der Rohstoff Kohlefaser mit Abstand über den höchsten Anteil an den CO_2-Äquivalenten der Rohstoffe. Eine mögliche Reduzierung kann durch den Einsatz eines anderen Materials oder, durch die noch im Forschungsstadium befindliche Herstellung von Karbonfasern aus Algenöl erzielt werden [69].

3.5.4 Nutzung

Die Nutzung gliedert sich in die Prozesse MHP - Betrieb, welche die Wasserstoffherstellung beinhaltet, und MHP – Transport.

Abbildung 3-13 zeigt die CO_2-Äquivalente der Nutzungsphase.

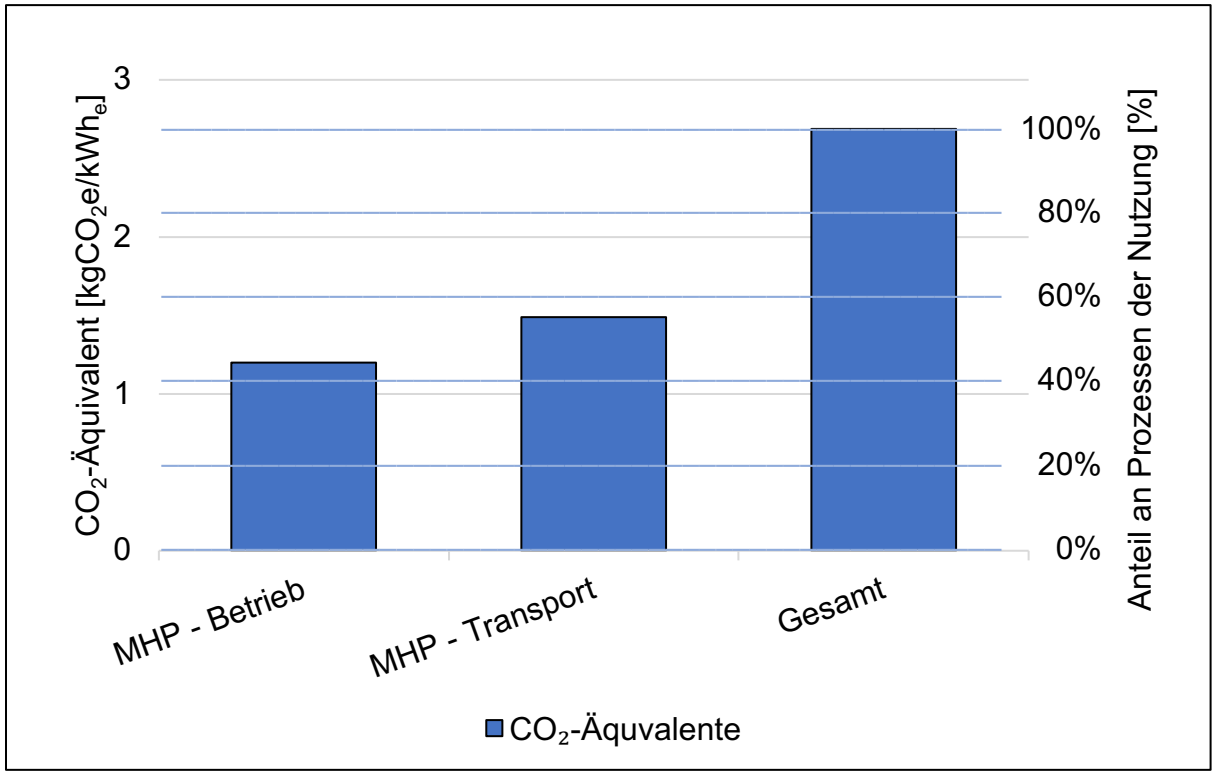

Abbildung 3-13: Erzeugte CO_2-Äquivalente bei der Nutzung der MHP

Insgesamt werden 2,69 kg $kgCO_2e/kWh_e$ erzeugt, wobei 44,57% auf den Prozess MHP – Betrieb, und 55,43% auf MHP – Transport entfallen. Dies zeigt deutlich, dass durch den Prozess MHP – Transport, bei der die MHP nur indirekt beteiligt ist, eine hohe Notwendigkeit zur Reduzierung der CO_2-Äquivalente besteht.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.5.5 Lebensende

Die Phase Lebensende besteht aus den Prozessen Transport, Recycling und Abfall. Die CO_2-Äquivalente dieser Prozesse, sowie die Gutschriften, welche durch das Recycling entstehen, sind in Abbildung 3-14 dargestellt.

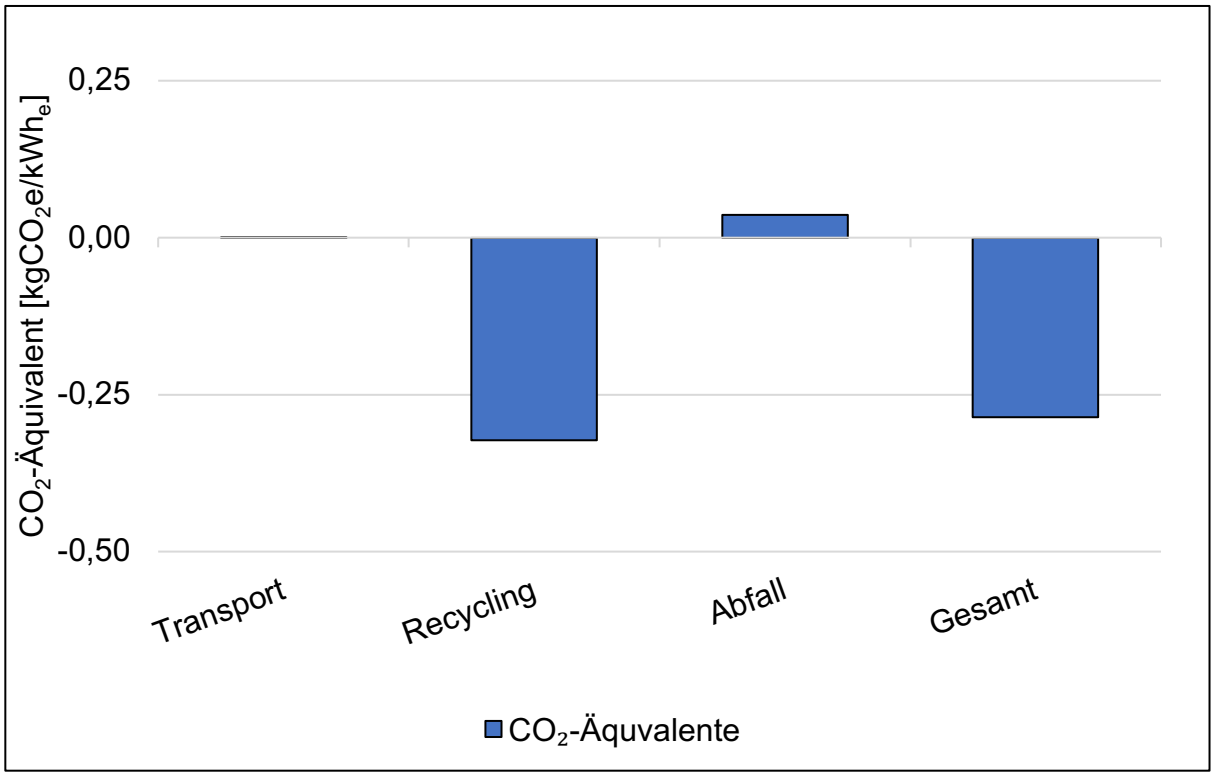

Abbildung 3-14: Erzeugte und gutgeschriebene CO_2-Äquivalente am Lebensende der MHP

Aufgrund der geringen Masse der MHP entstehen beim Transport nur 0,0005 kg $kgCO_2e/kWh_e$. Damit hat der Endtransport, mit 0,17% an den Lebensende-Prozessen nur eine geringe Bedeutung. Hinsichtlich der Recyclingfähigkeit der verbauten Rohstoffe können 0,32 $kgCO_2e/kWh_e$ der Ökobilanz gutgeschrieben werden. Je höher diese Gutschrift ausfällt, desto geringer sind die CO_2-Äquivalente für den kompletten Lebensweg der MHP. Alle nicht wiederverwertbaren Rohstoffe, sowie der nichtrecycelbare Anteil, welcher mit der rohstoffspezifischen Recyclingquote einhergeht, führen zu 0,04 $kgCO_2e/kWh_e$.

Daher ergibt sich eine gesamte Gutschrift von 0,29 $kgCO_2e/kWh_e$ durch das Lebensende der MHP.

3.5.6 Herstellung und Lebensende

Damit eine aussagekräftige Analyse der Baugruppen ermöglicht wird, werden alle CO_2-Äquivalente der Herstellung und des Lebensendes den jeweiligen Baugruppen zugeteilt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Durch die Gegenüberstellung kann das Potential einer Baugruppe hinsichtlich der Recyclingfähigkeit aufgezeigt werden. Dazu werden die CO_2-Äquivalente der Baugruppen übereinander aufgetragen. Dies zeigt Abbildung 3-15.

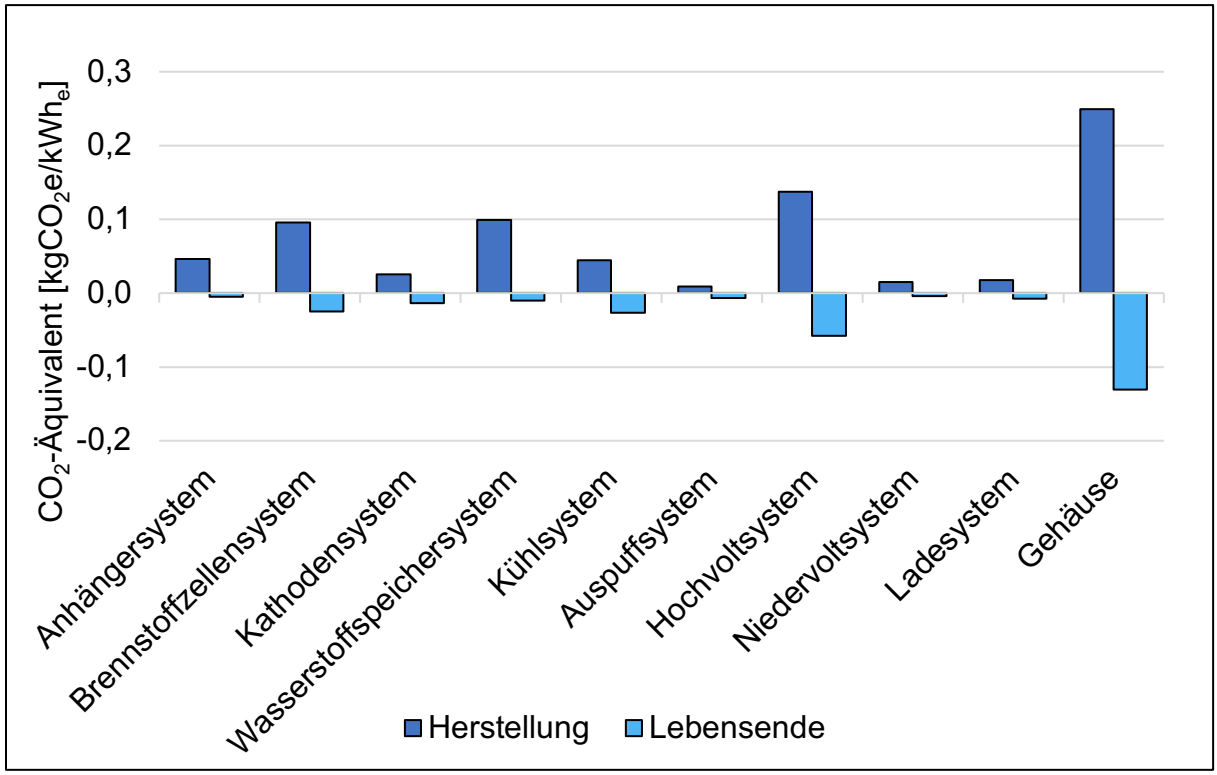

Abbildung 3-15: Erzeugte CO_2-Äquivalente bei der Herstellung und Gutschriften am Lebensende

Insgesamt können die CO_2-Äquivalente der Herstellung durch die Verwendung von recycelten Rohstoffen um 38,6% auf 0,45 $kgCO_2e/kWh_e$ reduziert werden. Vor allem die Baugruppen Gehäuse, Brennstoffzellensystem und Hochvoltsystem weisen über ein hohes Potential zur Reduzierung der CO_2-Äquivalente auf. Dies ist dadurch begründet, da diese größtenteils aus Aluminium, Stahl und Kupfer bestehen, und diese Rohstoffe nach Tabelle 3-23 zu hohen CO2-Äquivalent-Gutschriften führen. Selbiges gilt für das Kühlsystem, welches zu 30% aus Aluminium besteht. Beim Kühlsystem, Ladesystem, Auspuffsystem und Kathodensystem können bis zu Hälfte der CO_2-Äquivalente reduziert werden. Aufgrund des hohen Anteils von Kohlefaser beim Wasserstoffspeichersystem, können die CO_2-Äquivalente nur geringfügig reduziert werden.

3.5.7 Gegenüberstellung MHP und Dieselgenerator

Damit die ökologische Auswirkung der MHP besser beurteilt werden kann, werden die gesamten, während des Lebensweges erzeugten CO_2-Äquivalente, mit jenen eines Dieselgenerators, mit gleicher elektrischer Leistungsabgabe verglichen. Dabei wird für die Herstellung, und die Prozesse am Lebensende eine vorhandene Ökobilanz herangezogen [70]. Zum Vergleich wird der Dieselgenerator *CAT XQ35 28 KW* verwendet. Dieser verfügt über eine ähnliche Ausgangsleistung wie die MHP. Zur

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Bilanzierung des Dieselgenerators wird die Gesamtmasse laut Herstellerdatenblatt von 1003 kg herangezogen [71]. Da dieser Dieselgenerator über keinen Anhänger und keine Ladeschnittstelle verfügt, werden zusätzlich die bilanzierten Baugruppen Anhängersystem und Ladesystem der MHP berücksichtigt. Zur Bilanzierung der Nutzung wird der im Herstellerdatenblatt ausgewiesene durchschnittliche Verbrauch von 6,5 L/h bei 20 kW elektrischer Leistung, mit dem Heizwert von Diesel und einer bestehenden Ökobilanz für Dieselkraftstoffe verwendet [72], [73]. Demnach beträgt der Gesamtwirkungsgrad des Dieselgenerators 30,69%. Für den Transport zur Einsatzstelle wird die Bilanzierung der MHP verwendet. Der Transport zur Tankstelle wird vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass am Weg zur Einsatzstelle eine Möglichkeit zum Tanken besteht. Abbildung 3-16 zeigt die CO_2-Äquivalente der MHP und eines Dieselgenerators.

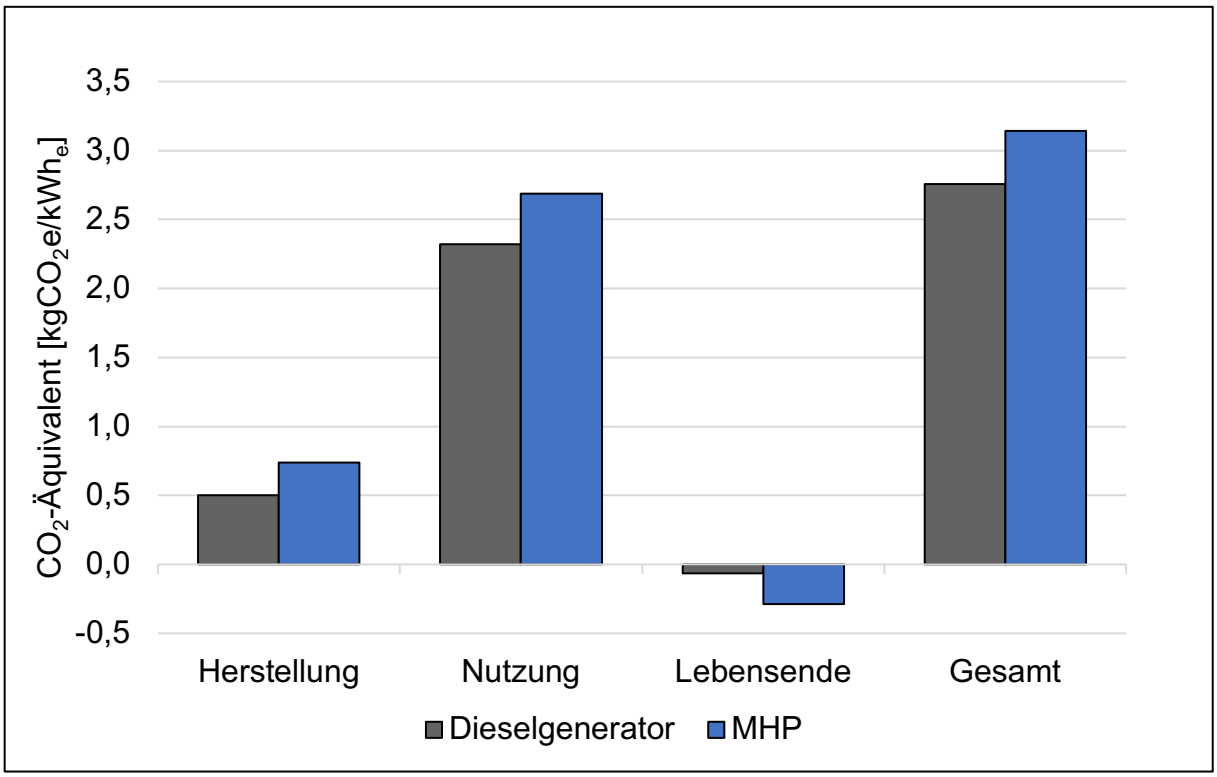

Abbildung 3-16: Gegenüberstellung der CO_2-Äquivalente für den Lebensweg der MHP und einem Dieselgenerator

Die Herstellung der MHP führt zu höheren CO_2-Äquivalenten als die des Dieselgenerators. Dies ist vor allem den umweltschädlichen Rohstoffen, Kohlefaser, Platin und Tetrafluorethylen geschuldet. Bei der Nutzung wird bei beiden das gleiche Transportfahrzeug für den Transport zum Einsatzstelle verwendet. Deshalb unterscheiden sich die CO_2-Äquivalente bei der Nutzung nur durch den Unterschied zwischen Wasserstoff und Diesel. Die Herstellung von Wasserstoff nach aktuellem europäischen Mix ist dabei umweltschädlicher als die von Diesel [48]. Nach der Gutschrift am Lebensende sind die CO_2-Äquivalente des gesamten Lebensweges der MHP um 13,86% höher als die des Dieselgenerators.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.5.8 Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt werden die angenommenen Basisbedingungen für die Herstellung nach Tabelle 3-2, die Nutzung nach Tabelle 3-3, sowie des Lebensendes nach Tabelle 3-4 einer Sensitivitätsanalyse unterzogen.

Nachfolgend werden, all jene Variationen, welche zu einer Veränderung der CO_2-Äquivalente um mehr als 1% führen näher beschrieben. Der Einfluss des Energieaufwandes, der Transportdistanz sowie der Verpackung bei der Herstellung und die Prozesse am Lebensende erreichen diese Hürde nicht und werden nicht weiter beschrieben.

Variation der Rohstoffe bei der Herstellung der MHP

Als Basisbedingungen wird angenommen, dass alle Rohstoffe der rohstoffspezifischen Recyclingquote entsprechen. Zur Überprüfung wird dieser Annahme, der Einsatz von 100% Sekundärrohstoffen, gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung zeigt Abbildung 3-17.

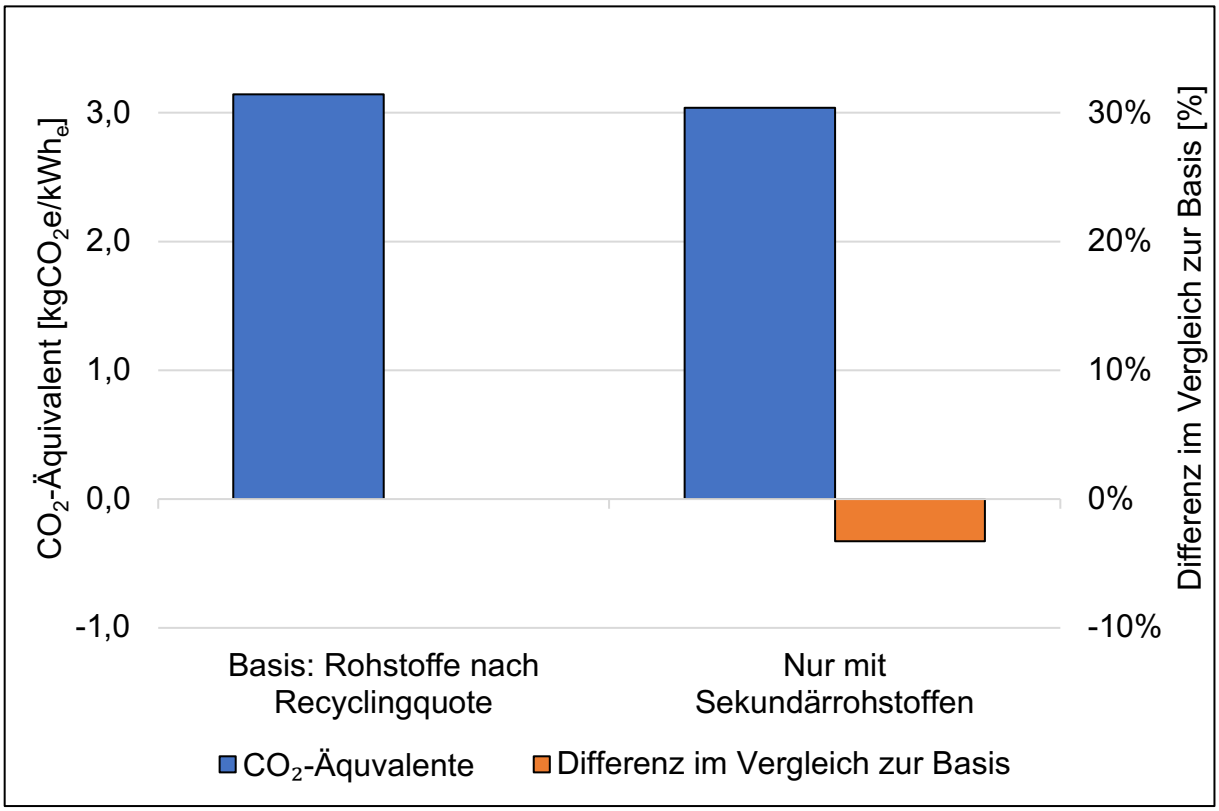

Abbildung 3-17: Variation der Rohstoffe bei der Herstellung der MHP

Wird die MHP nur aus Sekundärrohstoffen hergestellt, verringern sich die gesamten CO_2-Äquivalente in Vergleich zur Basis um 3,3%.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Dieser Unterschied im Vergleich zum Basiswert zeigt, dass das Potential zur Verwendung von recycelten Rohstoffen noch nicht erschöpft ist.

Variation der Wasserstoffherstellung bei der Nutzung der MHP

Der aktuelle europäische Wasserstoffmix, welcher aus einer Kombination aus Kohlevergasung, Erdgasreformation und Elektrolyse besteht, wird als Basisbedingung angenommen. Damit die Auswirkung dieser Annahme hinsichtlich der erzeugten CO_2-Äquivalente für den gesamten Lebensweg sichtbar gemacht wird, werden verschiedene Wasserstoffherstellungsverfahren untersucht. Die CO_2-Äquivalente der MHP, welche durch diverse Wasserstoffherstellungsverfahren entstehen sind in Abbildung 3-18 ersichtlich.

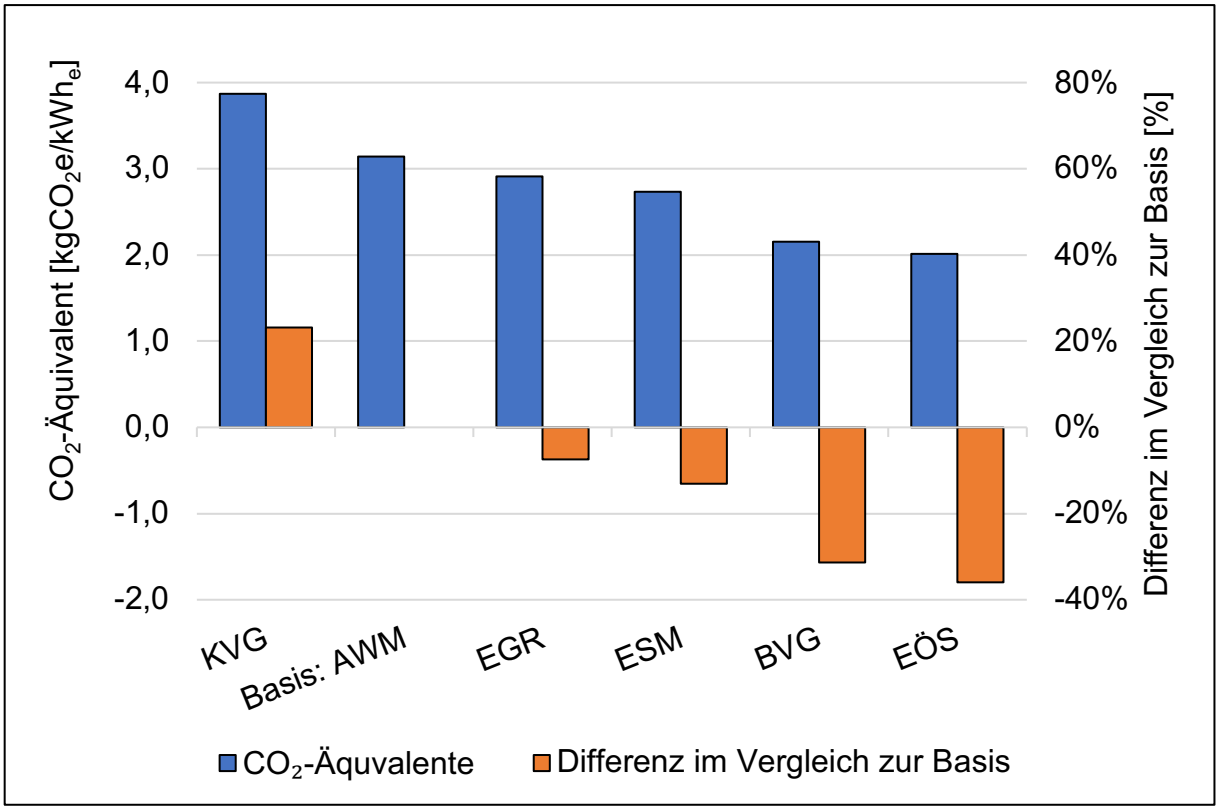

Abbildung 3-18: Variation der Wasserstoffherstellung bei der Nutzung der MHP; (KVG) Kohlevergasung, (AWM) Aktueller Wasserstoffmix (EU), (EGR) Erdgasreformation, (ESM) Elektrolyse aus aktuellem Strommix (AT), (BVG) Biomassevergasung, (EÖS) Elektrolyse aus aktuellem Ökostrom (AT)

Wasserstoff, aus Kohlevergasung stellt aufgrund des hohen Energieaufwands und dem zusätzlichen Freiwerdens von CO_2 bei der Herstellung das am ökologisch belastendste Szenario dar [74]. Dadurch steigen die CO_2-Äquivalente der MHP um 23,24% im Vergleich zum Basiswert. Bei der Verwendung von Wasserstoff aus Erdgasreformation können die CO_2-Äquivalente um 7,37% reduziert werden. Wird Wasserstoff für den Betrieb der MHP verwendet, welcher aus Elektrolyse aus aktuellem österreichischem Strommix hergestellt wird, verringern sich die CO_2-Äquivalente für den gesamten Lebensweg um 13,06%. Bei der Biomassevergasung wird ein nachwachsender Rohstoff,

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

nämlich Abfälle aus Land-, und Forstwirtschaft zur Herstellung des Energieträgers verwendet [75]. Dieser nimmt bereits während des Wachstums CO_2 aus der Atmosphäre auf und führt dadurch zu einer Reduktion der CO_2-Äquivalente der MHP um 31,35%. Das größte Potential zur Reduzierung der CO_2-Äquivalente entsteht bei der Verwendung von durch Elektrolyse aus aktuellem Ökostrom (AT) hergestellten Wasserstoff. In Vergleich zur Basisbedingung verringern sich die CO_2-Äquivalente dabei um 35,90%. Dies ist dadurch begründet, da CO_2-Äquivalente nur noch bei der Bauphase des Kraftwerkes oder der Photovoltaikanlage entstehen. Die Erzeugung des Stroms erfolgt vollkommen emissionsfrei. Bei Elektrolyse aus aktuellem Ökostrom (AT) ergeben sich für den Lebensweg der MHP 2 $kgCO_2e/kWh_e$.

Variation der Transportdistanzen bei der Nutzung der MHP

Die Transportdistanz zum Einsatzstelle und zur Wasserstofftankstelle hat den größten Einfluss auf die CO_2-Äquivalente der MHP. Zur Ermittlung der Auswirkung wird eine Verdopplung, beziehungsweise Halbierung der Transportdistanz durchgeführt und der berechneten Basis gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung ist in Abbildung 3-19 dargestellt.

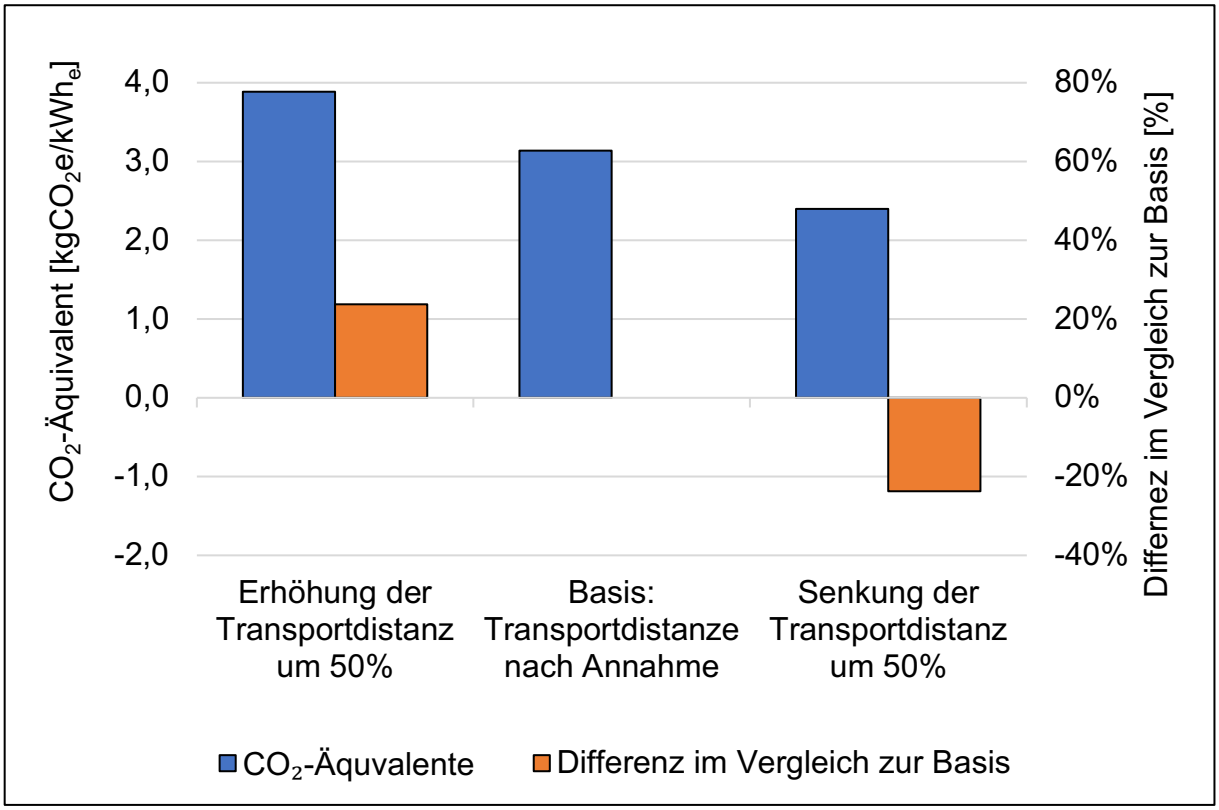

Abbildung 3-19: Variation der Transportdistanzen bei der Nutzung der MHP

Die eben beschriebene Variation der Transportdistanz führt zu einer prozentuellen Veränderung von ± 23,71%.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Variation des Transportfahrzeuges bei der Nutzung der MHP

Nach Abschnitt 3.5.4 und 3.5.1 werden 47,78% der CO_2-Äquivalente des gesamten Lebensweges bei dem Prozess MHP – Transport erzeugt. Daher können große Reduktionen an CO_2-Äquivalenten durch eine Veränderung der Transportmethode erzielt werden. Zur Ermittlung der Auswirkungen wird das nach Abschnitt 3.2.8 gewählte Dieselfahrzeug, mit einem BEV bei gleicher Transportdistanz verglichen. Dabei werden zwei unterschiedliche Arten der Stromerzeugung für das Transportfahrzeug betrachtet. Strom nach aktuellem österreichischem Mix, und aktueller österreichischer Ökostrom. Abbildung 3-20 zeigt die durch Variation der Transportmethode erzeugten CO_2-Äquivalente der MHP.

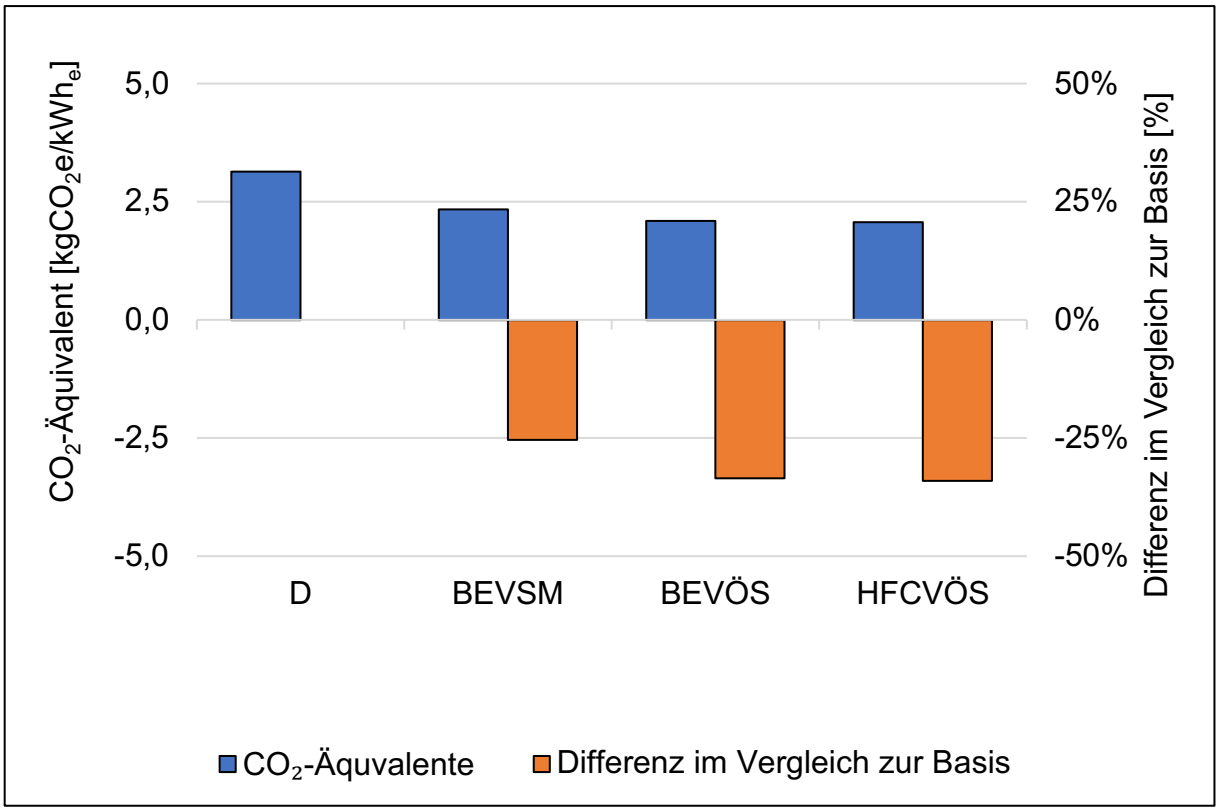

Abbildung 3-20: Variation des Transportfahrzeuges bei der Nutzung der MHP; (D) Dieselfahrzeug, (BEVSM) BEV - Aktueller Strommix (AT), (BEVÖS) BEV - Aktueller Ökostrom (AT), (HFCVÖS) HFCV - Aktueller Ökostrom (AT)

Durch den Einsatz des BEV, welches mit Strom aus aktuellem österreichischem Strommix geladen wird, können 25,45% der CO_2-Äquivalente eingespart werden. Wird dieses Fahrzeug, jedoch mit Ökostrom betrieben, führt dies zu einer Verringerung der CO_2-Äquivalente um 33,45% im Vergleich zu dem mit Diesel betriebenen Basis-PKW. Der geringe Unterschied zwischen den zwei Stromerzeugungsmöglichkeiten besteht darin, dass laut E-Control Statusbericht für das Jahr 2019 bereits mehr als 75% des erzeugten Stroms in Österreich, auf erneuerbare Quellen entfallen [50]. Wird die MHP von einen HFCV zum Einsatzort transportiert, reduzieren sich die CO_2-Äquivalente im

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Vergleich zur Basis um 34,01%. Der zum Betrieb des HFCV benötigte Wasserstoff wird dabei durch Elektrolyse von Ökostrom hergestellt.

Variation der Ladeleistung bei der Nutzung der MHP zur Pannenhilfe

Als Basisbedingungen für die Ladeleistung wird nach Abschnitt 3.2.8 20 kW angenommen. Zur Überprüfung dieser Annahme werden die Ergebnisse der Berechnung aus Abschnitt 3.3.2 bei unterschiedlichen Ladeleistungen betrachtet. Die untersuchten Ladeleistungen, der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle welcher anhand einer linearen Gleichung aus einer Prüfstandsmessung des IFA gebildet wird, sowie der Gesamtwirkungsgrad der MHP nach der Berechnung aus Abschnitt 3.3.2 sind in Tabelle 3-24 ersichtlich [53].

Tabelle 3-24: Wirkungsgrade der Brennstoffzelle und Gesamtwirkungsgrad bei verschiedenen Ladeleistungen

Ladeleistung [kW]	Wirkungsgrad Brennstoffzelle [1]	Gesamtwirkungsgrad [1]
20	0,54	0,3768
15	0,56	0,3770
10	0,59	0,3621
5	0,61	0,3041

Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle steigt mit einer geringeren Ladeleistung. Dies führt zu einem geringeren Verbrauch an Wasserstoff und zu einer geringeren Frequenz der Wiederbefüllung des Wasserstoffspeicherbehälters. Jedoch wird für den Betrieb der MHP eine gleichbleibende Leistung zum Betrieb der Nebenaggregate benötigt. Diese Tatsache bedingt bei geringeren Ladeleistungen, ein schlechteres Verhältnis zwischen der bereitgestellten Ladeleistung und der Leistung der Brennstoffzelle und führt zu einem geringeren Gesamtwirkungsgrad.

Abbildung 3-21 zeigt die CO_2-Äquivalente je nach Ladeleistung in Vergleich zur gewählten Basis.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

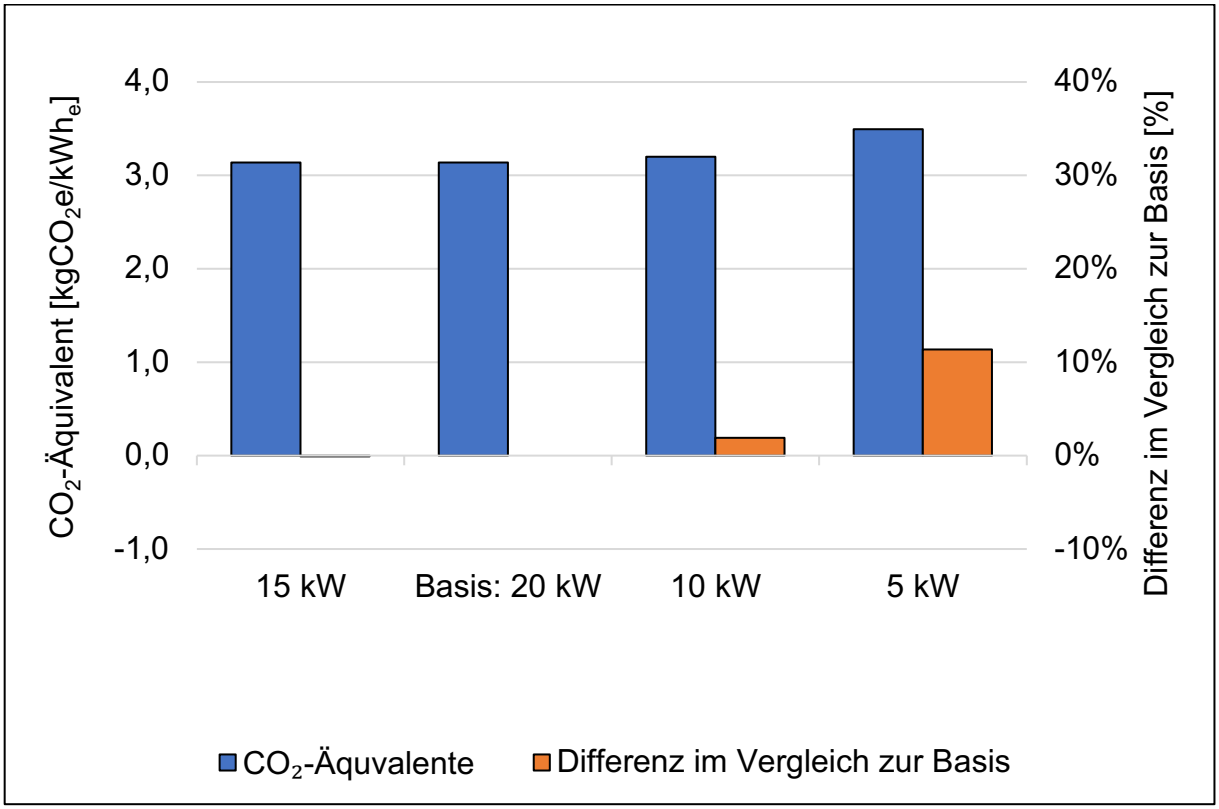

Abbildung 3-21: Variation der Ladeleistung bei der Nutzung der MHP zur Pannenhilfe

Wird die MHP bei 10 kW betrieben, steigen sich die CO_2-Äquivalente um 1,93%. Bei 5 kW werden 11,35% mehr CO_2-Äquivalente erzeugt. Die geringsten CO_2-Äquivalente entstehen bei 15 kW. Dabei werden 0,03% weniger CO_2-Äquivalente als im Vergleich zur Basisannahme erzeugt.

Variation unterschiedlicher Nutzungsmöglichkeiten der MHP

Abschließend kann durch eine Kombination verschiedener Betriebsmöglichkeiten das Zukunftspotential der MHP im Vergleich zu einem Dieselgenerator aufgezeigt werden. Abbildung 3-22 zeigt die verschieden Betriebsmöglichkeiten der MHP hinsichtlich der Wasserstoffherstellung und des Transportfahrzeugs.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

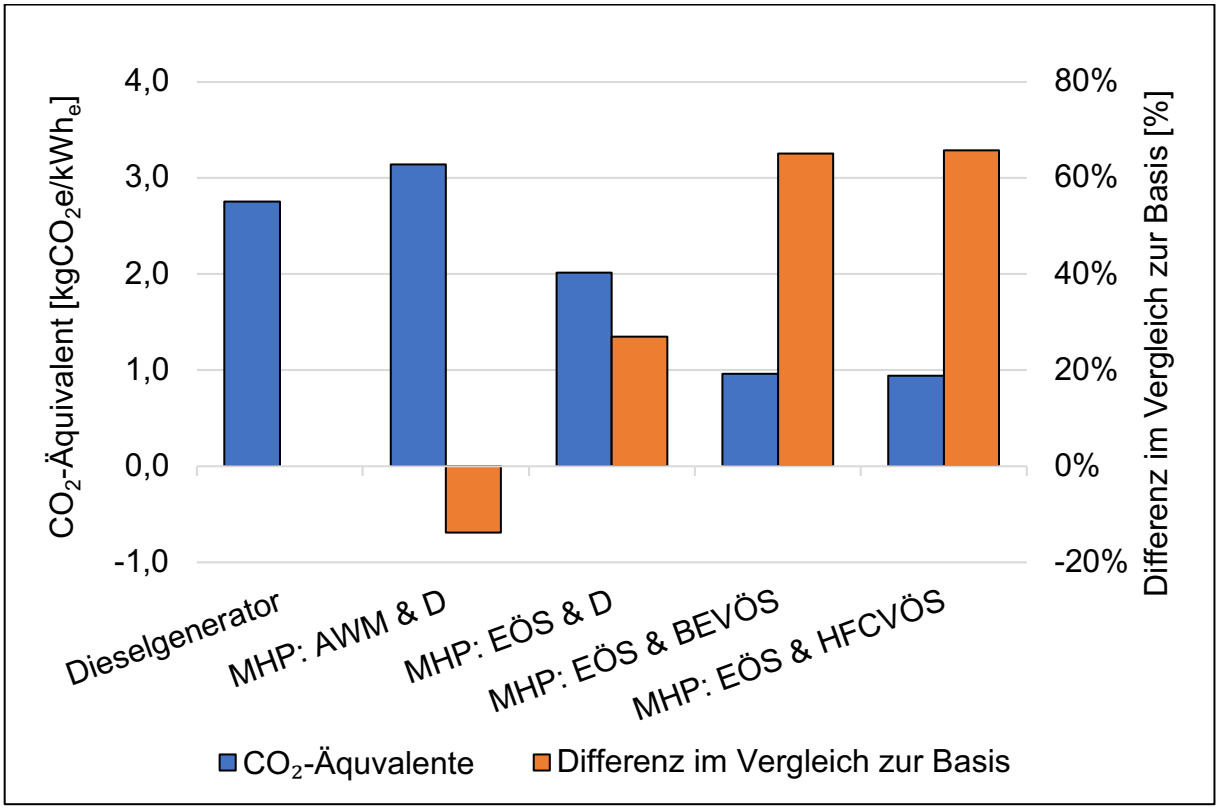

Abbildung 3-22: Vergleich der unterschiedlichen Möglichkeiten zum Betrieb der MHP und Einsparungen zum Dieselgenerator; (AWM) Aktueller Wasserstoffmix (AT), (EÖS) Elektrolyse aus aktuellem Ökostrom (AT), (D) Dieselfahrzeug, (BEVSM) BEV – Aktueller Strommix (AT), (BEVÖS) BEV - Aktueller Ökostrom (AT)

Wird die MHP mit Wasserstoff, nach aktuellem europäischem Mix betrieben (AWM) und mittels Dieselfahrzeug (D) zum Einsatzstelle transportiert, werden 13,86% mehr CO_2e/kWh_e im Vergleich zum Dieselgenerator erzeugt. Bei einer Umstellung auf Wasserstoff, welcher durch Elektrolyse aus erneuerbaren Energiequellen (EÖS) hergestellt wird, verringern sich die CO_2-Äquivalente um 27,02% im Vergleich zum Dieselgenerator. Wird anstelle des Dieselfahrzeugs, ein BEV welches mit Strom aus aktuellem österreichischem Ökostrom (BEVÖS) geladen wird zum Transport verwendet, werden bei gleichem Wasserstoffherstellungsverfahren (EÖS) 60,11% weniger CO_2-Äquivalente als beim Dieselgenerator erzeugt. Die geringsten CO_2-Äquivalente entstehen, wenn sowohl der Wasserstoff für den Betrieb der MHP, als auch für den Betrieb des HFCV zum Transport der MHP aus Elektrolyse aus aktuellem österreichischem Ökostrom stammt. Dabei reduzieren sich die CO_2-Äquivalente um 65,74% im Vergleich zum Dieselgenerator.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde zuerst ein Überblick über die Grundlagen einer Ökobilanz gegeben. Dabei wurde vor allem auf den Zweck sowie den Aufbau der jeweiligen Bestandteile eingegangen. Anhand dieser Methodik wurde eine Ökobilanz der MHP, in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 durchgeführt und die Ergebnisse dieser Analyse mit einem Dieselgenerator verglichen.

Bei der Durchführung dieser Ökobilanz, welche den vier Phasen, Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung nach DIN EN ISO 14040 folgt, wurde der Lebensweg der MHP analysiert, und der Frage nachgegangen, wie hoch die erzeugten CO_2-Äquivalente für den gesamten Lebensweg sind.

Dabei wurde zuerst das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt, und der Lebensweg in drei Phasen unterteilt. Diese charakterisieren die Herstellung, die Nutzung und das Lebensende der MHP. Neben der funktionellen Einheit, für welche in dieser Untersuchung eine Kilowattstunde elektrische Energie dient, wurden das Ziel der Ökobilanz, die Funktion des Produktsystems, das angewendete Allokationsverfahren, das Abschneidekriterium, die Methode der Wirkungsabschätzung, die Anforderung an die Daten sowie die Annahmen und Einschränkungen definiert. Anhand dieser Definitionen wurde die darauffolgende Sachbilanz, bei welcher die einzelnen Prozesse der drei Phasen des Lebensweges erfasst und hinsichtlich des gewählten Wirkungsindikators bilanziert werden, aufgebaut. Durch die Bilanzierung der Sachbilanz in Form des Wirkungsindikators wurde ein Wegfallen der Phase der Wirkungsabschätzung ermöglicht. Zuletzt wurden die Lebenswegphasen bezogen auf die funktionelle Einheit ausgewertet, die Annahmen einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, der Einfluss der Rohstoffe beurteilt, sowie die Ergebnisse der MHP einem Dieselgenerator gegenübergestellt.

Bei Basisannahmen werden 3,14 $kgCO_2e/kWh_e$ erzeugt. Dabei entfallen 85,54% der emittierten CO_2-Äquivalente auf die Phase der Nutzung. Bei der Herstellung der MHP entstehen 23,56% der CO_2-Äquivalente, wobei diese zu 90,96% den Rohstoffen zuzuordnen sind. Dabei hat der Rohstoff Kohlefaser mit 51,39% den größten Anteil an den CO_2-Äquivalenten der Herstellungsphase. Durch das Recycling am Lebensende der MHP reduzieren sich die CO_2-Äquivalente des Lebensweges um 9,09%.

Die Überprüfungen, welche im Rahmen der Sensitivitätsanalyse durchgeführt wurden, zeigen, dass vor allem bei dem verwendeten Wasserstoffherstellungsverfahren und der Transportmethode der MHP zum Einsatzstelle, ein enormes Potential zur Reduzierung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

der CO_2-Äquivalente besteht. Demnach reduzieren sich die CO_2-Äquivalente um 35,38% bei Verwendung von Wasserstoff, welcher mit Elektrolyse aus österreichischem Ökostrom hergestellt wird. Wird für den Transport der MHP ein BEV, welches mit Ökostrom betrieben wird, verwendet, reduzieren sich zusätzlich die CO_2-Äquivalente um 33,95%.

Vor allem die Gegenüberstellung mit einem Dieselgenerator, zeigt die ökologischen Potentiale der MHP. Abbildung 4-1 zeigt die verschieden Betriebsmöglichkeiten der MHP hinsichtlich der Wasserstoffherstellung und des Transportfahrzeugs.

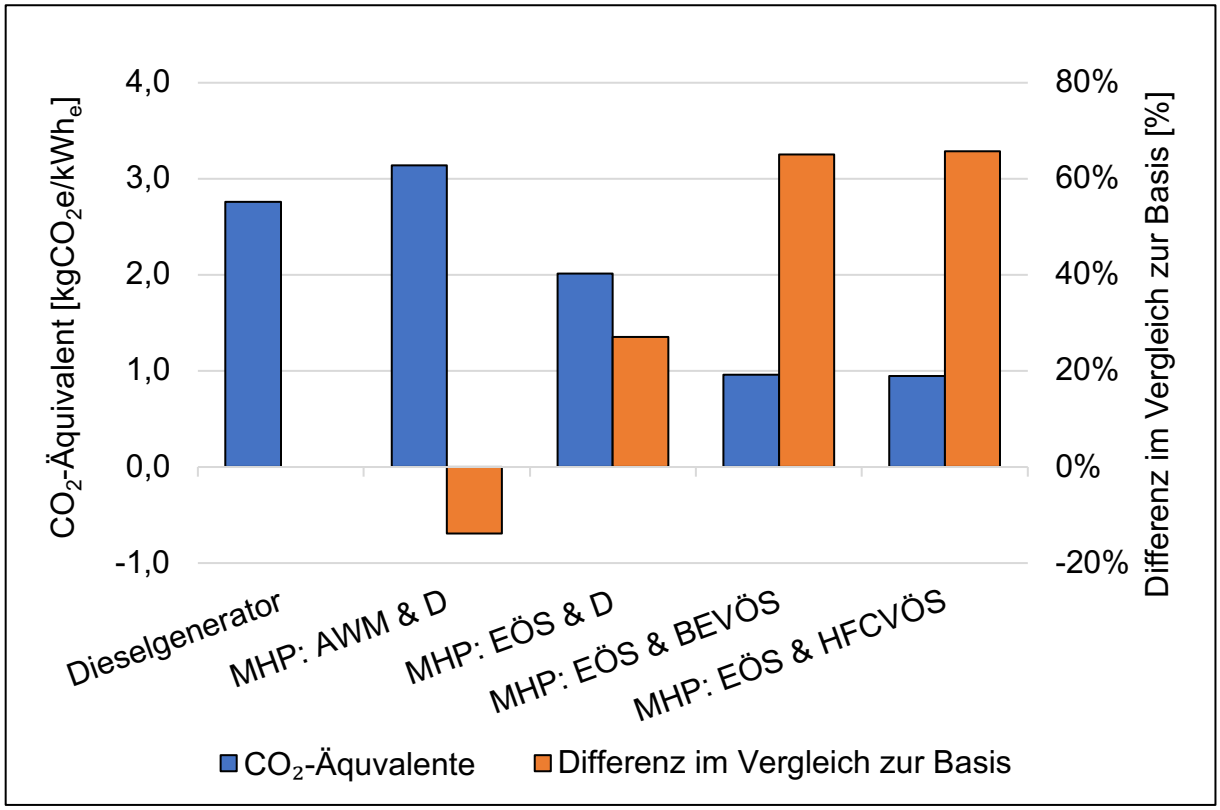

Abbildung 4-1: Vergleich der unterschiedlichen Möglichkeiten zum Betrieb der MHP und Einsparungen zum Dieselgenerator; (AWM) Aktueller Wasserstoffmix (AT), (EÖS) Elektrolyse aus aktuellem Ökostrom (AT), (D) Dieselfahrzeug, (BEVSM) BEV – Aktueller Strommix (AT), (BEVÖS) BEV - Aktueller Ökostrom (AT)

Das ökologische Potential der MHP zeigt sich dadurch, dass bei Verwendung von Wasserstoff für den Betrieb der MHP und des HFCV, welcher aus Elektrolyse aus Ökostrom hergestellt wird, die CO_2-Äquivalente im Vergleich zu einem Dieselgenerator um 65,74% geringer sind. Daher bietet der Einsatz der MHP eine umweltgerechte Alternative zur Pannenhilfe liegengebliebener BEV aufgrund einer entladenen Hochvoltbatterie.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Literaturverzeichnis

[1] W. Klöpffer und B. Grahl, *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Wiley, ISBN: 978-3-527-32043-1, 2009.

[2] R. Frischknecht, *Lehrbuch der Ökobilanzierung*, 1st ed. 2020., Nr. ISBN 9783662547632. Berlin Heidelberg: Berlin : Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer Spektrum, ISBN: 3-662-54763-5, 2020.

[3] J. A. Fava *u. a.*, „SETAC Workshop Report: A Technical Framework for Life Cycle Assessments“, SETAC, Washington, DC, Smugglers Notch, Vermont, Jänner 1991.

[4] S. Schmitz und I. Paulini, *Bewertung in Ökobilanzen - Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043*. Umweltbundesamt, 1999.

[5] „DIN EN ISO 14044 - Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018“. 2018.

[6] „DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006“. 2018.

[7] J. B. [Hrsg.] Guinée, *Handbook on life cycle assessment : operational guide to the ISO standards*, Nr. ISBN 1402005571. Dordrecht [u.a.] : Kluwer Acad. Publ., ISBN: 1-4020-0557-1, 2002.

[8] G. Förtsch, *Handbuch Betriebliches Umweltmanagement*, 3. Aufl. 2018., Nr. ISBN 9783658191511. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden : Imprint: Springer Vieweg, ISBN: 3-658-19151-1, 2018.

[9] „IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.“

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[10] M. Kaltschmitt und L. Schebek, *Umweltbewertung für Ingenieure: Methoden und Verfahren*, 2015. Aufl., Nr. ISBN: 9783642369889. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-642-36988-9.

[11] A.-O. Bernt, „20201210_Statuspräsentation_Project_MHP_Klima_Energiefonds_BAX01“. (Projektinternes Dokument) Bereitgestellt von Magna, Dezember 2020.

[12] S. Wappelhorst, M. Sauer, D. Hinkeldein, A. Bocherding, und T. Glaß, „Potential of Electric Carsharing in Urban and Rural Areas“, *Transportation Research Procedia*, Bd. 4, Dez. 2014, doi: 10.1016/j.trpro.2014.11.028.

[13] O. Schwedes, B. Sternkopf, und A. Rammert, „Fahrverbote oder Mobilitätsmanagement“, Zeitschrift für Ökologie, Politik und Bewegung, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Rammert/publication/327155907_Fahrverbote_oder_Mobilitatsmanagement/links/5b7d46d792851c1e1226c7c7/Fahrverbote-oder-Mobilitaetsmanagement.pdf, Zugriff am: 01.02.2021.

[14] R. J. Sanz, „Ökobilanz_MHP“. (Projektinternes Dokument) Berechnungsdatei zur Diplomarbeit von Robin Julian Sanz am Institut für Fahrzeugantriebe & Automobiltechnik der Technischen Universität Wien, 08.03.2021.

[15] S. Krömer, E. Kreipe, D. Reichenbach, und R. Stark, „Produkt - Ökobilanz eines PKW-Reifens“. Continental AG, Juli 1999, [Online]. Verfügbar unter: http://www.dgengineering.de/download/open/Studie_Continental_Oekobilanz.pdf, Zugriff am : 12.08.2020.

[16] „Datenblatt: Brennstoffzelle - FCveloCity®-MD30“. Ballard Power Systems, Inc., Okt. 2018, [Online]. Verfügbar unter: https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcvelocitymd.pdf?sfvrsn=ebc380_2, Zugriff am 27.07.2020.

[17] A. Simons und C. Bauer, „A life-cycle perspective on automotive fuel cells“, *Applied Energy*, Bd. 157, März 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.049.

[18] A. Nordelöf, M. Alatalo, und M. L. Söderman, „A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part I: design and composition“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 24, Nr. 1, S. 78–92, Jan. 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1503-3.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[19] A. Nordelöf, „A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part II: manufacturing processes“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 24, Nr. 4, S. 694–711, Apr. 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1491-3.

[20] „Datenblatt: Silikonschlauch - Silikonkühlerschlauch“. Matzen & Timm GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://shop.haberkorn.com/schlaeuche-armaturen/dampfschlaeuche-heisswasserschlaeuche/kuehlerschlaeuche/kuehlerschlaeuche/50442-silikonkuehlerschlauch/4?l=3, Zugriff am: 15.08.2020.

[21] „Datenblatt: Silikonschlauch - Silikonschlauch-Bogen 45°“. Matzen & Timm GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://shop.haberkorn.com/schlaeuche-armaturen/dampfschlaeuche-heisswasserschlaeuche/kuehlerschlaeuche/kuehlerschlaeuche/884833-silikonschlauch-bogen-45/1?f%5Bmanu%5D%5B0%5D=Matzen+%26+Timm, Zugriff am: 15.08.2020.

[22] „Datenblatt: Wasserstoffspeicherbehälter - HYDROGEN STORAGE AND TRANSPORTATION SYSTEMS - TYPE 4 HYDROGEN CYLINDERS“. Hexagon Composites Group, Feb. 2018, [Online]. Verfügbar unter: https://www.hexagonxperion.com/fileadmin/user_upload/xperion_Energy___Environment/Datenblaetter_-_xperion_EE/Hexagon_xperion_Datenblaetter/Hydrogen-Solutions-flyer-February-2018.pdf, Zugriff am: 27.07.2020.

[23] T. Q. Hua *u. a.*, „Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 36, Nr. 4, S. 3037–3049, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.090.

[24] „Datenblatt: Kühlmittelpumpe - Pierburg CWA-100.2“. PIERBURG GMBH, [Online]. Verfügbar unter: https://www.tecomotive.com/download/datasheets/CWA100_EN.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[25] „Datenblatt: Kühlmittelbehälter - MANN+HUMMEL Kühlmittelausgleichsbehälter Die modulare MCR-Produktreihe“. MANN+HUMMEL, [Online]. Verfügbar unter: https://www.birner.at/wp-content/uploads/industrie/industriefiltration/mann-hummel/HP-MANNHUMMEL-Kühlmittelausgleichsbehälter-modulrae-MCR-Produktreihe.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

[26] „Datenblatt: Lüfter - Spal Automotive VA164-ABL805HT/R-116A“. Spal Automotive, [Online]. Verfügbar unter: https://www.spalautomotive.it/documents/20182/35726/LEAFLET+VA164+12V.pdf/215fe4ba-7b1c-4318-8111-ef51843ab102, Zugriff am: 14.12.2020.

[27] „Datenblatt: Kühlflüssigkeit - Eurolub Kühlerfrostschutz ANF“. EUROLUB GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://media.autoteile-direkt.at/products/data-sheets/EL820005/Produktdatenblatt/datenblatt_0003491_1_1.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

[28] „Datenblatt: Kühlflüssigkeit - Glysantin FC G 20-00/50“. BASF SE, [Online]. Verfügbar unter: https://cdn.website-editor.net/61024071e2e048f499c0dc27deb2b46a/files/uploaded/Glysantin%2520FC%2520G%252020-00_50%2520TI_EVO_1656_e%2520January%25202016.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

[29] „Datenblatt: Lüfter - Spal Automotive VA116-ABL505P-105A“. Spal Automotive, [Online]. Verfügbar unter: https://www.spal-vertrieb.de/wp-content/uploads/2020/03/VA116-ABL505P-105A.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

[30] „Datenblatt: Silikonschlauch - Silikonschlauch-Bogen 90°“. Matzen & Timm GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://shop.haberkorn.com/schlaeuche-armaturen/dampfschlaeuche-heisswasserschlaeuche/kuehlerschlaeuche/kuehlerschlaeuche/870683-silikonschlauch-bogen-90/2?f%5Bmanu%5D%5B0%5D=Matzen+%26+Timm&l=3, Zugriff am: 14.12.2020.

[31] „Datenblatt: Hochvoltbatterie - Samsung Radix P2-80 - BR253 E28“. (Projektinternes Dokument) Bereitgestellt vom IFA, TU Wien, September 2020.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[32] Y. Liang *u. a.*, „Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions“, *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 117, S. 285–293, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.08.028.

[33] „Datenblatt: Stromverteilereinheit - Brusa PDU 254“. BRUSA Elektronik (München) GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://www.brusa.biz/_files/drive/05_Sales/Datasheets/BRUSA_DB_EN_PDU254.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

[34] „Datenblatt: DC/DC-Wandler - Brusa BDC546-B06“. BRUSA Elektronik (München) GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://www.brusa.biz/_files/bsc/BDC546/Customer_data/2_Manuals/BDC546_Manual_DE.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

[35] „Datenblatt: DC/DC-Wandler - Brusa BSC623-12V“. BRUSA Elektronik (München) GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://www.brusa.biz/_files/bsc/BSC6/Customer_data/1_Manuals/BSC623-12V_Manual_de.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

[36] „Datenblatt: DC/AC-Wandler - KEB Combivert T6 APD“. KEB Automation KG, [Online]. Verfügbar unter: https://www.keb.de/elektromobilitaet/t6-apd-das-modulare-wechselrichtersystem, Zugriff am: 14.12.2020.

[37] „Datenblatt: AC/DC-Wandler - Brusa NLG664“. BRUSA Elektronik (München) GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenblätter/BRUSA_DB_EN_NLG664.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

[38] „Datenblatt: Regler - Phoenix EV-PLCC-AC1-DC1“. PHOENIX CONTACT GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://www.phoenixcontact.com/online/portal/at?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=1624130&library=atde&tab=1, Zugriff am: 14.12.2020.

[39] „Datenblatt: Dreiphasen-Transformator - Riedel DRUF 21500“. Michael Riedel Transformatorenbau GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://www.riedel-trafobau.de/qfcp_data/images/Dreiphasen-Transformatoren/DRUF/druf.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[40] „Datenblatt: HV-Kabel - RADOX screened battery cable“. Huber+Suhner AG, [Online]. Verfügbar unter: https://www.hubersuhner.com/en/solutions/automotive/products/battery-cables/radox-screened, Zugriff am: 14.12.2020.

[41] „Datenblatt: Bleiakkumulator - Varta Silver Dynamic AGM F21“. Varta AG, [Online]. Verfügbar unter: https://www.varta-automotive.com/de-at/produkte/varta-silver-dynamic-agm/580-901-080, Zugriff am: 14.12.2020.

[42] M. Díaz-Ramírez, V. Ferreira, T. Garcia-Armingol, A. López-Sabirón, und G. Ferreira Ferreira, „Environmental Assessment of Electrochemical Energy Storage Device Manufacturing to Identify Drivers for Attaining Goals of Sustainable Materials 4.0“, *Sustainability*, Bd. 12, S. 342, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12010342.

[43] „Datenblatt: DC/DC-Wandler - Fraron DC1224P50A“. FraRon electronic GmbH, [Online]. Verfügbar unter: http://www.fraron.de/downloads/bda/DC1224P50A.pdf, Zugriff am: 14.12.2020.

[44] „Datenblatt: CCS-Stecker - Phoenix Contact EV T2M4CC-DC125A“. PHOENIX CONTACT Deutschland GmbH, [Online]. Verfügbar unter: https://www.phoenixcontact.com/online/portal/de?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=1409060&library=dede&tab=1, Zugriff am: 14.12.2020.

[45] „Datenblatt: Typ-2-Stecker - DUO T2 32M 3P DUOSIDA-Ladestecker, Typ“. DUOSIDA, [Online]. Verfügbar unter: https://www.reichelt.at/at/de/duosida-ladestecker-typ-2-32a-3p-maennlich-duo-t2-32m-3p-p243037.html?r=1, Zugriff am: 14.12.2020.

[46] „Datenblatt: CCS-Kabel - Radox 155 battery cable, flexible“. Huber+Suhner AG, [Online]. Verfügbar unter: https://hubersuhner.com/en/products/low-and-high-voltage/signal-power-cables/battery-cables/radox-155-single-core, Zugriff am: 14.12.2020.

[47] „Datenblatt: Typ-2-Kabel - Radox screened multi core cable“. Huber+Suhner AG, [Online]. Verfügbar unter: https://hubersuhner.com/en/products/low-and-high-voltage/signal-power-cables/battery-cables/radox-screened-multi-core, Zugriff am: 14.12.2020.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[48] M. Klell, H. Eichlseder, und A. Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik : Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4., Aktualisierte und Erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-20446-4, 2018.

[49] A. Mehmeti, A. Angelis-Dimakis, G. Arampatzis, S. McPhail, und S. Ulgiati, „Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies“, *Environments*, Bd. 5, Feb. 2018, doi: 10.3390/environments5020024.

[50] „Statistikbroschüre 2019“, Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft (E-Control), Wien, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/Statbro_deutsch_FINAL.pdf/19cfa4f2-e95b-cae5-22a7-d76479c0bfde?t=1571731897631, Zugriff am: 14.11.2020.

[51] „Ökostrombericht 2019“, Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft (E-Control), Wien, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/Ökostrombericht_FINAL.pdf/f689b909-2088-77b0-0c9e-eeb260effe7b?t=1569999423109, Zugriff am 14.11.2020.

[52] „Elektrische Energietechnik (S8803)“. TU Clausthal, [Online]. Verfügbar unter: https://www.iee.tu-clausthal.de/fileadmin/downloads/Scripte/S8803K3.pdf, Zugriff am: 28.02.2021.

[53] „Prüfstandsmessung - Brennstoffzellensystem“. (Projektinterne E-Mail) Bereitgestellt vom IFA, TU Wien, November 2020.

[54] „20191113_MHP_AP32_IFA_Energiebilanz_Gesamtsystem_CS06.xlsm“. (Projektinternes Dokument) Bereitgestellt vom IFA, TU Wien, 12.11.2019.

[55] M. Doppelbauer, *Grundlagen der Elektromobilität: Technik, Praxis, Energie und Umwelt*, Nr. ISBN: 3658297298. Wiesbaden: Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN: 3-658-29729-8.

[56] „Expertenbericht - Mobilität & Klimaschutz 2030“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oeamtc.at/ÖAMTC+Expertenbericht+Mobilität+%26+Klimaschutz+2030+Web.pdf/25.789.593, Zugriff am 05.11.2020.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[57] „Mobile Aufladung von Elektrofahrzeugen“. (Projektinternes Dokument) Bereitgestellt von ÖAMTC, 2019.

[58] „Anzahl der Elektroautos in Österreich nach Bundesländern von 2017 bis 2019“. Statistik Austria, 2020, [Online]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/689053/umfrage/elektro-pkw-in-oesterreich-nach-bundeslaendern/, Zugriff am 10.11.2020.

[59] „Statistisches Jahrbuch 2011. 37.01 Gliederung Österreichs in NUTS-Einheiten“. Statistik Austria, Jänner 2010, [Online]. Verfügbar unter: http://www.statistik.at/web_de/static/k37_054436.pdf, Zugriff am: 10.10.2020.

[60] G. Jungmeier, L. Canella, J. Pucker-Singer, und M. Beermann, „Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen“, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Graz, Sep. 2019.

[61] G. Fontaras, N.-G. Zacharof, und B. Ciuffo, „Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions“, *Progress in Energy and Combustion Science*, Bd. 60, S. 97–131, Mai 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2016.12.004.

[62] „RECYCLING ALUMINIUM - A PATHWAY TO A SUSTAINABLE ECONOMY“, European Aluminium, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://european-aluminium.eu/media/1712/ea_recycling-brochure-2016.pdf, Zugriff am: 19.09.2020.

[63] M. Hiebel und J. Nühlen, „Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott (Zukunft Stahlschrott)“, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Onlinefassung der Kurzstudie im Auftrag der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV), Oberhausen, Nov. 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bdsv.org/fileadmin/service/publikationen/Studie_Fraunhofer_Umsicht.pdf, Zugriff am: 19.09.2020.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[64] „Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich, Statusbericht 2020 (Referenzjahr 2018)“, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, März 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:04ca87f4-fd7f-4f16-81ec-57fca79354a0/BAWP_Statusbericht_2020.pdf, Zugriff am: 10.10.2020.

[65] „Recycling von Kupferwerkstoffen“, Deutsches Kupferinstitut, Auskunfts- und Beratungsstelle für die Verwendung von Kuper- und Kupferlegierungen, Düsseldorf, Okt. 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2019/10/Recycling-von-Kupferwerkstoffen-final.pdf, Zugriff am: 12.10.2020.

[66] „GRS - Batterien Erfolgskontrolle 2018“, Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien, Hamburg, Apr. 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.grs-batterien.de/fileadmin/Downloads/Erfolgskontrollen/GRS_Batterien_Erfolgskontrolle_2018.pdf, zugriff am: 12.10.2020.

[67] F. [Hrsg.] Zereini, *Emissionen von Platinmetallen : Analytik, Umwelt- und Gesundheitsrelevanz*, Nr. ISBN 3540649824. Berlin [u.a.]: Berlin [u.a.] : Springer, ISBN: 3-540-64982-4, 1999.

[68] H. [Begründer des W. Domininghaus und P. [Hrsg.] Eyerer, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, 6., neu Bearb. und erw. Aufl.., Nr. ISBN 3540214100. Berlin [u.a.]: Berlin [u.a.] : Springer, ISBN: 3-540-21410-0, 2005.

[69] U. Arnold, T. Brück, A. De Palmenaer, und K. Kuse, „Carbon Capture and Sustainable Utilization by Algal Polyacrylonitrile Fiber Production: Process Design, Techno-Economic Analysis, and Climate Related Aspects“, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Bd. 57, Nr. 23, S. 7922–7933, Juni 2018, doi: 10.1021/acs.iecr.7b04828.

[70] A. Bondesson, „Comparative LCA model on renewable power solutions for off-grid radio base stations“. Master These am Royal Institute of Technology, Stockholm 2010.

[71] „Produktspezifikationen XQ35 28 KW (35 KVA)“. Caterpillar, [Online]. Verfügbar unter: https://www.cat.com/de_DE/products/new/power-systems/electric-power/mobile-generator-sets/1000021970.html, Zugriff am: 12.09.2020.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[72] H. Tschöke, K. Mollenhauer, und R. Maier, *Handbuch Dieselmotoren*, 4. Aufl. 2018. Wiesbaden: Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden : Imprint: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-07696-2, 2018.

[73] E. Tan, Y. Zhang, D. Schuetzle, und M. Caldwell, „Life-Cycle Assessment of Diesel Fuel and Reformulated Gasoline Blendstock Production from Natural Gas and Biomass to Liquids Conversion Processes“. Nov. 18, 2014, [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/267347967_375102_Life-Cycle_Assessment_of_Diesel_Fuel_and_Reformulated_Gasoline_Blendstock_Production_from_Natural_Gas_and_Biomass_to_Liquids_Conversion_Processes, Zugriff am: 21.11.2020.

[74] H.-G. Franck, *Kohleveredlung : Chemie und Technologie*, Nr. ISBN 3540096272. Berlin [u.a.] : Springer, ISBN: 3-540-09627-2, 1979.

[75] M. Kaltschmitt, H. Hartmann, und H. Hofbauer, *Energie Aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*, Nr. ISBN: 3662474379. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, ISBN: 3-662-47437-9, 2016.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Anhang A: Materialzusammensetzung der Komponenten

Die in den nachfolgenden Tabellen ausgewiesene Masse wird auf eine Nachkommerstelle gerundet dargestellt.

Tabelle A-1: Materialzusammensetzung – Anhängersystem; (1) Anhängergestell, (2) Felge, (3) Reifen, (4) Kotflügel

Material	(1) [kg]	(2) [kg]	(3) [kg]	(4) [kg]
Kohlefaser	-	-	-	4,4
Stahl	215	24	-	-
Gesamt	215	24	-	4,4

Tabelle A-2: Materialzusammensetzung – Brennstoffzellensystem; (1) Brennstoffzelle, (2) Frostschutzmantel, (3) Trägerrahmen

Material	(1) [kg]	(2) [kg]	(3) [kg]
Tetrafluorethylen	0,8	-	-
Kohlefaser	2,1	-	-
Russ	0,1	-	-
Platin	0,01	-	-
Ethylenglycol	5,7	-	-
Graphit	4,9	-	-
Phenoplast	9,9	-	-
Aluminium	5,8	-	10
Edelstahl	3,2	-	-
Stahl	44,4	-	-
Polyethylen	1,8	2,9	-
Polyphenylensulfid	8,4	-	-
Gummi	1,5	-	-
Kupfer	-	11,4	-
Schwefelsäure	0,3	-	-
Destilliertes Wasser	0,01	-	-
Glaswollen Isolierung	-	14,3	-
Gesamt	88,92	28,6	10

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle A-3: Materialzusammensetzung – Kathodensystem; (1) Kompressor, (2) Kompressor-Regler, (3) Luftfilter, (4) Trägerrahmen, (5) Silikonschläuche

Material	(1) [kg]	(2) [kg]	(3) [kg]	(4) [kg]	(5) [kg]
Aluminium	-	1,2	-	10	-
Stahl	18,5	0,1	-	-	-
Polyethylen	3,7	0,0	1	-	-
Polyphenylensulfid	-	0,0	-	-	-
Glasfaser	-	0,0	-	-	-
Aluminiumoxid	-	0,0	-	-	-
Kupfer	14,8	0,1	-	-	-
Polypropylen	-	0,0	-	-	-
Zinn	-	0,0	-	-	-
Zink	-	0,0	-	-	-
Polyurethan	-	0,0	-	-	-
Lack	-	0,0	-	-	-
Messing	-	0,1	-	-	-
Silikon	-	0,0	-	-	1,2
Papier	-	-	4	-	-
Gesamt	37	1,5	5	10	1,2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle A-4: : Materialzusammensetzung – Wasserstoffspeichersystem; (1) Wasserstoffspeicherbehälter, (2) Trägerrahmen

Material	(1) [kg]	(2) [kg]
Kohlefaser	39,5	-
Aluminium	3,5	7,5
Edelstahl	7,1	-
Polyethylen	4,1	-
Schaum (PVC)	2,4	-
Glasfaser	2,4	-
Gesamt	59	7,5

Tabelle A-5: : Materialzusammensetzung – Kühlsystem; (1) HV-Kühlmittelpumpe, (2) HV-Silikonschläuche, (3) HV-Kühlmittelbehälter, (4) HV-Wärmeübertrager, (5) HV-Lüfter, (6) HV-Kühlflüssigkeit, (7) BZ-Wärmeübertrager, (8) BZ-Lüfter, (9) BZ-Kühlmittelbehälter, (10) BZ-Silikonschläuche, (11) BZ-Kühlflüssigkeit, (12) G-Lüftergehäuse, (13) G-Lüfter

Material	(1) [kg]	(2) [kg]	(3) [kg]	(4) [kg]	(5) [kg]	(6) [kg]	(7) [kg]	(8) [kg]	(9) [kg]	(10) [kg]	(11) [kg]	(12) [kg]	(13) [kg]
Kohlefaser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	-
Ethylenglycol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2	-	-
Aluminium	0,6	-	0,7	4,8	1,2	-	12,6	1,2	0,9	-	-	-	0,3
Stahl	0,2	-	-	-	1,2	-	-	1,2	-	-	-	-	0,3
Polyethylen	0,1	-	-	-	7,0	-	-	7,0	-	-	-	-	1,7
Kupfer	0,2	-	-	-	2,3	-	-	2,3	-	-	-	-	0,6
Destilliertes Wasser	-	-	-	-	-	2,7	-	-	-	-	3,4	-	-
Silikon	-	1,7	-	-	-	-	-	-	-	2,1	-	-	-
Glycerin	-	-	-	-	-	1,8	-	-	-	-	-	-	-
Gesamt	1,0	1,7	0,7	4,8	11,6	4,5	12,6	11,6	0,9	2,1	6,6	1,0	2,8

Tabelle A-6: : Materialzusammensetzung – Auspuffsystem; (1) Aluminiumrohre, (2) Silikonschläuche

Material	(1) [kg]	(2) [kg]
Aluminium	5	-
Silikon	-	1,1
Gesamt	5	1,1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tabelle A-7: Materialzusammensetzung – Hochvoltsystem; (1) Hochvoltbatterie, (2) HV-DC/DC-Wandler, (3) Stromverteilereinheit, (4) AC/DC-Wandler, (5) DC/AC-Wandler, (6) Laderegler, (7) HV-NV-DC/DC-Wandler, (8) Dreiphasen-Transformator, (9) Hochvoltkabel, (10) Trägerrahmen

Material	(1) [kg]	(2) [kg]	(3) [kg]	(4) [kg]	(5) [kg]	(6) [kg]	(7) [kg]	(8) [kg]	(9) [kg]	(10) [kg]
Russ	13,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Graphit	34,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminium	11,3	23,7	2,2	22,2	2,7	0,5	3,6	-	-	5,0
Stahl	12,1	1,2	0,1	1,1	0,1	0,0	0,2	28,7	-	-
Polyethylen	0,1	2,0	0,1	0,7	1,3	0,0	0,0	0,5	-	-
Polyphenylensulfid	-	0,4	0,0	0,4	0,0	0,0	0,1	-	-	-
Glasfaser	-	0,3	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1	-	-	-
Aluminiumoxid	-	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-
Kupfer	0,5	12,7	0,7	4,3	3,6	0,0	0,2	19,4	3,8	-
Polypropylen	-	2,9	0,1	1,0	1,9	0,0	0,0	-	-	-
Zinn	-	0,3	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	-	-	-
Zink	-	0,7	0,0	0,2	0,5	0,0	0,0	-	-	-
Polyurethan	-	1,5	0,1	0,5	0,9	0,0	0,0	-	-	-
Lack	-	0,4	0,0	0,5	0,1	0,0	0,1	-	-	-
Messing	-	2,4	0,2	2,1	0,3	0,0	0,3	-	-	-
PVC	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	-
Silikon	-	0,4	0,0	0,2	0,02	0,0	0,0	-	-	-
Ethylen Carbonat	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lithium	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Phosphorsäure	6,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LiPF6	11,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dimethyl Carbonat	5,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gesamt	98,1	49,1	3,8	33,6	11,7	0,7	4,6	48,6	4	5

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle A-8: Materialzusammensetzung – Niedervoltsystem; (1) Bleiakkumulator, (2) DC/DC-Wandler, (3) Schaltbox, (4) Sicherungskasten (klein), (5) Sicherungskasten (groß), (6) Batterieschalter, (7) Niedervoltkabel

Material	(1) [kg]	(2) [kg]	(3) [kg]	(4) [kg]	(5) [kg]	(6) [kg]	(7) [kg]
Aluminium	-	2,4	1,1	0,0	0,1	0,0	-
Edelstahl	-	-	-	-	-	-	-
Stahl	-	0,1	1,1	0,0	0,1	0,0	-
Polyethylen	0,4	0,1	6,6	0,1	0,5	0,0	-
Polyphenylen Sulfide	-	0,0	-	-	-	-	-
Glasfaser	-	0,0	-	-	-	-	-
Aluminiumoxid	-	0,0	-	-	-	-	-
Kupfer	-	0,3	2,2	0,0	0,2	0,0	1,7
Polypropelen	1,5	0,2	-	-	-	-	-
Zinn	-	0,0	-	-	-	-	-
Zink	-	0,0	-	-	-	-	-
Polyurethan	-	0,1	-	-	-	-	-
Lack	-	0,1	-	-	-	-	-
Messing	-	0,2	-	-	-	-	-
PVC	-	-	-	-	-	-	0,2
Blei	13,9	-	-	-	-	-	-
Schwefelsäure	2,4	-	-	-	-	-	-
Destilliertes Wasser	3,9	-	-	-	-	-	-
Silikon	-	0,0	-	-	-	-	-
Gesamt	22	3,5	11	0,1	0,8	0,0	1,9

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle A-9: Materialzusammensetzung – Ladesystem; (1) CCS-Stecker, (2) CCS-Kabel, (3) Typ-2-Stecker, (4) Typ-2-kabel

Material	(1) [kg]	(2) [kg]	(3) [kg]	(4) [kg]
Polyethylen	0,5	-	0,3	-
Kupfer	-	5,8	-	2,2
PVC	-	0,3	-	0,1
Gesamt	0,5	6,1	0,3	2,3

Tabelle A-10: Materialzusammensetzung – Gehäuse; (1) Aluminiumwanne, (2) Trägerrahmen, (3) Abdeckung

Material	(1) [kg]	(2) [kg]	(3) [kg]
Kohlefaser	-	-	36
Aluminium	96	18	-
Gesamt	96	18	36

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Anhang B: Ergebnisse der Sachbilanz

Die in den nachfolgenden Tabellen dargestellten Werte, werden auf sieben Nachkommastellen gerundet dargestellt.

Tabelle B-1: CO_2-Äquvalent - Lebensweg

Phase	CO_2-Äquivalent [$kgCO_2e/kWh_e$]	Anteil am Lebensweg [1]
Herstellung	0,7397686	23,5552280%
Nutzung	2,6863203	85,5360593%
Lebensende	-0,2855183	-9,0912873%
Gesamt	3,1405706	100,0000000%

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle B-2: CO_2-Äquivalente - Herstellung

Baugruppe	CO_2-Äquivalent Rohstoffe [$kgCO_2e/kWh_e$]	CO_2-Äquivalent Energie [$kgCO_2e/kWh_e$]	CO_2-Äquivalent Transport [$kgCO_2e/kWh_e$]	CO_2-Äquivalent Verpackung [$kgCO_2e/kWh_e$]	CO_2-Äquivalent Gesamt [$kgCO_2e/kWh_e$]	Gesamt-masse [kg]
Anhängersystem	0,0346129	0,0024544	0,0079951	0,0014522	0,0465146	243,40
Brennstoffzellensystem	0,0916135	0,0007988	0,0028832	0,0008639	0,0961595	163,60
Kathodensystem	0,0218492	0,0016762	0,0016531	0,0002896	0,0254680	54,84
Wasserstoffspeichersystem	0,0963000	0,0004241	0,0020030	0,0003506	0,0990777	66,40
Kühlsystem	0,0406189	0,0015149	0,0019511	0,0003416	0,0444264	64,68
Auspuffsystem	0,0082085	0,0002470	0,0001687	0,0000321	0,0086562	6,07
Hochvoltsystem	0,1202197	0,0076670	0,0080236	0,0014699	0,1373801	278,36
Niedervoltsystem	0,0121237	0,0018552	0,0012053	0,0002133	0,0153975	40,39
Ladesystem	0,0174014	0,0000065	0,0002811	0,0000492	0,0177383	9,32
Gehäuse	0,2299818	0,0136516	0,0045248	0,0007921	0,2489503	150,00
Gesamt	0,6729295	0,0302956	0,0306891	0,0058544	0,7397686	927,05

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle B-3: CO_2-Äquivalente - Einfluss der Rohstoffe

Rohstoff	Abkürzung	Masse [kg]	Prozentueller Massenanteil an MHP [1]	CO_2-Äquivalent [$kgCO_2e/kg$]	Prozentueller CO_2-Äquivalentanteil an MHP [1]
Aluminium	Al	251,672766	24,9525866%	0,0243191	7,6292088%
Stahl	St	349,766088	34,6782400%	0,0141718	4,4458630%
Kupfer	Cu	95,382035	9,4568376%	0,0169763	5,3256732%
Platin	Pt	0,00722925	0,0007168%	0,0122070	3,8294929%
Polyethylen	PE	43,859912	4,3485764%	0,0061467	1,9282937%
Silikon	Q	6,85396	0,6795492%	0,0048398	1,5182900%
Graphit	C	39,1526275	3,8818635%	0,0073586	2,3084824%
Kohlefaser	KF	82,949155	8,2241555%	0,1653186	51,8625080%
Tetrafluorethylen	TFE	0,77507888	0,0768467%	0,0316484	9,9284826%
LiPF6	LiPF6	10,9704	1,0876817%	0,0136117	4,2701685%
Gesamt	G	881,389252	87,3870540%	0,2965980	93,0464632%

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle B-4: Wasserstoffbedarf für die Nutzungsdauer von zehn Jahren

Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Wasserstoffbedarf	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
Pannenhilfe	21,31	32,44	49,41	72,89	103,56	142,09	189,15	245,42	311,58	388,28

Tabelle B-5: CO_2-Äquivalente - Nutzung

CO_2-Äquivalent MHP - Betrieb [$kgCO_2e/kWhe$]	CO_2-Äquivalent MHP - Transport [$kgCO_2e/kWhe$]	CO_2-Äquivalent Gesamt [$kgCO_2e/kWhe$]
1,197190	1,489130	2,686320

Tabelle B-6: CO_2-Äquivalente - Lebensende

Baugruppe	CO_2-Äquivalent Transport [$kgCO_2e/kWh_e$]	CO_2-Äquivalent Recycling [$kgCO_2e/kWh_e$]	CO_2-Äquivalent Abfall [$kgCO_2e/kWh_e$]	CO_2-Äquivalent Gesamt [$kgCO_2e/kWh_e$]	Gesamtmasse [kg]
Anhängersystem	0,0001183	-0,0120605	0,0073716	-0,0045706	243,40
Brennstoffzellensystem	0,0000712	-0,0309386	0,0063817	-0,0244857	163,60
Kathodensystem	0,0000236	-0,0154397	0,0016305	-0,0137856	54,84
Wasserstoffspeichersystem	0,0000286	-0,0139281	0,0033936	-0,0105059	66,40
Kühlsystem	0,0000278	-0,0284698	0,0022949	-0,0261470	64,68
Auspuffsystem	0,0000026	-0,0066184	0,0001059	-0,0065099	6,07
Hochvoltsystem	0,0001197	-0,0672686	0,0094784	-0,0576705	278,36
Niedervoltsystem	0,0000171	-0,0058553	0,0016310	-0,0042072	40,39
Ladesystem	0,0000040	-0,0074455	0,0003707	-0,0070708	9,32
Gehäuse	0,0000645	-0,1343570	0,0037274	-0,1305651	150,00
Gesamt	0,0004774	-0,3223814	0,0363857	-0,2855183	927,05

TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle B-7: CO_2-Äquivalente - Herstellung und Lebensende

Baugruppe	CO_2-Äquivalent Herstellung [$kgCO_2e/kWh_e$]	CO_2-Äquivalent Lebensende [$kgCO_2e/kWh_e$]	CO_2-Äquivalent Differenz [$kgCO_2e/kWh_e$]
Anhängersystem	0,0001183	-0,0120605	0,0073716
Brennstoffzellensystem	0,0000712	-0,0309386	0,0063817
Kathodensystem	0,0000236	-0,0154397	0,0016305
Wasserstoffspeichersystem	0,0000286	-0,0139281	0,0033936
Kühlsystem	0,0000278	-0,0284698	0,0022949
Auspuffsystem	0,0000026	-0,0066184	0,0001059
Hochvoltsystem	0,0001197	-0,0672686	0,0094784
Niedervoltsystem	0,0000171	-0,0058553	0,0016310
Ladesystem	0,0000040	-0,0074455	0,0003707
Gehäuse	0,0000645	-0,1343570	0,0037274
Gesamt	0,0004774	-0,3223814	0,0363857

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle B-8: Gegenüberstellung MHP und Dieselgenerator

Einsatzszenario	CO_2-Äquivalent Herstellung [$kgCO_2e/kWhe$]	CO_2-Äquivalent Nutzung [$kgCO_2e/kWhe$]	CO_2-Äquivalent Lebensende [$kgCO_2e/kWhe$]	CO_2-Äquivalent Gesamt [$kgCO_2e/kWhe$]	Einsparung zum Dieselgenerator [1]
Dieselgenerator	0,5017562	2,3205163	-0,0640750	2,7581976	0,00%
MHP: AWM & D	0,7397686	2,6863203	-0,2855183	3,1405706	-13,86%
MHP: EÖS & D	0,7397686	1,5587494	-0,2855183	2,0129996	27,02%
MHP: EÖS & BEVÖS	0,7397686	0,5081289	-0,2855183	0,9623792	65,11%
MHP: EÖS & HFCVÖS	0,7397686	0,4907296	-0,2855183	0,9449799	65,74%

Tabelle B-9: Sensitivitätsanalyse

Phase	Szenario	CO_2-Äquivalent Gesamt [$kgCO_2e/kWh_e$]
-	Basis	3,1405706
Herstellung	Nur mit Sekundärrohstoffen	3,0370030
Herstellung	Erhöhung des Energiebedarfs um 50%	3,1557184
Herstellung	Senkung des Energiebedarfs um 50%	3,1254228
Herstellung	Erhöhung der Transportdistanz um 50%	3,1559152
Herstellung	Senkung der Transportdistanz 50%	3,1252261
Herstellung	Erhöhung der Verpackung um 50%	3,1434978
Herstellung	Senkung der Verpackung um 50%	3,1376434
Nutzung	KVG	3,8703152
Nutzung	EGR	2,9092365
Nutzung	ESM	2,7305252
Nutzung	BVG	2,1559801
Nutzung	EÖS	2,0129996
Nutzung	Erhöhung der Transportdistanz um 50%	3,8851356
Nutzung	Senkung der Transportdistanz um 50%	2,3960056
Nutzung	BEVAS	2,3411429
Nutzung	BEVÖS	2,0899502
Nutzung	HFCVÖS	2,0725509
Nutzung	15 kW	3,1396499
Nutzung	10 kW	3,2011770
Nutzung	5 kW	3,4970147
Lebensende	Erhöhung der Prozesse um 50%	2,9978115
Lebensende	Senkung der Prozesse um 50%	3,2833298

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.