



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

**Ökobilanz: Holzgas-Blockheizkraftwerk
mit Fokus auf Herstellung und End-of-Life**

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

Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer

und

Ass.-Prof. Dr. techn. Johannes Konrad

E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Raphael Bertagnolli, BSc

Matrikelnummer: 01526119



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Herrn Raphael Bertagnolli, Matrikelnummer: 01526119 wird folgende Aufgabe gestellt:

„Ökobilanz: Holzgas-Blockheizkraftwerk mit Fokus auf Herstellung und End-of-Life“

Holzgas-Blockheizkraftwerke (BHKW) eignen sich zur Verwertung von Schadholz oder Holzabfällen. Mittels Kraft-Wärme-Kopplung werden dabei möglichst effizient elektrischer Strom und Wärme gewonnen. Das Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik optimiert in einem Forschungsprojekt u.a. den Betrieb von Holzgas-BHKW und verbessert die eingesetzten Komponenten, um einen effizienten und sinnvollen Einsatz regenerativer Ressourcen zu ermöglichen. In der Diplomarbeit sind die Umweltauswirkungen (Treibhauspotenzial – „CO₂-Fußabdruck“, Kumulierter Energieaufwand) dieser Holzgas-BHKW-Anlage mittels einer Lebenszyklusanalyse/Ökobilanz (in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 und 14044) zu untersuchen. Ein besonderer Fokus soll auf Herstellung und Entsorgung der Anlage liegen.

Schwerpunkte der Arbeit:

- Definition des Produktsystems
- Recherche der Umweltwirkungen mittels Datenbanken und Literatur
- Aufbau eines parametrierbaren Rechenmodells zur Analyse der Umweltwirkungen
- Darstellung der Ergebnisse und Sensitivitätsanalyse zur Identifikation relevanter Parameter

Die Ergebnisse der Arbeit sind vertraulich zu behandeln und dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung des Institutsvorstandes weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.

Ein gebundenes Exemplar und eine Version der Diplomarbeit auf Datenträger sind am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien abzugeben.

Dauer: November 2022 - August 2023

Die Benutzung der Versuchseinrichtungen des Institutes hat in den Dienststunden und unter Anleitung des Betreuers zu erfolgen. Dabei dürfen alle Arbeiten nur unter besonderer Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften durchgeführt werden.

Einverstanden:

Betreuender Assistent:

Raphael Bertagnolli

Ass.-Prof. Dr. Johannes Konrad

Betreuer am Institut:

Institutsvorstand:

Ass.-Prof. Dr. Johannes Konrad

Prof. Dr. Bernhard Geringer

Eidesstattliche Erklärung

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

**„Ökobilanz: Holzgas-Blockheizkraftwerk
mit Fokus auf Herstellung und End-of-Life“**

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.

Wien, am 31.08.2023

Raphael Bertagnolli

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.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung für die Diplomarbeit.....	II
Eidesstattliche Erklärung	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Kurzfassung.....	VII
Abstract	VIII
Nomenklatur	IX
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	3
2.1 Blockheizkraftwerk	3
2.2 Hackschnitzellogistik.....	9
2.3 Ökobilanz	11
2.3.1 Festlegen des Ziels und des Untersuchungsrahmens.....	12
2.3.2 Sachbilanz.....	13
2.3.3 Wirkungsabschätzung	14
2.3.4 Auswertung	16
2.4 Allokation der Umweltauswirkungen von Sekundärrohstoffen	17
2.4.1 Übersicht der Allokationsmethoden für Sekundärrohstoffe.....	19
2.4.2 Vergleich der Allokationsmethoden für Sekundärrohstoffe.....	24
3 Anlagenbeschreibung.....	27
4 Methodik.....	30
4.1 Modellierung der Ökobilanz eines Holzgas-BHKW	30
4.2 Gewählte Allokationsmethode.....	32
4.3 Informationsbeschaffung.....	32
5 Erstellung der Ökobilanz des BHKW	34
5.1 Ziel der Ökobilanz	34

5.2 Festlegen des Untersuchungsrahmens.....	34
5.3 Modellierungssoftware und Datensammlung	36
5.4 Sachbilanz des BHKW	36
5.4.1 Sachbilanz Rohstoffe und Lieferketten BHKW	36
5.4.2 Sachbilanz Herstellung BHKW	40
5.4.3 Sachbilanz Betrieb BHKW	40
5.4.4 Sachbilanz End-of-Life BHKW.....	45
6 Umweltauswirkungen des BHKW	47
6.1 Auswertung des Produktsystems	47
6.1.1 Klimaänderung	47
6.1.2 Kumulierter Energieaufwand	54
6.2 Sensitivitätsanalysen.....	55
6.2.1 Recyclingquoten.....	56
6.2.2 Gesamtlebensdauer des BHKW	57
6.2.3 Menge der Betriebsstoffe	58
6.2.4 Wartungsintervall des BHKW	59
7 Vergleich Strombereitstellungsvarianten	61
7.1 Verbesserungspotenzial.....	62
7.1.1 Elektrischer Wirkungsgrad des BHKW	62
7.1.2 Nutzung nachhaltiger Energien und Kraftstoffe	63
7.2 Einordnung zu Strombereitstellungsvarianten.....	64
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	66
Literaturverzeichnis	69
Anhang	76

Kurzfassung

Ein Holzgas-Blockheizkraftwerk (BHKW) stellt eine Technologie dar, welche durch die Nutzung des Prinzips der Kraft-Wärme-Kopplung die gekoppelte Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie ermöglicht. In einem Holzgas-BHKW wird mit Hilfe eines Gaserzeugers aus Biomasse (Hackschnitzel) Holzgas hergestellt und in einem Gas-Otto-Motor umgesetzt. Die entstehende Wärme wird über Wärmetauscher an ein Wärmenetz weitergegeben. Ein Generator wandelt die erzeugte mechanische Energie in elektrischen Strom um.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist das Ermitteln der Umweltauswirkungen des Holzgas-BHKW GG-CHP 2.7 der Firma GLOCK ecotech GmbH, gemäß dem methodischen Rahmen der Ökobilanz laut DIN EN ISO 14040 und 14044. Die Untersuchung wird mit Fokus auf Herstellung und Entsorgung (End-of-Life) der Anlage durchgeführt. Die Ergebnisse der Ökobilanz werden für die Bereitstellung von 1 kWh_{fE} Energie in Form von Strom und Wärme am Betriebsstandort der Anlage ermittelt. Mit Hilfe der Sachbilanz werden alle relevanten Energie- und Stoffflüsse des Produktsystems erfasst. Die Umweltauswirkungen, die mit dem Einsatz von Roh- und Betriebsstoffen verbundenen sind, werden aus Datenbanken übernommen. Für das GLOCK GG-CHP 2.7 wurden die Wirkungskategorie *Klimaänderung* sowie der *Kumulierte Energieaufwand* untersucht. Dabei wurden ein spezifisches Treibhauspotenzial von 25,24 gCO₂eq./kWh_{fE} und ein spezifischer Primärenergieeinsatz von 1,33 kWh/kWh_{fE} ermittelt. Der Großteil des bestimmten Treibhauspotenzials entfällt auf die Emissionen durch die Bereitstellung der Hackschnitzel und die durchgeführten Wartungen. Die Rohstoffe und Herstellprozesse des GLOCK GG-CHP 2.7 tragen ca. 4,6% zu den Gesamt-Treibhausgasemissionen bei. Aufgrund des hohen Anteils an verwendeten metallischen Rohstoffen ergibt sich ein großes Potenzial für Recycling. Durch das Recycling im End-of-Life und der verrechneten Gutschrift für vermiedene Emissionen wird das Treibhauspotenzial der Herstellung des BHKW um 38,1% reduziert (unter Annahme eines *quasi-closed loop recycling*). Mit Hilfe der durchgeführten Sensitivitätsanalysen der identifizierten signifikanten Systemparameter, wie dem Wartungsintervall, dem elektrischen Wirkungsgrad des BHKW sowie der Hackschnitzellogistik, wurden Potenziale für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen des GLOCK GG-CHP 2.7 von mehr als 50% aufgezeigt.

Abstract

A wood gas Combined Heat and Power plant (CHP) represents a technology that enables the coupled provision of thermal and electrical energy by using the principle of cogeneration. In a wood gas CHP, wood gas is produced from biomass (wood chips) using a gasifier and is then converted by a gas engine. The generated heat is transferred to the heating grid via a heat exchanger. A generator converts the generated mechanical energy into electrical power.

The aim of this paper is to determine the environmental impact of the wood gas CHP GG-CHP 2.7 of the company GLOCK ecotech GmbH, with the methodological framework of the Life Cycle Assessment (LCA) in accordance with DIN EN ISO 14040 and 14044. The investigation is carried out with a focus on the production and disposal (End-of-Life) of the plant. The results of the LCA are determined for the provision of 1 kWh_{fE} of energy in the form of electricity and heat at the plant's operating location. The Life Cycle Inventory is used to record all relevant energy and material flows across the system boundary of the product system. The environmental impacts associated with the use of raw materials and operational materials are taken from databases. For the GLOCK GG-CHP 2.7, the impact category *Climate Change* and the *Cumulative Energy Demand* were investigated. The study determines a specific Global Warming Potential of 25,24 gCO₂eq./kWh_{fE} and a specific Primary Energy Input of 1,33 kWh/kWh_{fE}. The majority of the identified Global Warming Potential is attributed to emissions from the supply of wood chips and the conducted maintenances. The raw materials and manufacturing processes of the GLOCK GG-CHP 2.7 contribute approx. 4,6% to the total greenhouse gas emissions. Due to the high proportion of metallic raw materials used, there is a significant potential for recycling. Through recycling at End-of-Life and the offset credit for avoided emissions, the Global Warming Potential of the CHP's production is reduced by 38,1% (assuming a *quasi-closed loop recycling*). The conducted sensitivity analyses of the identified significant system parameters, such as maintenance intervals, the electrical efficiency of the CHP, and wood chip logistics, reveal potentials for reducing the greenhouse gas emissions of the GLOCK GG-CHP 2.7 by more than 50%.

Nomenklatur

Abkürzungsverzeichnis

AP	Versauerungspotenzial (von engl. Acidification Potential)
BHKW	Blockheizkraftwerk
CFF	Circular Footprint Formula
GuD	Gas- und Dampf(-Anlagen)
GWP	Treibhauspotenzial (von engl. Global Warming Potential)
elektr.	elektrisch
EoL	End-of-Life
eq.	Äquivalente (von engl. equivalent)
FCEV	Brennstoffzellenelektrisches Fahrzeug (von engl. Fuel Cell Electric Vehicle)
f _E	Funktionelle Einheit
HS	Hackschnitzel
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Lebenszyklusanalyse bzw. Ökobilanz (von engl. Life Cycle Assessment)
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (Kunststoff)
PA	Polyamid (Kunststoff)
PE	Polyethylen (Kunststoff)
PUR	Polyurethane (Kunststoff)
PVC	Polyvinylchlorid (Kunststoff)
RME	Rapsmethylester
Srm	Schüttraummeter
TPE-A	Thermoplastische Polyamid Elastomere (Kunststoff)
VKM	Verbrennungskraftmaschine

Chemische Elemente und Verbindungen

CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CH ₄	Methan
H ₂	Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoff
N ₂	Stickstoff
NO _x	Stickoxide
SO ₂	Schwefeldioxid

Formelzeichen

A	CFF-Faktor für Aufteilung von Lasten und Gutschriften
$\eta_{elektrisch}$	Elektrischer Wirkungsgrad
$\eta_{thermisch}$	Thermischer Wirkungsgrad
η_{Gesamt}	Gesamtwirkungsgrad (elektrischer plus thermischer Wirkungsgrad)
E_D	Treibhauspotenzial (GWP ₁₀₀) für Entsorgung Deponie
E_{Netto}	Netto-Umweltauswirkungen
E_P	Treibhauspotenzial (GWP ₁₀₀) für Primärrohstoff
E_P^*	Treibhauspotenzial (GWP ₁₀₀) für vermiedenen Primärrohstoff
E_R	Treibhauspotenzial (GWP ₁₀₀) für Recycling
E_S	Treibhauspotenzial (GWP ₁₀₀) für Sekundärrohstoff
$H_{u,atro}$	massenspezifischer Heizwert absolut trockenes Holz
$H_u(w)$	massenspezifischer Heizwert in Abhängigkeit des Wassergehalts
L	Verdampfungsenthalpie Wasser
R_1	Anteil an Sekundärrohstoff
R_2	Anteil Recycling im End-of-Life
w	Wassergehalt

1 Einleitung

Immer extremer werdende Wetterereignisse verdeutlichen den fortschreitenden Klimawandel. Bereits im Jahr 2015 wurden durch das Übereinkommen von Paris Maßnahmen mit dem Ziel des Klimaschutzes festgelegt, welches vorsieht, die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen, gilt es den Ausstoß von Treibhausgasen drastisch zu verringern. Dabei gewinnt die Nutzung regenerativer Energieträger für die Bereitstellung von Strom und Wärme für die Verlangsamung des Klimawandels an Bedeutung.

Regenerative Energieträger nutzen erneuerbare Ressourcen und stellen somit eine umweltfreundlichere Alternative gegenüber der Nutzung von fossilen Brennstoffen dar. Wasserkraft, Wind- und Sonnenergie sind bereits als bedeutende erneuerbare Energieträger etabliert. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Nutzung von Wasserkraft weitgehend ausgereizt ist und Wind- bzw. Sonnenenergie aufgrund ihrer Volatilität nicht konstant verfügbar sind. Angesichts dieser Herausforderungen ist die Nutzung von Biomasse eine vielversprechende Option, um eine nachhaltige und kontinuierlich verfügbare Energiebereitstellung zu ermöglichen.

Holzgas-Blockheizkraftwerke (BHKW) verfügen mittels Kraft-Wärme-Kopplung über einen hohen Gesamt-Wirkungsgrad und sind deshalb ein gutes Beispiel für eine effiziente Nutzung von Biomasse. Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist das Ermitteln der Umweltauswirkungen des Holzgas-BHKW GG-CHP 2.7 der Firma GLOCK ecotech GmbH. Die Untersuchung wird mit Fokus auf Herstellung und Entsorgung (End-of-Life) der Anlage durchgeführt.

Zu diesem Zweck werden zunächst die Grundlagen der behandelten Themengebiete, wie beispielsweise Holzgas-BHKW und die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 bzw. 14044, präsentiert. Anschließend wird die Anlagenbeschreibung des GLOCK GG-CHP 2.7 bereitgestellt und die Methodik der Arbeit erläutert. Mit Hilfe der Sachbilanz werden alle relevanten Input- und Outputflüsse des untersuchten Produktsystems erfasst und die Ökobilanz erstellt. Abschließend werden die ermittelten Umweltauswirkungen ausgewertet, durch Sensitivitätsanalysen Verbesserungspotenziale abgeleitet und das GLOCK GG-CHP 2.7 im Vergleich zu anderen Strombereitstellungsvarianten eingeordnet.

2 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zu Blockheizkraftwerken, der Hackschnitzzelllogistik, der Ökobilanz und der Allokation der Umweltauswirkungen von Sekundärrohstoffen bereitgestellt.

2.1 Blockheizkraftwerk

Bei der konventionellen Energieversorgung werden Strom und Wärme in der Regel getrennt voneinander gewonnen. Wie aus [Abbildung 1](#) ersichtlich, stammt die in Österreich bereitgestellte elektrische Energie mit 85% überwiegend aus erneuerbaren Quellen [1].

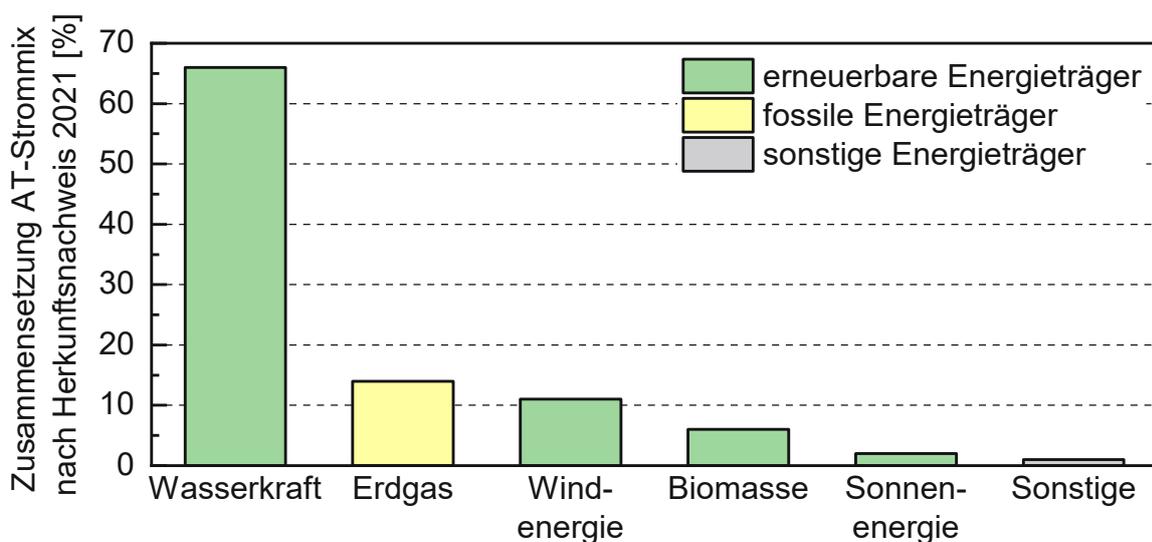


Abbildung 1: Herkunftsnachweis Energieträger Österreich 2021 [1]

In Österreich wird die Wärme für das Heizen mit einem Anteil von 50% Hauszentralheizungen, 12% Etagenheizungen, 6% Einzelöfen und 4% Elektroheizungen am häufigsten vor Ort beim Verbraucher produziert. Knapp 25% der Haushalte sind an das örtliche Wärmenetz angeschlossen [2, 3]. Die benötigte Energie wird überwiegend aus Gas, Heizöl oder Holz gewonnen [1]. Die nachhaltige Energieversorgung spielt eine zentrale Rolle, um die Verlangsamung des Klimawandels zu erreichen. Die Nutzung von regenerativen Energiequellen reduziert den Ausstoß von Treibhausgasen und verringert die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Als Alternative stellt ein Blockheizkraftwerk eine Technologie dar, welche die gekoppelte Bereitstellung von Strom und Wärme ermöglicht. Ein BHKW kann mit Hilfe der Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung die hohen thermischen Verluste der reinen Stromerzeugung vermeiden und stellt die Abwärme den Verbrauchern beispielsweise über Wärmeleitungen zur Verfügung. KWK wird definiert als [4]:

„... die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer und thermischer Nutzenergie aus anderen Energieformen mittels eines thermodynamischen Prozesses in einer technischen Anlage.“

Wie in Abbildung 2 gezeigt, kann durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme gegenüber der getrennten Erzeugung ca. 13% Energie eingespart werden.

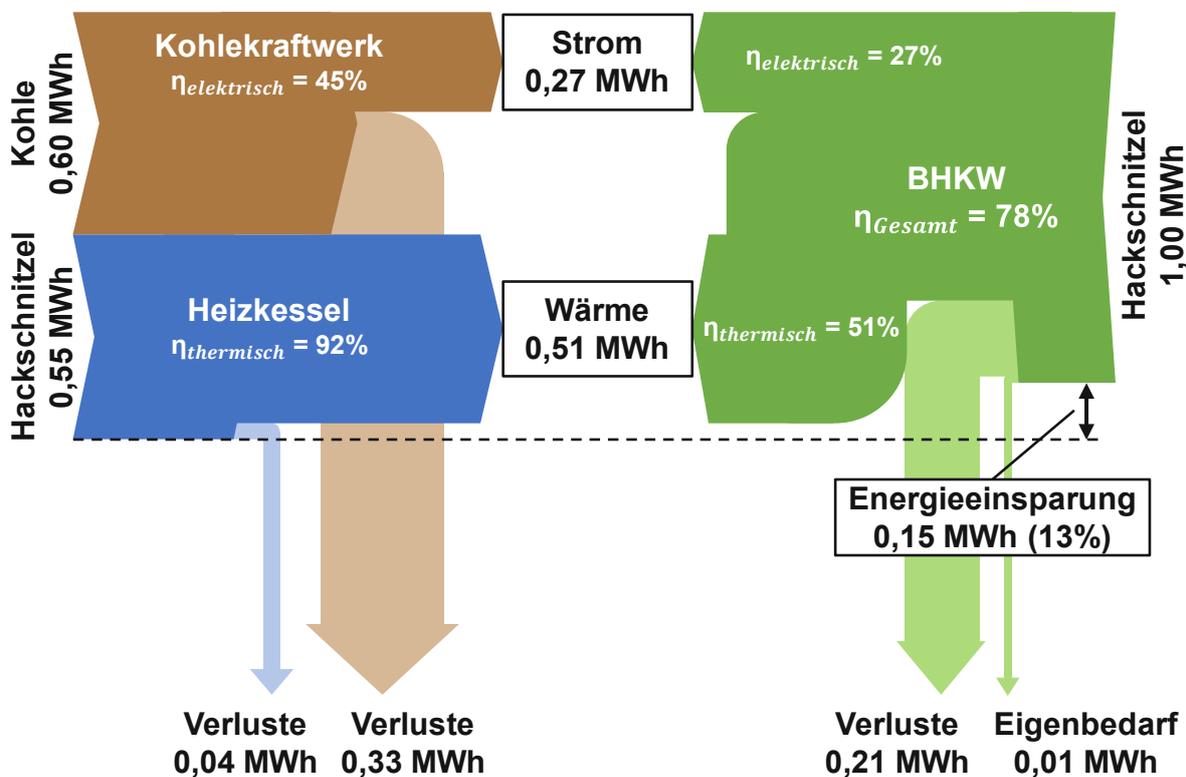


Abbildung 2: Energieeinsparung: getrennte – gekoppelte Erzeugung

Für die Energieumwandlung werden in KWK-Anlagen meistens Gasturbinen, Dampfturbinen, Stirlingmotoren, Verbrennungskraftmaschinen (VKM), Brennstoffzellen, oder Kombinationen davon (Beispiel GuD-Anlage: Gasturbinen- und Dampfturbinenprozess) verwendet [4, 5, 6]. BHKW-Anlagen zählen zu den KWK-Anlagen mit kleiner bis mittlerer Leistung (unter $10 \text{ MW}_{\text{elektr.}}$) [7, 8]. Die Energieumwandlung erfolgt in einem BHKW typischerweise mit einer VKM, welche je nach Anlagenkonzept mit Heizöl, Erdgas, Flüssiggas, Biogas oder Holzgas betrieben werden kann [4]. BHKW-Anlagen können wärmegeführt, stromgeführt oder netzgeführt sein [8]. Netzgeführte Anlagen sind in einem Verbund von Energieerzeugungsanlagen eingegliedert und werden über diesen gesteuert. Die wärmegeführte Betriebsweise stellt den häufigsten Anwendungsfall dar [7]. Falls es Abnehmer gibt, welche die bereitgestellte thermische Energie zur Gänze beziehen können, werden KWK-Anlagen in Form eines BHKW auch für die Versorgung von Wohngebäuden, öffentlichen Einrichtungen oder Hotelanlagen eingesetzt. Der produzierte Strom kann für den Fall, dass er nicht zur Gänze benötigt wird, in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Abbildung 3 zeigt die geordnete Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs einer beispielhaften Hotelanlage. Das BHKW wird so dimensioniert, dass es dauerhaft im Grundlastbereich betrieben werden kann. Der darüberhinausgehende Wärmebedarf wird durch Spitzenlast-Kesselanlagen abgedeckt.

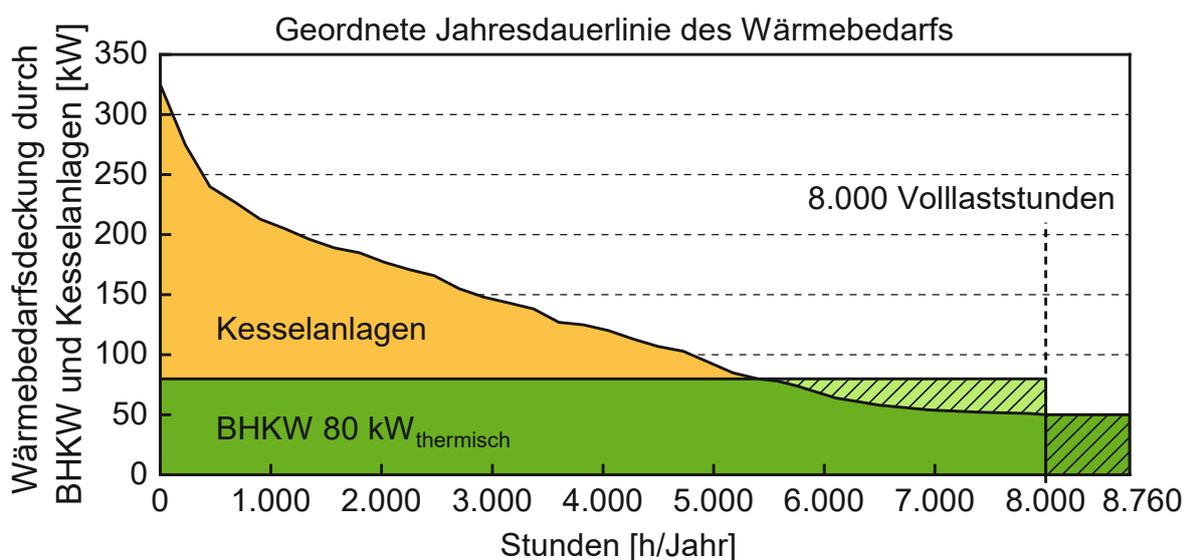


Abbildung 3: Wärmebedarfsdeckung eines beispielhaften Objektes durch BHKW

In Abhängigkeit des vorhandenen Lastprofils, können mehrere Anlagen parallel geschaltet werden, um auch auf Spitzenlasten reagieren zu können. Mehrere parallel geschaltete BHKW-Anlagen eignen sich für eine autarke Energiebereitstellung von Strom und Wärme für größere Verbraucher, wie beispielsweise eine Region [9].

Der folgende Abschnitt erläutert die Vorgänge in einem mit Holzgas betriebenen BHKW. Derartige Anlagen mit Gasmotor werden üblicherweise für kleine elektrische Leistungen ($50\text{-}500\text{ kW}_{\text{elektr.}}$) entwickelt und angeboten [10]. Für die Erzeugung des Holzgases wird Holz geerntet und zu lagerbaren Hackschnitzel weiterverarbeitet. Hackschnitzel sind kleine Holzstücke oder -späne, die durch das Zerkleinern von Holz, beispielsweise aus Baumstämmen, Ästen oder Holzabfällen, hergestellt werden. Die Holzart, aus dem die Hackschnitzel hergestellt werden, spielt eine untergeordnete Rolle. Im Allgemeinen wird darauf geachtet, dass regionale Hölzer verwendet werden und diese die Anforderungen hinsichtlich des Heizwerts erfüllen. Für die Hackschnitzel selbst gibt es qualitative Anforderungen, wie zum Beispiel Verschmutzung oder die Hackschnitzelgröße. Nach Anlieferung zum Betriebsstandort des BHKW werden die Hackschnitzel von ca. 45% (erntefrisch) bis ca. 13% Wassergehalt vor-getrocknet und anschließend mittels eines Fördermechanismus der Anlage zugeführt. Das in **Abbildung 4** dargestellte GLOCK GG-CHP 2.7 ist mit $50\text{ kW}_{\text{elektr.}}$ und $110\text{ kW}_{\text{therm.}}$ (Angabe laut Datenblatt [11]) ein repräsentativer Vertreter eines Holzgas-BHKW.

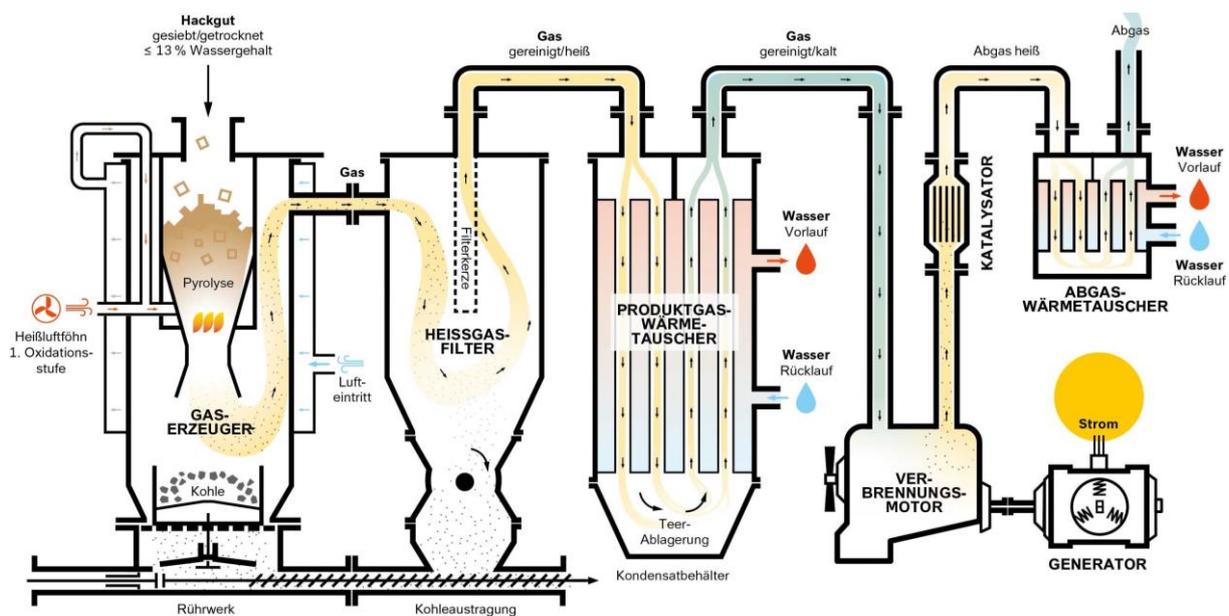


Abbildung 4: Systembild Holzgas-BHKW GLOCK GG-CHP 2.7 [11]

Das GLOCK GG-CHP 2.7 wird nach dem Prinzip eines Gleichstromvergasers im Festbett betrieben. Bei Gleichstromvergasern bewegen sich der Brennstoff (Hackschnitzel) und das Vergasungsmittel in die gleiche Richtung (von oben nach unten). Das ausgebildete Festbett, die Schüttschicht, sinkt infolge der Schwerkraft und der kontinuierlichen Materialzersetzung nach unten ab. In Festbettvergasern wird die Vergasung in vier Prozesse unterteilt: Aufheizung und Trocknung, pyrolytische Zersetzung, Oxidation, Reduktion [10].

Die Zufuhr der Hackschnitzel in den Gaserzeuger erfolgt von oben über eine Förderschnecke, wo diese unter Ausschluss von Sauerstoff aufgeheizt werden. Mit Hilfe dieses ersten Teilprozesses wird bei Temperaturen von bis zu 100 °C Wasser verdampft und die Hackschnitzel werden bis auf einen Wassergehalt von ca. 6% weitergetrocknet. Anschließend beginnt bei etwa 200 °C der zweite Teilprozess der Vergasung. Durch die pyrolytische Zersetzung gehen die flüchtigen Bestandteile des Holzes in die Gasphase über. Die Pyrolyseprodukte treten in die Oxidationszone ein, wo durch Zufuhr eines sauerstoffhaltigen Vergasungsmittels (Luft) Temperaturen von über 1000 °C erreicht werden. In diesem dritten Teilprozess wird das zurückgebliebene Pyrolysekoks nun möglichst vollständig in brennbare Gase umgewandelt. In der Reduktionszone läuft der vierte und letzte Teilprozess der Vergasung ab und es finden weitere Vergasungsreaktionen statt. Dort wird in einer autothermen Reaktion unter anderem der feste Kohlenstoff (Koks) durch Reduktion in CO und H₂ umgewandelt [10, 12]. Eine durchschnittliche Holzgas-Zusammensetzung, mit Verwendung von Luft als Vergasungsmittel, ist in Abbildung 5 dargestellt.

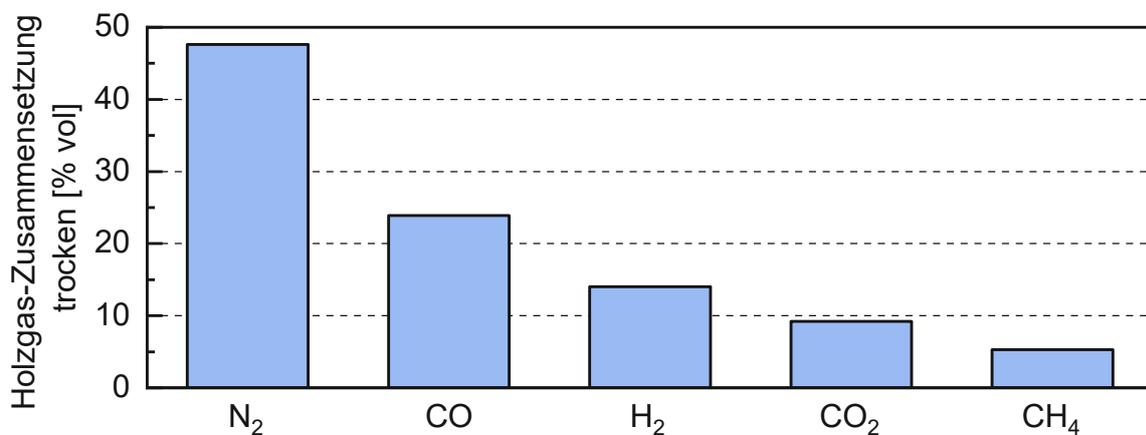


Abbildung 5: Holzgas-Zusammensetzung (trocken) für GLOCK GG-CHP 2.7 [12]

Der Heizwert des Holzgases hängt von der chemischen Zusammensetzung ab. Ein hoher Anteil an Wasserstoff trägt zu einem hohen Heizwert des Holzgases bei [4]. Bei einer Zusammensetzung wie in Abbildung 5 liegt der Heizwert bei 1,58 kWh/kg [12]. Der erhebliche Anteil an Stickstoff (N_2) in der Holzgas-Zusammensetzung resultiert aus der Verwendung von Luft als Vergasungsmittel.

Infolge der pyrolytischen Zersetzung entstehen bei der Vergasung unerwünschte Nebenprodukte wie Teere und Partikel, weshalb das erzeugte Holzgas gereinigt werden muss [10]. Hierfür durchströmt das Holzgas einen Heißgasfilter, in dem Filterkerzen aus einem Metallgewebe oder Keramik zum Einsatz kommen. Das im Gaserzeuger bzw. im Heißgasfilter anfallende Restkoks sowie die Asche werden gesammelt, über einen Austragungsmechanismus ausgeschleust und müssen entsorgt werden. Für die Abscheidung der Teere durchströmt das Holzgas einen Ölbadfilter, in dem Biodiesel (Rapsmethylester) als Filtermedium eingesetzt wird. Anschließend wird das Holzgas im Produktgaswärmetauscher abgekühlt, um durch einen höheren Füllgrad einen hohen Verbrennungswirkungsgrad der VKM zu erreichen. Ebenso soll durch die Abkühlung die Klopfneigung reduziert werden. Die Umsetzung des Holzgases erfolgt in einem Gasmotor. Beim GLOCK GG-CHP 2.7 kommt ein Sechszylinder Gas-Otto-Motor zum Einsatz, welcher stöchiometrisch betrieben wird. Mittels eines Venturimischers wird das Brenngas aus Holzgas und Luft bereitgestellt. Anschließend wird es im Brennraum durch eine Zündkerze gezündet. Das Abgas wird mit Hilfe eines 3-Wege-Katalysators gereinigt. Die abgegebene Wärme des Holzgases bzw. des Abgases wird über Wärmetauscher an das Wärmenetz weitergegeben. Die ideale Umsetzung des Holzgases in der VKM ist CO_2 -neutral, da der freigesetzte Kohlenstoff zuvor aus der Luft in der Biomasse gebunden wurde. Ein Generator wandelt die von der VKM produzierte mechanische Energie in elektrischen Strom um. Wärme, die aufgrund eines zu geringen Temperaturniveaus nicht dem Wärmenetz zugeführt werden kann, wird für das Nach-Trocknen der Hackschnitzel verwendet [4].

Um eine effiziente Betriebsweise des BHKW sicherzustellen, sind regelmäßige Wartungen notwendig. Während dieser Wartungen müssen notwendige Betriebsmittel wie beispielsweise Motoröl oder Biodiesel getauscht sowie bestimmte Komponenten rechtzeitig ausgewechselt werden. Der Gaserzeuger muss aufgrund der thermischen Belastung durch die hohen Temperaturen in regelmäßigen Abständen getauscht

werden. Für einen störungsfreien und verlässlichen Betrieb müssen Luftfilter und Zündkerzen gewartet werden sowie Filterkerzen regelmäßig gespült werden. Nicht vollständig aus dem Holzgas auskondensierte Teere setzen sich vor allem in den Ansaugkanälen der VKM ab und erfordern regelmäßiges Reinigen. Ebenso ist es notwendig, den Zylinderkopf und die Kolben zu überprüfen und falls erforderlich zu ersetzen.

2.2 Hackschnitzellogistik

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die notwendigen Verfahrensschritte der Hackschnitzellogistik, um den Rohstoff Holz in den Betriebsstoff Hackschnitzel für ein Holzgas-BHKW aufzubereiten. Im Wesentlichen werden dabei vier forstwirtschaftliche Verfahrensschritte durchlaufen [13, 14], anschließend werden die Hackschnitzel noch auf einen festgelegten Wassergehalt getrocknet [15].

Ernten/Fällen

Als erster Verfahrensschritt muss der stehende Baum gefällt werden, indem er durch Setzen des Fällschnitts kontrolliert zu Fall gebracht wird. Danach sind weitere Arbeitsschritte notwendig, um den liegenden Baum zu entasten und in passende Längen zu schneiden. Dieser Verfahrensschritt kann motormanuell mit Motorsäge oder mechanisiert mittels Harvester bzw. Maschine mit Mehrfachfällkopf durchgeführt werden [16]. Ein Harvester des Herstellers *John Deere* ist in Abbildung 6 zu sehen.



Abbildung 6: Harvester von *John Deere* [17]

Rücken und Poltern des Hackholzes

Nachdem der Baum gefällt wurde, muss er vor der Weiterverarbeitung gerückt und gepoltert werden. Dieser Schritt erfolgt maschinell mit Seilwinde, Schlepper oder Forwarder [18]. In [Abbildung 7](#) ist ein Forwarder des Herstellers *EcoLog* zu sehen. Bei Arbeit in Steillagen wird eine Kombination der Rückmethoden verwendet, beispielsweise Seilwinde für das Rücken bis zur Hanggrenze und anschließend Weitertransport mit Forwarder [19].



Abbildung 7: Forwarder von *EcoLog* [20]

Hacken

Das gepolterte Holz wird nun mit Hilfe eines schneidenden Werkzeugs zerhackt. Das Hacken erfolgt üblicherweise noch vor Ort im Wald. Möglichkeiten sind beispielsweise ein Hacker am Traktor oder ein LKW-Hacker (zu sehen in [Abbildung 8](#)) [16].



Abbildung 8: LKW-Hacker von *Mus Max* [21]

Transport

Die Hackschnitzel werden nach der Zwischenlagerung nun als loses Schüttgut zum Abnehmer transportiert. Möglichkeiten dafür sind beispielsweise ein landwirtschaftlicher Kippanhänger, ein Abschiebewagen (zu sehen in [Abbildung 9](#)), ein Container-LKW oder ein Schubboden-LKW [13, 16].



Abbildung 9: Abschiebewagen von *Farmtech* [22]

Trocknen

Der Wassergehalt von frischen Hackschnitzel beträgt üblicherweise, mit leichten Unterschieden nach Holzart, direkt nach der Ernte 45% [13]. Vor Zuführung in das BHKW müssen die Hackschnitzel getrocknet werden. Die Trocknung kann natürlich (loses Aufschütten auf Rost mit Durchlüftung) oder technisch (Zuführen von Wärme) erfolgen. Die natürliche Trocknung ist nur bedingt anwendbar, da sie aufgrund von Schimmelpilzbildung zu nicht vermeidbaren Massenverlusten führen kann. Bei der technischen Trocknung kann die Temperatur so angepasst werden, dass das Wachstum von Schimmelpilzen verhindert wird [15].

2.3 Ökobilanz

Die Ökobilanz, im Englischen als Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet, ist laut DIN EN ISO 14040 folgendermaßen definiert [23]:

„Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potenziellen Umwelt(aus)wirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltaus-

wirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“).“

Wie in der DIN EN ISO 14040 bzw. DIN EN ISO 14044 festgelegt, besteht die Durchführung von Ökobilanz-Studien aus vier Phasen. Die vier Phasen und die Beziehungen zwischen den Phasen sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Doppelpfeile sollen das iterative Vorgehen bei der Erstellung der Ökobilanz zum Ausdruck bringen.

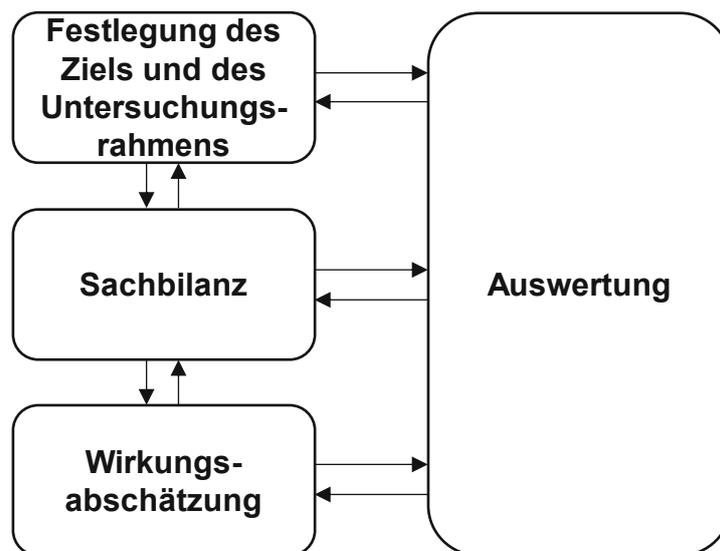


Abbildung 10: Phase einer Ökobilanz-Studie [23]

2.3.1 Festlegen des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Der erste Schritt der Erstellung einer Ökobilanz ist das Festlegen von Ziel und Untersuchungsrahmen. Das Ziel der Ökobilanz umfasst mindestens die Aussagen bezüglich: der beabsichtigten Anwendung, die Gründe für die Durchführung der Studie, die angesprochene Zielgruppe und eine Angabe ob vergleichende Aussagen zum Ergebnis der Ökobilanz vorgesehen sind. Vergleichende Aussagen werden verwendet, um die Umweltauswirkungen verschiedener Produkte oder Dienstleistungen miteinander zu vergleichen. Mit dem Festlegen des Untersuchungsrahmens soll sichergestellt werden, dass die Studie widerspruchsfrei ist und dem Ziel der Untersuchung gerecht wird. Der Untersuchungsrahmen enthält unter anderem: das Produktsystem, die funktionelle Einheit, die Systemgrenze, das Allokationsverfahren (siehe Kapitel 2.4), Annahmen und Einschränkungen (wie beispielsweise Abschneidekriterien), Anforderungen an die Datenqualität sowie die ausgewählten

Wirkungskategorien für die Wirkungsabschätzung (siehe [Kapitel 2.3.3](#)) [23]. Die Wahl der funktionellen Einheit legt fest, auf welche Menge oder Leistung sich die Ökobilanz bezieht. Eine geeignete funktionelle Einheit ermöglicht den Vergleich der Umweltauswirkungen von verschiedenen Produkten oder Dienstleistungen [24].

2.3.2 Sachbilanz

In der Sachbilanz werden alle relevanten Input- und Outputflüsse der definierten Prozessmodule des untersuchten Produktsystems erhoben. Prozessmodule sind die kleinsten berücksichtigten Bestandteile der Sachbilanz, für den Input- und Output-Daten quantifiziert werden und bilden Zeitpunkte im Lebensweg des Produktes ab. [Abbildung 11](#) liefert einen schematischen Überblick der durchlaufenen Prozessmodule für ein allgemeines Produkt.

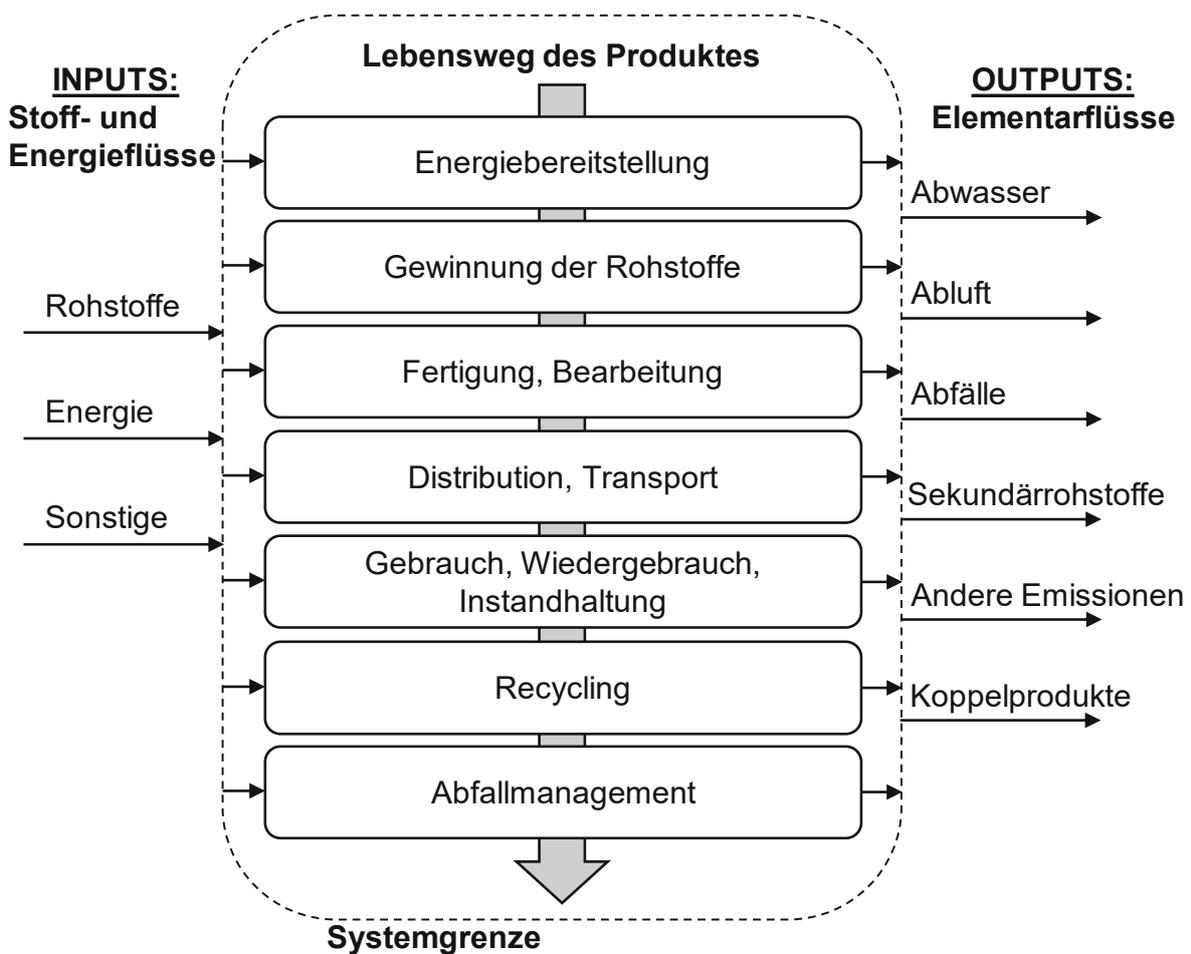


Abbildung 11: Schematische Darstellung Sachbilanz. Vorlage: [24]

Die in [Abbildung 11](#) dargestellte Systemgrenze markiert den Übergang zwischen der natürlichen Umwelt und dem Produktsystem. Es werden zwei Kategorien von Beziehungen für die erfassten Energie- und Stoffflüsse unterschieden: zum einen die Beziehungen zwischen den Prozessmodulen, und zum anderen die Beziehungen der Prozessmodule mit der natürlichen Umwelt. Mit Hilfe der ersten Kategorie werden die Prozessmodule innerhalb des Produktsystems verknüpft. In der zweiten Kategorie werden Stoff- und Energieflüsse behandelt, die von der natürlichen Umwelt in die Systemgrenze eintreten (beispielsweise Rohstoffe für die Herstellung eines Produktes) oder Elementarflüsse, die zurück in die Umwelt fließen (beispielsweise Emissionen aus dem Betrieb der Anlage) [23].

Die Norm sieht vor, dass für jedes Prozessmodul folgende Daten erhoben werden:

- In- und Outputs von Energie, sämtliche Stoffströme und sonstige Inputs (Vorprodukte)
- Produkte, Koppelprodukte, anfallender Abfall
- Emissionen in die Luft, Verunreinigungen des Wassers und des Bodens, andere Emissionen (zum Beispiel Strahlung)
- Weitere Umweltaspekte

Koppelprodukte sind brauchbare Produkte, Materialien oder Substanzen, die zusätzlich zum untersuchten Produkt als Output eines Prozessmoduls anfallen. Es gilt auch für diese, die anfallenden Input- bzw. Output-Größen mit Hilfe einer passenden Allokationsmethode zu berücksichtigen (siehe [Abschnitt 2.4](#)). Als sonstige Inputs werden unter anderem Vorprodukte bilanziert, die aufgrund der Abschneidekriterien nicht in ihrem gesamten Lebensweg berücksichtigt werden müssen.

2.3.3 Wirkungsabschätzung

Den Ergebnissen der Sachbilanz, das sind die erfassten Input- und Outputflüsse des untersuchten Produktsystems, werden in der Wirkungsabschätzungsphase die potenziellen Umweltauswirkungen zugewiesen. Im Folgenden werden die drei verbindlichen Bestandteile der Wirkungsabschätzung beschrieben [23].

Wahl Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodell

Mit Hilfe von Wirkungskategorien werden umweltrelevante Probleme veranschaulicht. Beispiele dafür sind die *Klimaänderung* oder die *Versauerung* [23, 25].

Der Wirkungsindikator beschreibt die quantitative Auswirkung aller Substanzen, die eine Wirkung in der jeweiligen Kategorie verursacht.

Das Charakterisierungsmodell ist ein Modell, welches benötigt wird, um die Ergebnisse der Sachbilanz in der Wirkungskategorie zu gewichten und in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators umzuwandeln. Die Umwandlung erfolgt mit den Charakterisierungsfaktoren. Beispielsweise liefert für die Wirkungskategorie *Klimaänderung* das Charakterisierungsmodell Szenario „Baseline“ über 100 Jahre des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change) den Charakterisierungsfaktor Treibhauspotenzial (GWP_{100}) für jedes Treibhausgas ($kgCO_2$ -Äquivalente/kg Gas). Der festgelegte Charakterisierungsfaktor für Kohlenstoffdioxid (CO_2) ist 1, Methan (CH_4) hat einen Faktor von 28. Das bedeutet, der Ausstoß von Methan hat gegenüber Kohlenstoffdioxid einen 28-mal stärkeren Einfluss auf die Wirkungskategorie *Klimaänderung* [26].

Klassifizierung

In der Klassifizierung erfolgt die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse in die Wirkungskategorien. Es gilt dabei zu beachten, dass sich Sachbilanzergebnisse auch auf mehr als eine Wirkungskategorie beziehen können: Schwefeldioxid (SO_2) wird beispielsweise der Wirkungskategorie der *menschlichen Gesundheit* und der *Versauerung* zugewiesen [27].

Charakterisierung

Die Charakterisierung ist das Kernstück der Wirkungsabschätzung und schließt die Umwandlung der Sachbilanzergebnisse durch die Berechnung des Wirkungsindikatorwerts ab. Der Wirkungsindikatorwert ermöglicht die quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie in Form einer Kennzahl.

Das Vorgehen der Wirkungsabschätzung wird in Abbildung 12 schematisch für die Wirkungskategorien *Klimaänderung* und *Versauerung* dargestellt.

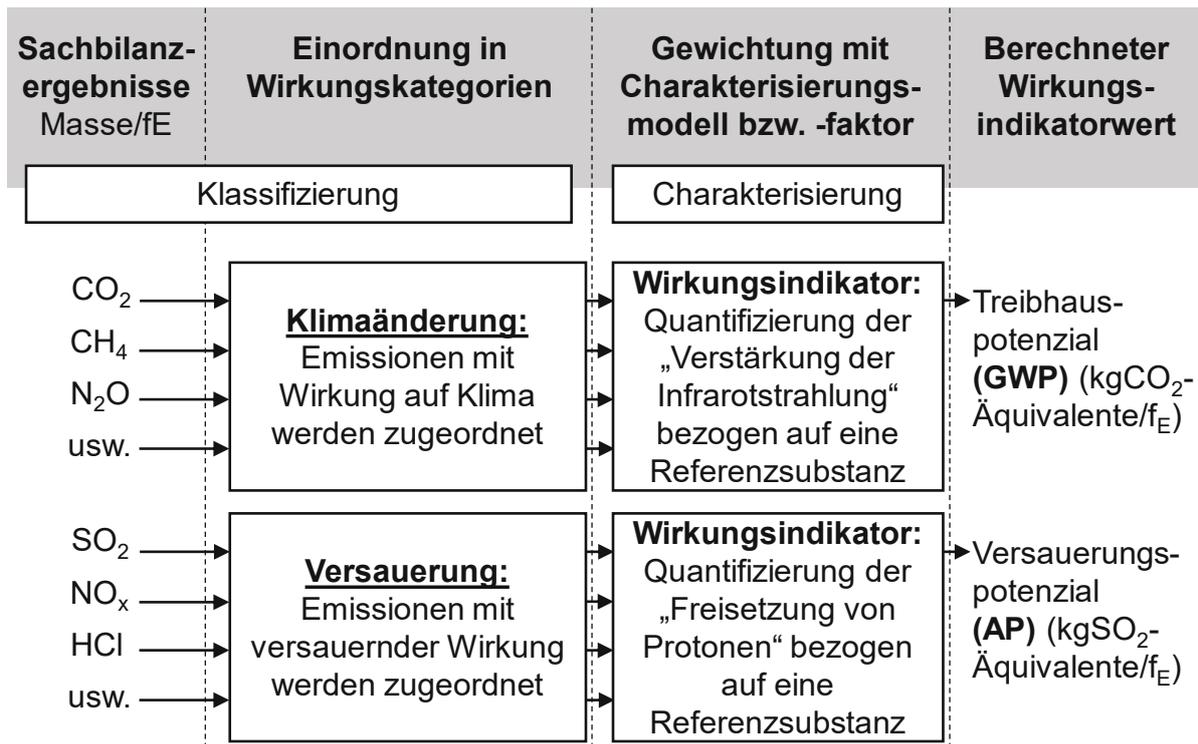


Abbildung 12: Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung am Beispiel der Wirkungskategorien Klimaänderung bzw. Versauerung. Vorlage: [24]

Weiterer Indikator der Wirkungsabschätzung: Kumulierter Energieaufwand

Der *Kumulierte Energieaufwand* (KEA) zählt nicht zu den Wirkungskategorien [25], wird allerdings als ein Indikator in der Wirkungsabschätzung untersucht und für Aussagen zu Effizienz und Nachhaltigkeit eines Produktes herangezogen. Der KEA gibt an wie viel erneuerbare und nicht-erneuerbare Primärenergie im untersuchten Produktsystem eingesetzt werden und ist daher ein geeignetes Instrument, um beispielsweise verschiedene Energiebereitstellungsvarianten miteinander zu vergleichen. Der KEA wird in kWh/f_E angegeben.

2.3.4 Auswertung

Die Auswertung ist die Phase der Ökobilanz, in der die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam betrachtet werden. Sie soll laut Norm die folgenden Bestandteile enthalten [27]:

- Eine Identifizierung von signifikanten Parametern auf Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz- und der Wirkungsabschätzungs-Phasen der Ökobilanz

- Eine Beurteilung, die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen

Signifikante Parameter sind solche, die einen wesentlichen Beitrag zu den Umweltauswirkungen des Produktes haben. Die Sensitivitätsanalyse behandelt unter anderem die Veränderung dieser signifikanten Parameter, das Weglassen von unbedeutenden Prozessen oder Annahmen über die Entsorgung (Recycling) von Rohstoffen (Vergleich [Kapitel 2.4](#)) [28].

2.4 Allokation der Umweltauswirkungen von Sekundärrohstoffen

In der Ökobilanz versteht man unter Allokation die verursachungsgerechte Zuordnung der über den Lebensweg auftretenden Umweltauswirkungen bei Multi-Output-Prozessen, im Recycling oder bei der Abfallentsorgung eines untersuchten Produktsystems. Werden beispielsweise aus einem Prozessmodul zwei Produkte hervorgebracht (*Produkt 1* und *Produkt 2*), so können mit Hilfe der Allokation, die mit dem Prozessmodul verbundenen Umweltauswirkungen auf diese zwei Produkte „aufgeteilt“ werden. Bei solchen Multi-Output-Prozessen wird in den meisten Fällen die „Allokation nach Masse“, also eine Aufteilung nach dem Massenverhältnis der entstehenden Koppelprodukte, verwendet [23, 24].

Die Allokationsgrundsätze sind auch für die Wiederverwendung und das Recycling von Bedeutung. In der Ökobilanz kann die Herstellung von Produkten aus Primär- oder Sekundärrohstoffen bilanziert werden. Primärrohstoffe stammen aus primärer Gewinnung (Neumaterial), während Sekundärrohstoffe durch Recycling wiedergewonnen wurden. Die Verwendung von Primärrohstoffen ist im Allgemeinen mit stärkeren Umweltauswirkungen verbunden als jene von Sekundärrohstoffen. Mit Hilfe der Allokationsgrundsätze wird definiert, welche (reduzierten) Umweltauswirkungen mit der Verwendung von Sekundärrohstoffen verbunden sind. Die gewählte Allokationsmethode hat Einfluss auf die Modellierung des Recyclings in der End-of-Life Lebensphase (EoL).

Laut Norm DIN EN ISO 14044 [27] werden grundsätzlich zwei Arten von Recycling unterschieden:

- Recycling im geschlossenen Kreislauf: keine Veränderungen der inhärenten Eigenschaften des Rohstoffs und der Rohstoff wird in dasselbe Produktsystem zurückgeführt (*closed loop recycling*).
- Recycling im offenen Kreislauf: Veränderungen der inhärenten Eigenschaften oder der Rohstoff wird in einem anderen Produktsystem wiederverwendet (*open loop recycling*).

Bei Recycling im geschlossenen Kreislauf kann die Allokation vermieden werden, da die Verwendung von Sekundärrohstoff die Verwendung von Primärrohstoff ersetzt und sich alle Prozesse innerhalb derselben Systemgrenze abspielen. Im offenen Kreislauf wird eine Allokation der Umweltauswirkungen benötigt. In Abbildung 13 werden die Lebensphasen von zwei eigenständigen Produktsystemen vereinfacht abgebildet. Die zwei Produkte werden aus dem gleichen Rohstoff hergestellt und sind insofern miteinander verknüpft, als das *Produkt A* (bzw. ein Teil davon) nach dem Gebrauch durch Recycling als Sekundärrohstoff für die Herstellung von *Produkt B* verwendet wird. Im Allgemeinen könnte *Produkt B* nach Gebrauch, Sammlung und Wiederaufbereitung für ein weiteres Produkt als Sekundärrohstoff dienen, in dieser vereinfachten Modell-darstellung wird das Produkt am Ende des Produktlebens entsorgt.

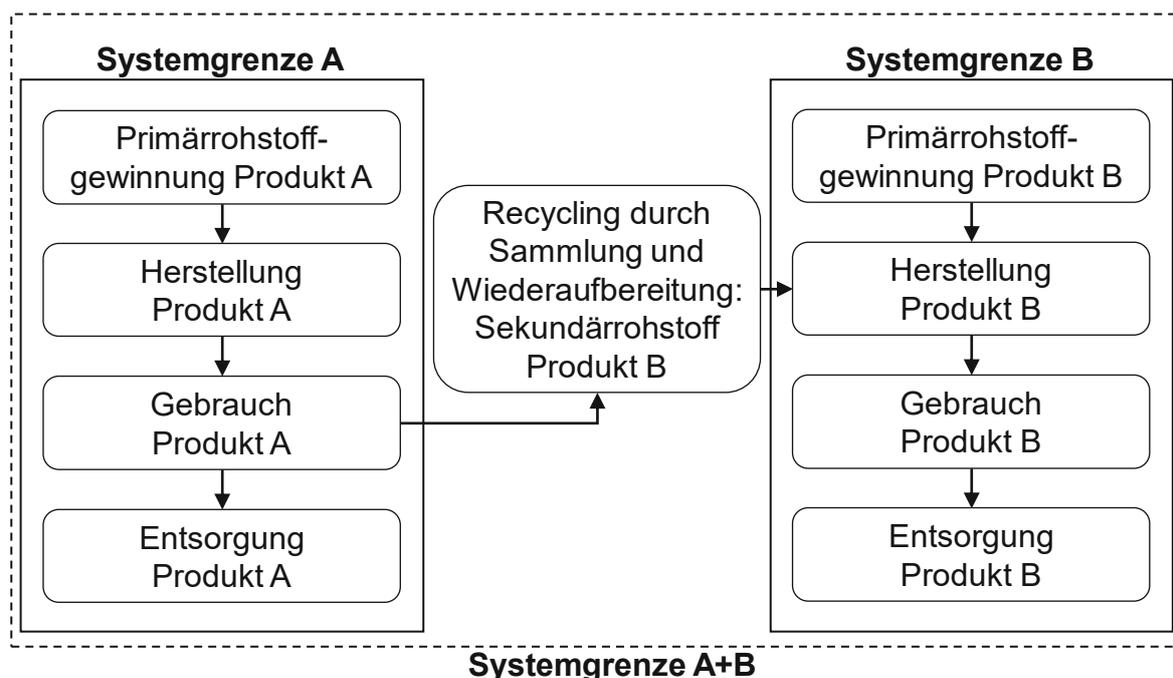


Abbildung 13: Vereinfachte Darstellung *open loop recycling* zwischen Produkt A und Produkt B. Vorlage: [24]

Durch das in Abbildung 13 dargestellte Recycling im offenen Kreislauf (*open loop recycling*) wird dem Produktsystem A durch das Recycling weniger Aufwand für die Entsorgung angerechnet. Gleichzeitig bedeutet das im Produktsystem B weniger Primärrohstoff-Verbrauch durch den Einsatz von Sekundärrohstoff. Diese Reduktion der Umweltauswirkungen spiegelt allerdings in den meisten Fällen ein verzerrtes Bild der Realität wider, da sich durch diese Entlastung für beide Produktsystemen ausschließlich Vorteile ergeben. Die Umweltauswirkungen für das Recycling (Sammlung und Wiederaufbereitung) liegen außerhalb beider Systemgrenzen und werden keinem System angelastet. Für die Wahl der passenden Allokationsmethode stellt sich die Frage, wie die Aufwendungen für das Recycling gerecht zwischen den Systemen A und B aufgeteilt werden können.

Das Bilanzieren von Sekundärrohstoffen sowie die Modellierung der End-of-Life-Lebensphase sind in der Ökobilanz mit einigen Unsicherheiten verbunden. Mit absoluter Sicherheit können nur jene Stoffströme bilanziert werden, welche innerhalb der Systemgrenze wieder in das Produktsystem übergeführt werden (*closed loop recycling*). Verlassen Rohstoffe die Systemgrenze (*open loop recycling*), so kann nicht endgültig bestimmt werden was mit diesen Sekundärrohstoffen passiert und ob diese tatsächlich wiederverwendet werden [29]. Die grundlegende Norm der Ökobilanz DIN EN ISO 14044 [27] sowie die Norm der Richtlinie zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks von Produkten DIN EN ISO 14067 [30] liefern keine Empfehlungen für die Wahl einer Allokationsmethode, sondern fordern, dass die gewählte Allokationsmethode transparent erläutert wird.

Im folgenden Teil werden die gängigsten Allokationsmethoden erläutert und abschließend miteinander verglichen.

2.4.1 Übersicht der Allokationsmethoden für Sekundärrohstoffe

In Anlehnung an die DIN EN ISO 14067 [30] werden die Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit der Betrachtung der Umweltauswirkungen für die Herstellung und Entsorgung (EoL) eines untersuchten Produktsystems erläutert. Die Erklärung der Formelzeichen erfolgt anhand der Wirkungskategorie *Klimaänderung* pro funktioneller Einheit (f_E).

Mit der Rohstoffgewinnung verbundene Umweltauswirkungen:

E_P Treibhauspotenzial (GWP₁₀₀) für Primärrohstoff [$kgCO_2eq./f_E$]

E_S Treibhauspotenzial (GWP₁₀₀) für Sekundärrohstoff [$kgCO_2eq./f_E$]

Mit dem Einsatz von Primär- bzw. Sekundärrohstoff bei der Herstellung verbundene Quoten:

R_1 Anteil an Sekundärrohstoff [*dimensionslos*]

$1 - R_1$ Anteil an Primärrohstoff [*dimensionslos*]

Durch Prozessmodule aus dem End-of-Life hervorgehende Umweltauswirkungen:

E_R Treibhauspotenzial (GWP₁₀₀) des Recyclings [$kgCO_2eq./f_E$] entspricht Treibhauspotenzial des Sekundärrohstoffes

E_D Treibhauspotenzial (GWP₁₀₀) für Entsorgung Deponie [$kgCO_2eq./f_E$]

E_P^* Treibhauspotenzial (GWP₁₀₀) für vermiedenen Primärrohstoff [$kgCO_2eq./f_E$] entspricht Treibhauspotenzial des Primärrohstoffes

Mit dem End-of-Life verbundene Quoten:

R_2 Anteil Recycling im EoL [*dimensionslos*]

$1 - R_2$ Anteil Entsorgung auf Deponie im EoL [*dimensionslos*]

Die Summe aller beschriebenen Umweltauswirkungen resultiert in E_{Netto} als Netto-Umweltauswirkungen und inkludiert die Umweltauswirkungen über den gesamten Produktlebensweg, siehe nachfolgend. Eine Primärrohstoffeinsparung, folgend als Gutschrift bezeichnet, wird in E_{Netto} durch eine Subtraktion von E_P^* für vermiedenen Primärrohstoff modelliert.

Zur Veranschaulichung der beschriebenen Begrifflichkeiten werden nun die Umweltauswirkungen der in Abbildung 13 dargestellten *open loop recycling* Situation der Produkte A und B für die Wirkungskategorie *Klimaänderung* aufgezeigt. In Tabelle 1 werden die Parameter der Umweltauswirkungen beispielhaft festgelegt. Der Rohstoff für die Herstellung beider Produkte liegt in den Umweltauswirkungen ähnlich zu Aluminium und symbolisiert einen Rohstoff mit guter Verfügbarkeit an Sekundärrohstoff. *Produkt A* wird aus 100% Primärrohstoff hergestellt und nach Gebrauch

vollständig dem Recycling zugeführt. *Produkt B* wird aus 100% Sekundärrohstoff hergestellt und nach dem Gebrauch auf einer Deponie entsorgt.

Tabelle 1: Parameter *open loop recycling* Produkt A und Produkt B

Umweltauswirkungen	f_E 1 kg Produkt A (abgebend)	f_E 1 kg Produkt B (aufnehmend)
... der Rohstoffgewinnung	$R_{1,A} = 0$ $E_P = 12 \text{ kgCO}_2\text{eq./kg}$	$R_{1,B} = 1$ $E_S = 1,5 \text{ kgCO}_2\text{eq./kg}$
... aus End-of-Life	$R_{2,A} = 1$ $E_R = 1,5 \text{ kgCO}_2\text{eq./kg}$	$R_{2,B} = 0$ $E_D = 0,5 \text{ kgCO}_2\text{eq./kg}$

In Abbildung 14 werden die Umweltauswirkungen über den Produktlebensweg der Wirkungskategorie *Klimaänderung* für das beschriebene *open loop recycling* aus Abbildung 13, mit der Vereinfachung einer emissionslosen Herstellung bzw. eines emissionslosen Gebrauchs, dargestellt.

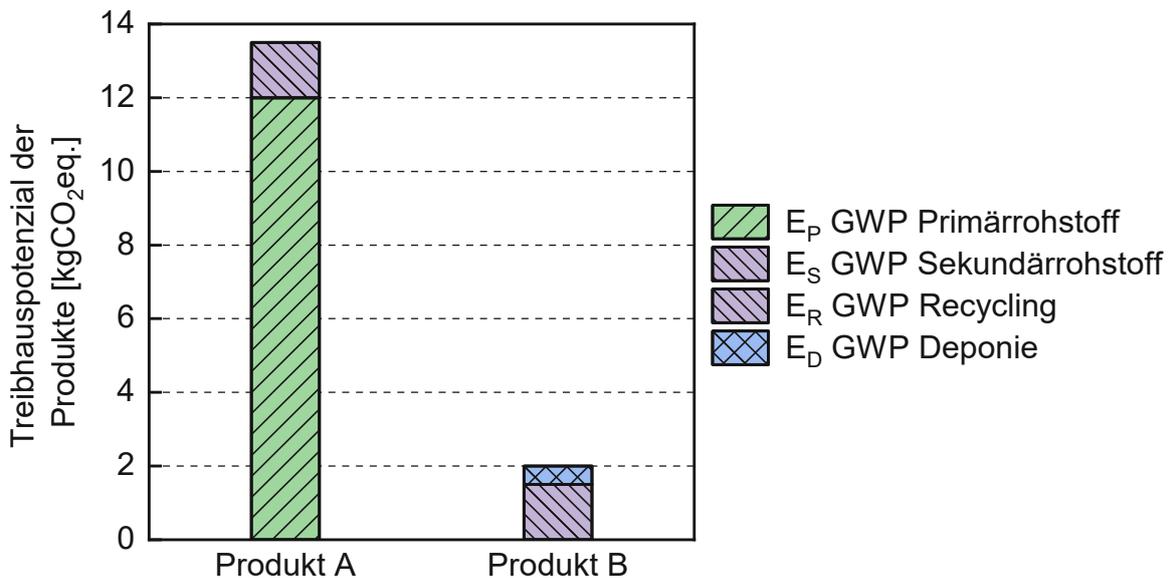


Abbildung 14: Treibhauspotenzial *open loop recycling* Produkt A und Produkt B

Aufgrund der Betrachtung von zwei unabhängigen Produktsystemen werden die Umweltauswirkungen für den Sekundärrohstoff zweimal bilanziert: beim „abgebenden“ *Produkt A* (Treibhauspotenzial Recycling) und beim „aufnehmenden“ *Produkt B* (Treibhauspotenzial Sekundärrohstoff). Würde man diese beiden Produktsysteme durch eine Verschiebung der Systemgrenze miteinander verknüpfen (Systemgrenze A+B in Abbildung 13), so würden die Umweltauswirkungen für die Wiederaufbereitung

des Rohstoffs nur einmal ins Gewicht fallen. Diese Systemerweiterung darf für den Fall des *open loop recycling* aber nicht durchgeführt werden, da beim Recycling im offenen Kreislauf keine Informationen über das aufnehmende Produktsystem bereitgestellt werden (Rohstoffrückfluss in die natürliche Umwelt). Aus Abbildung 14 ist ebenso ersichtlich, dass *Produkt A* für das Recycling gegenüber der Endlagerung auf einer Deponie mit einem höheren Treibhauspotenzial im EoL „bestraft“ wird. Aufgabe der Allokationsmethoden für Sekundärrohstoffe ist es, diese unfaire Verteilung der Umweltauswirkungen zu vermeiden und eine Verknüpfung von abgebenden bzw. aufnehmenden Produktsystem ohne komplexe Systemerweiterung zu ermöglichen. Es gibt verschiedene Allokationsmethoden, um die beschriebenen Umweltauswirkungen zwischen den Systemen A und B aufzuteilen [30, 31, 32].

Mit der Allokation 50:50 [30, 31] werden das abgebende und das aufnehmende Produktsystem gleichermaßen belastet. Abfallvermeidung und Rohstoffeinsparung werden beiden Systemen je zur Hälfte angelastet bzw. gutgeschrieben. Diese Allokationsmethode kann mit Gutschrift für vermiedenen Primärrohstoff (Formel 1) oder ohne Gutschrift (Formel 2) verwendet werden.

$$E_{Netto} = (1 - R_1) * E_P + \frac{R_1}{2} * E_S + \frac{R_2}{2} * (E_R - E_P^*) + (1 - R_2) * E_D \quad (1)$$

$$E_{Netto} = (1 - R_1) * E_P + \frac{R_1}{2} * E_S + \frac{R_2}{2} * E_R + (1 - R_2) * E_D \quad (2)$$

Mit der Allokation 100:0 [30, 31] wird die Gutschrift für Sekundärrohstoff dem abgebenden System zugeordnet. Man muss also nur das betrachtete Produktsystem im Detail kennen, da zwischen den Produktsystemen keine Belastungen oder Einsparungen verrechnet werden. Die Methode begünstigt den Einsatz von Sekundärrohstoffen und die damit verbundenen reduzierten Umweltauswirkungen. Vorhandenes Recycling (Quote R_2) wird nicht berücksichtigt, sondern lediglich der Anteil der Entsorgung auf einer Deponie (Quote $1 - R_2$) wird bilanziert (Formel 3).

$$E_{Netto} = (1 - R_1) * E_P + R_1 * E_S + (1 - R_2) * E_D \quad (3)$$

Die Allokation 0:100 [30, 31] belohnt die Bereitstellung von Sekundärrohstoff durch eine Gutschrift für vermiedenen Primärrohstoff (Formel 4). Allerdings wird bei dieser Methode der mögliche Einsatz von Sekundärrohstoff in der Herstellung nicht honoriert, sondern lediglich der Einsatz von 100% Primärrohstoff bilanziert.

$$E_{Netto} = E_P + R_2 * (E_R - E_P^*) + (1 - R_2) * E_D \quad (4)$$

Eine besondere Rolle nimmt die Allokation 100:100 [31] ein, welche eine Kombination der Allokationen 0:100 und 100:0 ist (Formel 5). Diese Allokationsmethode findet wenig Anwendung, da sie, durch den Einsatz von Sekundärrohstoff und Berücksichtigung von Recycling im EoL mit einer Gutschrift für vermiedenen Primärrohstoff, in einer übermäßigen Bewertung der Umweltauswirkungen resultiert. Die berechneten Umweltauswirkungen sind als übermäßig einzuschätzen, da bei dieser Methode die resultierenden Vorteile eines abgebenden und eines aufnehmenden Systems kombiniert werden. Je nach Anteil an verwendetem Sekundärrohstoff kann die Allokationsmethode negative Werte für E_{Netto} (Gutschrift höher als die Aufwendungen) liefern.

$$E_{Netto} = (1 - R_1) * E_P + R_1 * E_S + R_2 * (E_R - E_P^*) + (1 - R_2) * E_D \quad (5)$$

Die Allokationsmethode Circular Footprint Formula (CFF) [33] berücksichtigt die Marktrealitäten, also die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen. Tabelle 2 liefert einen Überblick, welche Marktsituation mit welchem Wert des Allokationsfaktors A widergespiegelt wird. Der Allokationsfaktor wird für jeden Rohstoff getrennt festgelegt.

$$E_{Netto} = (1 - R_1) * E_P + R_1 * (A * E_S + (1 - A) * E_P) + (1 - A) * R_2 * (E_R - E_P^*) + (1 - R_2) * E_D \quad (6)$$

A Allokationsfaktor für die Aufteilung von Lasten und Gutschriften zwischen dem abgebenden und aufnehmenden Produktsystem [*dimensionslos*]

Tabelle 2: Werte für Allokationsfaktor A. Quelle: [33]

Wert für A	Marktsituation
0,2	<i>Wenig Angebot an Sekundärrohstoff und große Nachfrage an Sekundärrohstoff – Fokus auf Recycling im EoL</i>
0,8	<i>Großes Angebot an Sekundärrohstoff und wenig Nachfrage an Sekundärrohstoff – Fokus auf Verwendung von Sekundärrohstoff</i>
0,5	<i>Ausgeglichene Situation für Angebot und Nachfrage an Sekundärrohstoff</i>
1	<i>Resultiert in Allokationsmethode 100:0</i>
0	<i>Resultiert in Allokationsmethode 0:100</i>

2.4.2 Vergleich der Allokationsmethoden für Sekundärrohstoffe

Zur Veranschaulichung und für eine Analyse werden für die Bestimmung des Treibhauspotenzials bzw. für die Modellierung des Recyclings eines beispielhaften Produkts die präsentierten Allokationsmethoden verglichen. Dabei werden in zwei Vergleichen die Allokationen ohne Gutschrift im EoL (Vergleich 1) getrennt von jenen mit Gutschrift (Vergleich 2) betrachtet.

Die Umweltauswirkungen der Herstellung orientieren sich erneut an Aluminium. In Tabelle 3 werden die für die Berechnung benötigten Parameter bereitgestellt.

Tabelle 3: Parameter für Bestimmung Umweltauswirkungen des Produkts

Umweltauswirkungen bezogen auf f_E 1 kg Produkt	
Treibhauspotenzial Primärrohstoff	$E_P = 12 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$
Treibhauspotenzial Sekundärrohstoff	$E_S = 1,5 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$
Anteil an Sekundärrohstoff	$R_1 = 0,4$
Treibhauspotenzial Recycling	$E_R = E_S = 1,5 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$
Treibhauspotenzial vermiedener Primärrohstoff	$E_P^* = E_P = 12 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$
Treibhauspotenzial Entsorgung (Deponie)	$E_D = 0,5 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$
Anteil Recycling im EoL	$R_2 = 0,85$

In Abbildung 15 werden für Vergleich 1 die Anwendung der Allokation 50:50 ohne Gutschrift (Formel 2) und die Allokation 100:0 (Formel 3) gegenübergestellt.

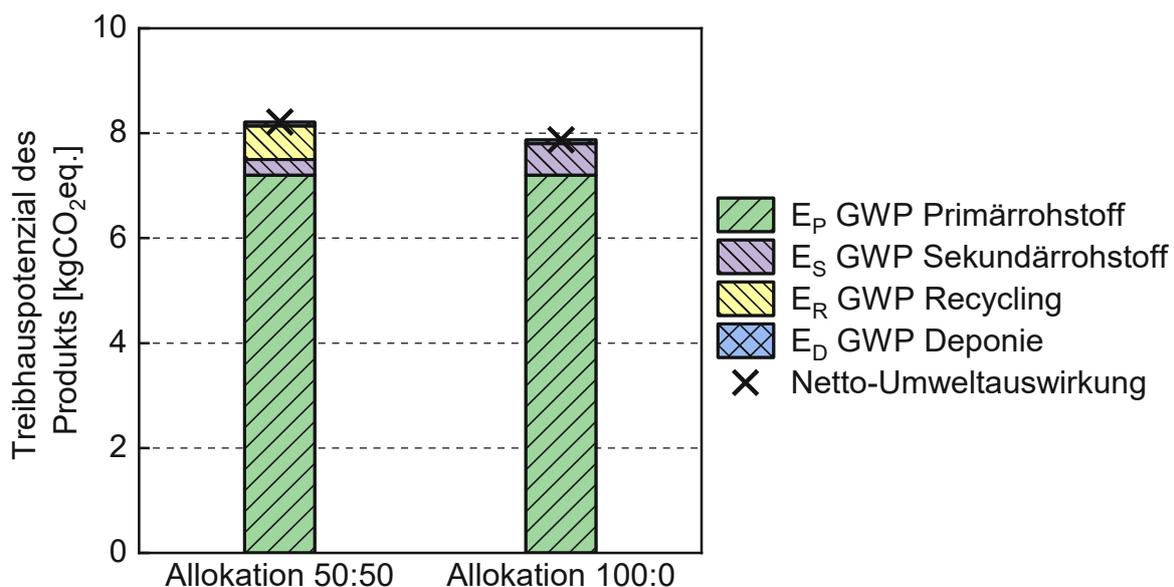


Abbildung 15: Bestimmung Treibhauspotenzial für das Produkt mit Allokationsmethoden ohne Gutschrift

Die Methode 100:0 zieht eine klare Grenze zwischen dem System, das den Sekundärrohstoff abgibt und dem System, das ihn aufnimmt. Das bedeutet, egal ob im Produkt Sekundärrohstoff verwendet wird oder nicht, es wird laut Definition dieser Allokationsmethode am Produktlebensende keinen Sekundärrohstoff durch Recycling zur Verfügung stellen. Die Methode 50:50 ist eine Mischform der Allokationen 100:0 und 0:100, bei der sowohl die reduzierten Umweltauswirkungen des Sekundärrohstoffs, aber auch der Aufwand für das Recycling im EoL bilanziert werden. Bei der Allokationsmethode 50:50 fallen die durch die Verwendung des Sekundärrohstoffes verrechneten Umweltauswirkungen niedriger aus, da diese Umweltauswirkungen auf zwei Produktsysteme aufgeteilt werden (Vergleich Definition: Abfallvermeidung und Rohstoffeinsparung werden abgebendem und aufnehmendem System je zur Hälfte angelastet bzw. gutgeschrieben).

Im Vergleich 2 werden die Allokationsmethoden gegenübergestellt, welche Gutschriften für vermiedenen Primärrohstoff berücksichtigen. In Abbildung 16 werden die Allokation 50:50 mit Gutschrift (Formel 1), die Allokation 0:100 (Formel 4), die Allokation 100:100 (Formel 5) und Allokation CFF (Formel 6) miteinander verglichen.

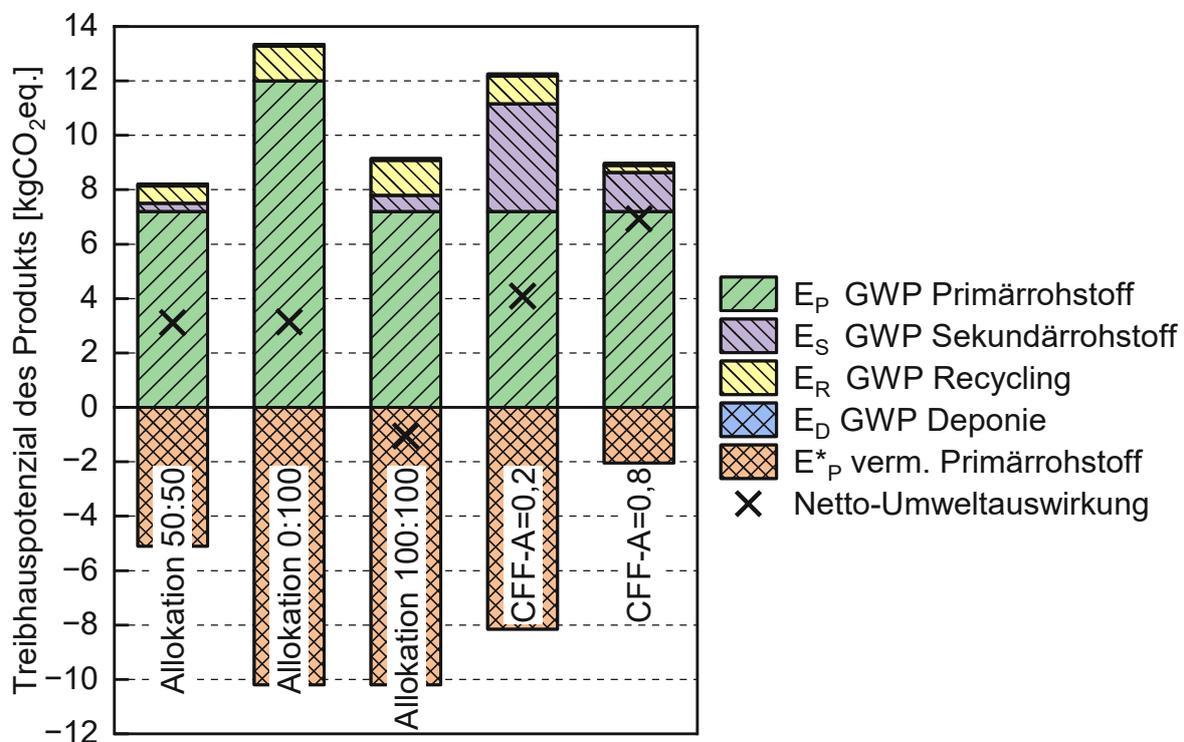


Abbildung 16: Bestimmung Treibhauspotenzial für das Produkt mit Allokationsmethoden mit Gutschrift

Durch die Gutschrift im EoL wird eine Reduktion der Netto-Umweltauswirkungen erreicht. Die Gutschrift für die Allokationsmethode 50:50 fällt im Vergleich mit der Allokationsmethode 0:100 kleiner aus, da die Methode 50:50 die Gutschrift auf zwei Produktlebenszyklen verteilt. Die Allokationsmethode CFF wurde mit zwei unterschiedlichen Faktoren A betrachtet. $A = 0,2$ legt den Fokus auf Recycling im EoL, während $A = 0,8$ den Fokus auf die reduzierten Umweltauswirkungen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen legt. Die Allokation 100:100 resultiert in einer negativen Netto-Umweltauswirkung, da die Gutschrift für vermiedenen Primärrohstoff größer ausfällt als die Summe der verrechneten Aufwände. Mit den gewählten Parametern für den Vergleich wird bei der Allokationsmethode 100:100 durch das Recycling im EoL mehr Primärrohstoff vermieden (0,85 kg), als für die Herstellung des Produktes Primärrohstoff eingesetzt wurde (0,60 kg). Vergleicht man [Abbildung 15](#) und [Abbildung 16](#) so fällt auf, obwohl die Ergebnisse innerhalb der Szenarien sehr ähnlich ausfallen, so ergibt sich unter Berücksichtigung der Gutschrift für vermiedenen Primärrohstoff, und aufgrund der hohen Recyclingquote (85%), im Durchschnitt eine Reduktion der Netto-Umweltauswirkungen um 50%. Die Unterschiede innerhalb der Allokationsmethoden mit Gutschrift können als Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem Abstecken der Produktsystemgrenze durch das Betrachten eines Produktlebenszyklus gegenüber zwei Produktlebenszyklen gedeutet werden.

Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass bei der Wahl der Allokationsmethode zunächst geklärt werden muss, ob es sich beim untersuchten Produktsystem um ein aufnehmendes oder abgebendes System handelt. Ebenso gilt es zu betonen, dass nur vorhandene Stoffströme bilanziert werden dürfen: die theoretische Möglichkeit von Recycling reicht nicht dazu aus, im EoL eine Gutschrift für dieses zu bilanzieren. Sofern keine Informationen oder nur grobe Schätzungen über den Anteil an Sekundärrohstoff bei der Produktherstellung vorhanden sind, aber das Recycling im EoL sichergestellt ist, empfiehlt sich die Verwendung der Allokation 0:100 [24]. Für allgemeine Produktsysteme bilden die 0:100-Methode, die 100:0-Methode sowie die CFF-Formel, die Realität am ehesten ab [31].

3 Anlagenbeschreibung

Dieser Abschnitt liefert die Eckdaten der zu bilanzierenden Anlage GG-CHP 2.7 der Firma GLOCK ecotech GmbH [34]. Das GLOCK GG-CHP 2.7 wird mit lagerfähigem Hackgut mit 13% Wassergehalt betrieben [35]. Die Anlage wird fertig verkabelt und verrohrt auf einer Plattform (*Plug&Play*) dem Kunden übergeben [11]. In Tabelle 4 werden die Nenn- und Betriebsdaten laut vorhandenen Messdaten der Anlage bereitgestellt. Für das BHKW werden 8.000 Betriebsstunden jährlich (Volllaststunden) und eine Gesamtlebensdauer von 20 Jahren angenommen. Über die Gesamtlebensdauer der Anlage müssen bestimmte Baugruppen gewartet werden. Ein *Motorservice* ist pro 600 Betriebsstunden fällig, das *große Service* wird pro 1500 Betriebsstunden durchgeführt. Der Zylinderkopf wird alle zwei Jahre getauscht, die Kolben jährlich. Die Anlage wird in Griffen (Österreich) hergestellt und betrieben.

Tabelle 4: Nenn- und Betriebsdaten GLOCK Strom-Wärmeleistungswerk GG-CHP 2.7
Quelle: [34, 36, 37, 38]

GLOCK GG-CHP 2.7	
Elektrische Leistung (gemessen)	52,7 kW
Thermische Leistung (gemessen)	98,8 kW
Mittlerer Hackschnitzelverbrauch W13	43,16 kg/h
Vorlauftemperatur	max. 105 °C
Abmessungen (Länge x Breite x Höhe)	5.000 x 3.600 x 3.000 mm
Gesamtmasse	8,6 t

Die vorhandenen Messdaten für die Berechnung der Wirkungsgrade beziehen sich auf die Hackschnitzel im Gaserzeuger mit 6% Wassergehalt (Angabe in Masse-%) [37, 38]. Dem Gaserzeuger werden Hackschnitzel W6 mit einem Massenstrom von 39,95 kg/h zugeführt. Der Heizwert dieser Hackschnitzel beträgt 4,85 kWh/kg [39, 40]. Der Gaserzeuger stellt einen Massenstrom von 96,63 kg/h Holzgas bereit. Für die bekannte Holzgas-Zusammensetzung (Vergleich [Abbildung 5](#)) beträgt der Heizwert 1,58 kWh/kg [12]. Durch Formel 7 ergibt sich der Kaltgaswirkungsgrad zu:

$$\text{Kaltgaswirkungsgrad} = \frac{(\text{Heizwert} * \text{Massenstrom})_{\text{Holzgas}}}{(\text{Heizwert} * \text{Massenstrom})_{\text{Hackschnitzel W6}}} = 78,8\% \quad (7)$$

Mit der bereitgestellten elektrischen Leistung von 52,7 kW und der Energie des Holzgases ergibt sich durch Formel 8 der Wirkungsgrad für VKM und Generator zu:

$$\text{Wirkungsgrad VKM + Generator} = \frac{\text{bereitgestellte elektr. Leistung}}{(\text{Heizwert} * \text{Massenstrom})_{\text{Holzgas}}} = 34,5\% \quad (8)$$

Bei Bilanzierung vom Heizwert der Hackschnitzel im Gaserzeuger bis zur bereitgestellten elektrischen Energie ergibt sich durch Formel 7 und Formel 8 ein elektrischer Wirkungsgrad von 27,2%. Der thermische Wirkungsgrad beträgt 51,0%, womit sich der Gesamtwirkungsgrad des GLOCK GG-CHP 2.7 zu 78,2% ergibt [37].

Dem GLOCK GG-CHP 2.7 werden Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von 13% zugeführt. Die Trockenmasse des Massenstroms 39,95 kg/h der Hackschnitzel W6 definiert den Massenstrom der Hackschnitzel W13 zu 43,16 kg/h. Um die Hackschnitzel W13 der Zufuhr auf den Wassergehalt W6 im Gaserzeuger zu trocknen, werden 2,13 kW benötigt, die durch die Rückführung von thermischer Energie bereitgestellt werden. Dabei handelt es sich um thermische Energie, die sich auf einem zu niedrigen Temperaturniveau befindet, um an das Wärmenetz abgegeben zu werden. Weiters müssen für den Betrieb der Anlage 0,60 kW elektrische Hilfsenergie, 0,12 l Biodiesel (RME) im Ölbadfilter und 0,17 l Motoröl pro Betriebsstunde bereitgestellt werden. Es werden 1,40 kg/h Restkoks und Asche ausgeschleust.

In [Abbildung 17](#) werden die eingesetzten bzw. ausgeworfenen Stoffmengen sowie die Input- und Output-Leistungen in einem Flussdiagramm zusammengefasst.

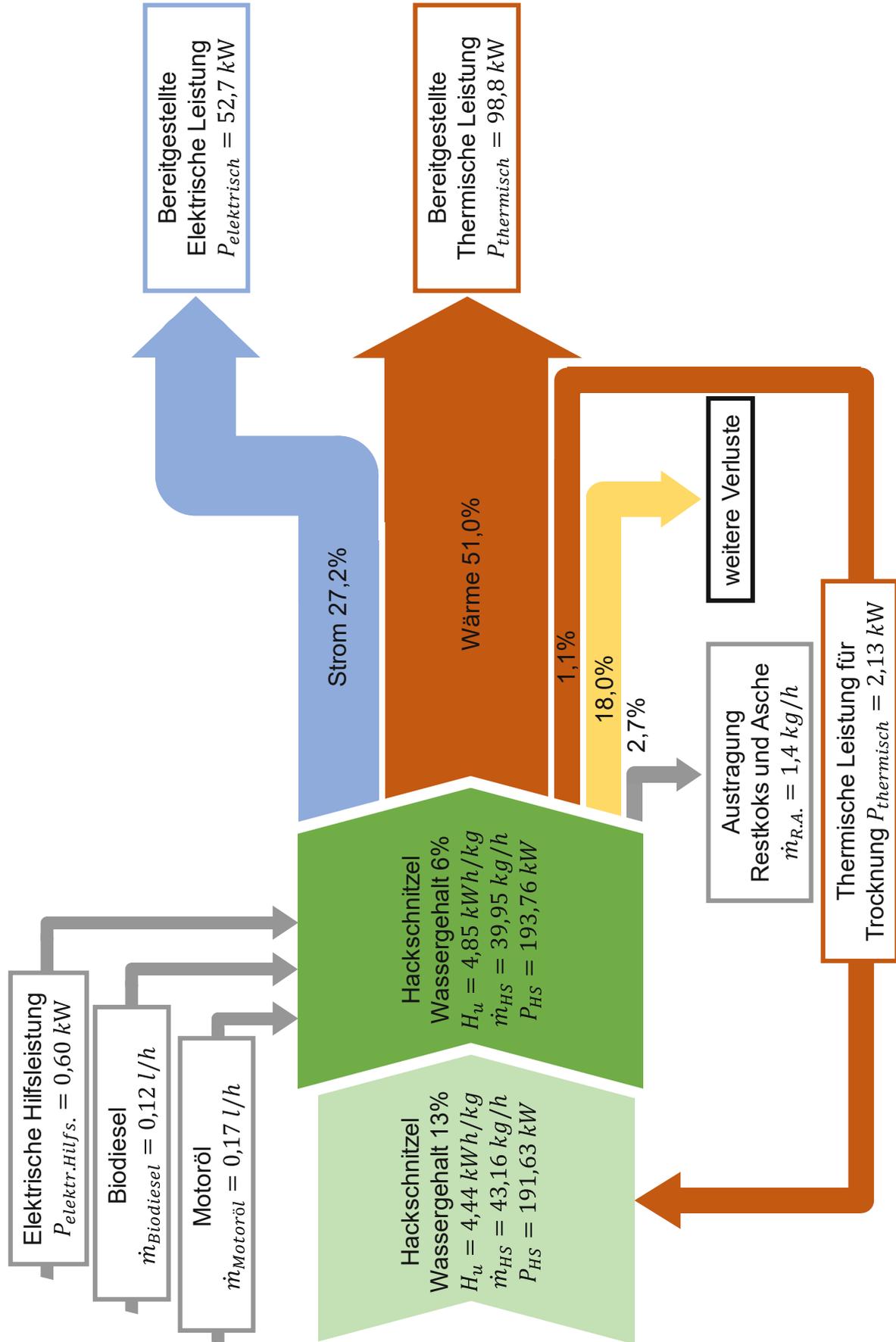


Abbildung 17: Sankey-Diagramm GLOCK GG-CHP 2.7

4 Methodik

Das folgende Kapitel behandelt die methodische Vorgehensweise für die Erstellung der Ökobilanz eines Holzgas-BHKW, die Wahl der Allokationsmethode und die Methodik der Informationsbeschaffung.

4.1 Modellierung der Ökobilanz eines Holzgas-BHKW

Eine Darstellung der berücksichtigten durchlaufenen Lebensphasen, die Systemgrenze, die Inputs und Outputs inklusive der Energie als funktionelle Einheit wird in [Abbildung 18](#) bereitgestellt. Vergleicht man diese Abbildung mit der allgemeinen schematischen Darstellung der Sachbilanz in [Abbildung 11](#), so wurde das Prozessmodul Distribution vernachlässigt. Diese Annahme wurde getroffen, da die untersuchte Anlage (GLOCK GG-CHP 2.7) nahe am Produktionsstandort in Betrieb genommen wird. Die Phasen Recycling und Abfallmanagement wurden zur Lebensphase End-of-Life zusammengefasst.

Als funktionelle Einheit wird die Bereitstellung von 1 kWh Energie definiert. Da das Holzgas-BHKW Energie in Form von Strom und Wärme zur Verfügung stellt, werden diese beiden Energieformen gleichwertig in der funktionellen Einheit berücksichtigt. Es werden alle Prozesse bis zur Systemgrenze berücksichtigt, die für die Einspeisung in das öffentliche Stromnetz bzw. für die Übergabe der Wärme an das Wärmenetz notwendig sind.

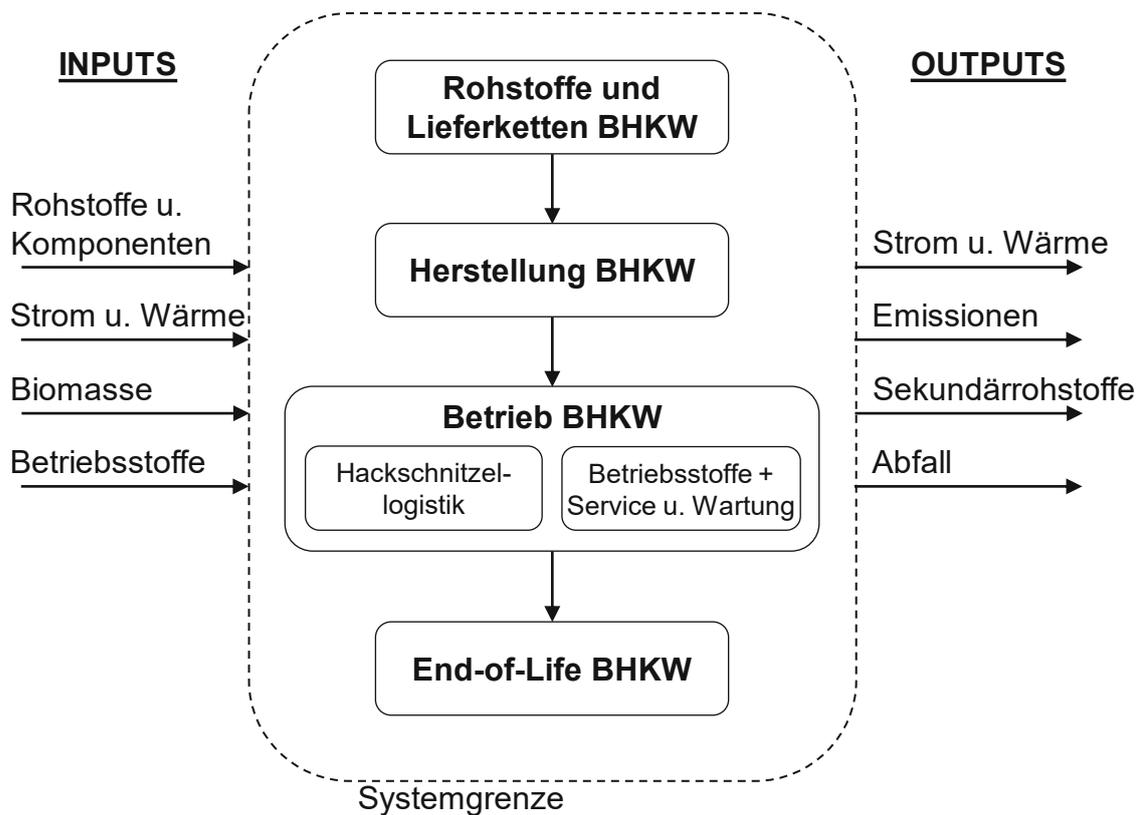


Abbildung 18: Darstellung Produktsystem, Systemgrenze und Inputs/Outputs BHKW

Auf der linken Seite von Abbildung 18 finden sich alle Energie- bzw. Stoffflüsse der Anlage, die von der natürlichen Umwelt über die Systemgrenze in das Produktsystem fließen. Dazu zählen die benötigten Rohstoffe und Komponenten für die Herstellung der Anlage sowie für den Austausch der Verschleißteile im Betrieb (Service und Wartung), die eingesetzten Betriebsstoffe, Strom und Wärme, sowie der Fluss an Biomasse (Hackschnitzel). Auf der Output-Seite finden sich alle Energie- bzw. Stoffflüsse, die über die Systemgrenze hinweg wieder an die natürliche Umwelt zurückgegeben werden. Neben dem bereitgestellten Strom und der bereitgestellten Wärme gehören dazu die damit verbundenen Emissionen, der Abfall und der Rückfluss an Sekundärrohstoffen aus dem Recycling im End-of-Life.

Die Sachbilanz gliedert sich in die vier identifizierten Lebensphasen: *Rohstoffe und Lieferketten BHKW*, *Herstellung BHKW*, *Betrieb BHKW* sowie *End-of-Life BHKW*. Die Sachbilanz der Lebensphase *Betrieb BHKW* wird aufgeteilt in die Sachbilanz der Betriebsstoffe und Service/Wartung sowie in die Sachbilanz der Hackschnitzelloistik.

Die Hackschnitzellogistik liegt laut Aufgabenstellung nicht im Fokus der Arbeit, wird jedoch inkludiert und mit einem reduzierten Umfang behandelt. Die Entsorgung der Rohstoffe und der zusätzlich anfallenden Abfälle (zum Beispiel Restkoks und Asche) wird gesammelt in der Sachbilanz der Lebensphase *End-of-Life BHKW* bilanziert.

4.2 Gewählte Allokationsmethode

Um zu vermeiden, dass im Zuge der Erstellung der Ökobilanz unsichere Abschätzungen über den eingesetzten Anteil an Sekundärrohstoffen gemacht werden müssen, wird die Allokationsmethode 0:100 gewählt.

Die Herstellung der Anlage (Lebensphase *Rohstoffe und Lieferketten BHKW*) sowie der Verschleißteile (Lebensphase *Betrieb BHKW*) werden als Primärrohstoff bilanziert. Durch Recycling im EoL wird eine Gutschrift für vermiedenen Primärrohstoff verrechnet (*quasi-closed loop recycling* – Vergleich Formel 4 aus [Kapitel 2.4.1](#)).

In der Lebensphase *End-of-Life BHKW* wird jedem Bilanzierungsmaterial eine Recyclingquote R (Quote in % laut [33]) zugewiesen. Eine Gutschrift für vermiedenen Primärrohstoff fällt also nur an, wenn es sich um einen recyclebaren Rohstoff handelt und dieser im untersuchten Produktsystem auch recycelt wird.

Der verbleibende Anteil der Entsorgung D (Quote in %, entspricht Anteil $1 - R$) wird mit der für Österreich üblichen Endverwertung für Müll bilanziert: Anteil Deponie 10% und Anteil Müllverbrennung 90% [33]. Für die aus den EoL-Prozessen resultierenden Energieströme, wie beispielsweise produzierter elektrischer Strom oder Wärme durch Müllverbrennung, werden Gutschriften für die vermiedene Strom- bzw. Wärmebereitstellung verrechnet.

4.3 Informationsbeschaffung

Als Basis für die Erstellung der Ökobilanz dienen die bereitgestellten Unterlagen der Firma GLOCK.

In der Sachbilanz werden mit Hilfe der Stücklisten der Anlagen-Baugruppen der Einsatz der Rohstoffe in der Lebensphase *Rohstoffe und Lieferketten BHKW* bilanziert. Jedem in den Stücklisten aufgezählten Rohstoff wurde ein Bilanzierungsmaterial

zugewiesen. Die vom Hersteller angegebenen Massen sind Netto-Massen ohne Berücksichtigung von Verschnitt. Aus diesem Grund wurde für jeden bilanzierten Rohstoff und jede Komponente bzw. über das zugewiesene Bilanzierungsmaterial eine Verschnittquote (in Masse-%) definiert und berücksichtigt.

Die eingesetzten Energiemengen in Form von Strom und Diesel für die Lebensphase *Herstellung BHKW* wurden mit Hilfe von GLOCK-Daten mittels Maschinenlisten und Einsatzzeiten modelliert. Dazu wurden für alle Maschinen aus diesem Katalog die Dauerlast (die durchschnittlich benötigte Leistung im Betrieb) sowie die Spitzenlast (die maximale Leistung im Betrieb) festgelegt. Anschließend wurde für jede Maschine die Zeit abgeschätzt, mit welcher diese mit mittlerer Last betrieben wird.

Die in der Lebensphase *Betrieb BHKW* (inkl. Hackschnitzellogistik) eingesetzten Stoff- und Energiemengen wurden auf Basis eines vom Hersteller beantworteten Fragenkatalogs modelliert. Annahmen zum Betrieb wie Volllaststunden (Wärmegeführt) und Gesamtlebensdauer wurden in Absprache mit GLOCK angenommen. Die durchschnittlich bereitgestellten Leistungen und die berechneten Wirkungsgrade basieren auf vorhandenen Messdaten. Für die während der Wartung gewechselten Verschleißteile wurde ein Service- und Wartungsplan samt Rohstoffeinsatz bereitgestellt. Die Hackschnitzellogistik wird mit Hilfe einer vereinfachten Modellierung der Logistikkette abgebildet.

Ergänzende Annahmen werden mit Verweis der Quelle dokumentiert.

5 Erstellung der Ökobilanz des BHKW

In diesem Kapitel werden die ersten drei Phasen der Durchführung einer Ökobilanz laut Norm behandelt.

5.1 Ziel der Ökobilanz

Das Ziel der durchgeführten Ökobilanz ist das Ermitteln der Umweltauswirkungen des GLOCK GG-CHP 2.7, mit Fokus auf Herstellung und Entsorgung der Anlage. Die Zielgruppe der Analyse ist das Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien. Die ermittelten Umweltauswirkungen sollen für vergleichende Aussagen herangezogen werden. Die Ergebnisse sind geschützt und nur eingeschränkt zur Veröffentlichung vorgesehen.

5.2 Festlegen des Untersuchungsrahmens

Der Fokus der Ökobilanz liegt laut Aufgabenstellung auf Herstellung und Entsorgung der Anlage. Die Hackschnitzellogistik ist Teil des Untersuchungsrahmens wird allerdings mit einer vereinfachten Modellierung abgebildet.

Definition Funktionelle Einheit

Als Funktionelle Einheit wird die Bereitstellung von 1 kWh Energie in Form von Strom und Wärme definiert (Bezeichnung: kWh_{FE}, Vergleich [Kapitel 4.1](#)). Als Übergabepunkte

der Wärme in das Wärmenetz bzw. der Einspeisung des elektrischen Stroms in das öffentliche Stromnetz werden die Zählpunkte am Betriebsstandort definiert.

Produktsystem und Systemgrenze

Das Produktsystem, die zu untersuchenden Lebensphasen, die Systemgrenze sowie Inputs und Outputs der Anlage werden in [Kapitel 4.1](#) durch [Abbildung 18](#) bereitgestellt. Die mit dem Einsatz von Rohstoffen, Komponenten und Betriebsstoffen verbundenen Umweltauswirkungen werden aus Datenbanken übernommen. In Abhängigkeit des Komplexitätsgrades werden zusammengesetzte Produkte mit einer eigenen Ökobilanz (Beispiel ein Kugelhahn) nach Möglichkeit nach Anteil der Materialien aufgetrennt und anhand dieser bilanziert. Sollte diese Auftrennung nicht möglich sein, werden vorhandene Ökobilanz-Studien verwendet. Die Annahmen für den Einsatz von Sekundärrohstoffen sind in [Kapitel 4.2](#) festgehalten.

Es wird kein Abschneidekriterium festgelegt. Alle Massen, die von Seiten des Herstellers in Stücklisten und Datenblättern bereitgestellt wurden, werden auch bilanziert. Der Hersteller hat sämtliche Massen übermittelt, wodurch die Bilanzierung als vollständig gelten kann. Außerhalb der Systemgrenze befinden sich neben der Infrastruktur wie Straßen, Wärmenetz und Gebäude, auch jegliche Fahrzeuge, Maschinen und Geräte, welche für die Herstellung des BHKW bzw. für die Hackschnitzellogistik benötigt werden. Hilfsstoffe wie beispielsweise Gas für das Schweißen, benötigte Schleifscheiben oder Bohrer werden ausgeklammert. Zusätzliche Vereinfachungen werden an den entsprechenden Stellen in der Sachbilanz angemerkt. Es gibt keine Nebenprodukte mittels Allokation zu berücksichtigen.

Methode der Wirkungsabschätzung

In der vorliegenden Ökobilanz wird die Wirkungskategorie *Klimaänderung* mit dem Sachbilanzergebnis *Menge an Treibhausgas je funktioneller Einheit* bilanziert. Der Wirkungsindikator *Verstärkung der Infrarotstrahlung in W/m²* resultiert im Wirkungsindikatorwert der Emissionen *in Kilogramm der CO₂-Äquivalente je funktioneller Einheit*. Als Charakterisierungsmodell wird das *Szenario „Baseline“ über 100 Jahre des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*

herangezogen. Der dazugehörige Charakterisierungsfaktor ist das *Treibhauspotenzial* (GWP_{100}) für jedes Treibhausgas (kg CO₂-Äquivalent/kg Gas).

Zusätzlich wird der *Kumulierte Energieaufwand* (KEA) zur Untersuchung des Einsatzes von erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Primärenergie für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung des BHKW bestimmt.

5.3 Modellierungssoftware und Datensammlung

Die Berechnung der Wirkungsabschätzung erfolgt mit Hilfe der Modellierungssoftware *GaBi* (Version 9.2.1.68). *GaBi* stellt neben einer Modellierungssoftware auch eine umfassende Datenbank bereit. Mit Hilfe dieser integrierten Datenbank kann der Großteil der zu untersuchenden Stoff- und Energieflüsse bilanziert werden. Die verwendete Datenbank ist die *Education Database 2020*.

Prozesse und Bilanzierungsmaterialien, die nicht Teil dieser integrierten Datenbank sind, wurden mittels einer Literaturrecherche ergänzt.

5.4 Sachbilanz des BHKW

Im folgenden Abschnitt werden die notwendigen Inputs sowie die anfallenden Outputs für die Lebensphasen des GLOCK GG-CHP 2.7 in Form von Tabellen aufgelistet. Außerdem werden die Vorgehensweisen der Bilanzierung der Lieferketten und verwendeten Verpackungsmaterialien sowie die Modellierung der Hackschnitzel-logistik erläutert.

5.4.1 Sachbilanz Rohstoffe und Lieferketten BHKW

Die Sachbilanz der Lebensphase *Rohstoffe und Lieferketten BHKW* wird zweigeteilt behandelt. Zu Beginn werden die Stoffflüsse der Bilanzierungsmaterialien für die 14 Baugruppen des BHKW erfasst. Anschließend werden auf Grundlage der eingesetzten Rohstoffe die Lieferketten bilanziert.

In Abbildung 19 werden die Gesamtmassen nach Baugruppen ohne Berücksichtigung des Verschnitts, sowie die Bilanzierungsmaterialien und die nicht weiter teilbaren Komponenten der Baugruppen dargestellt.

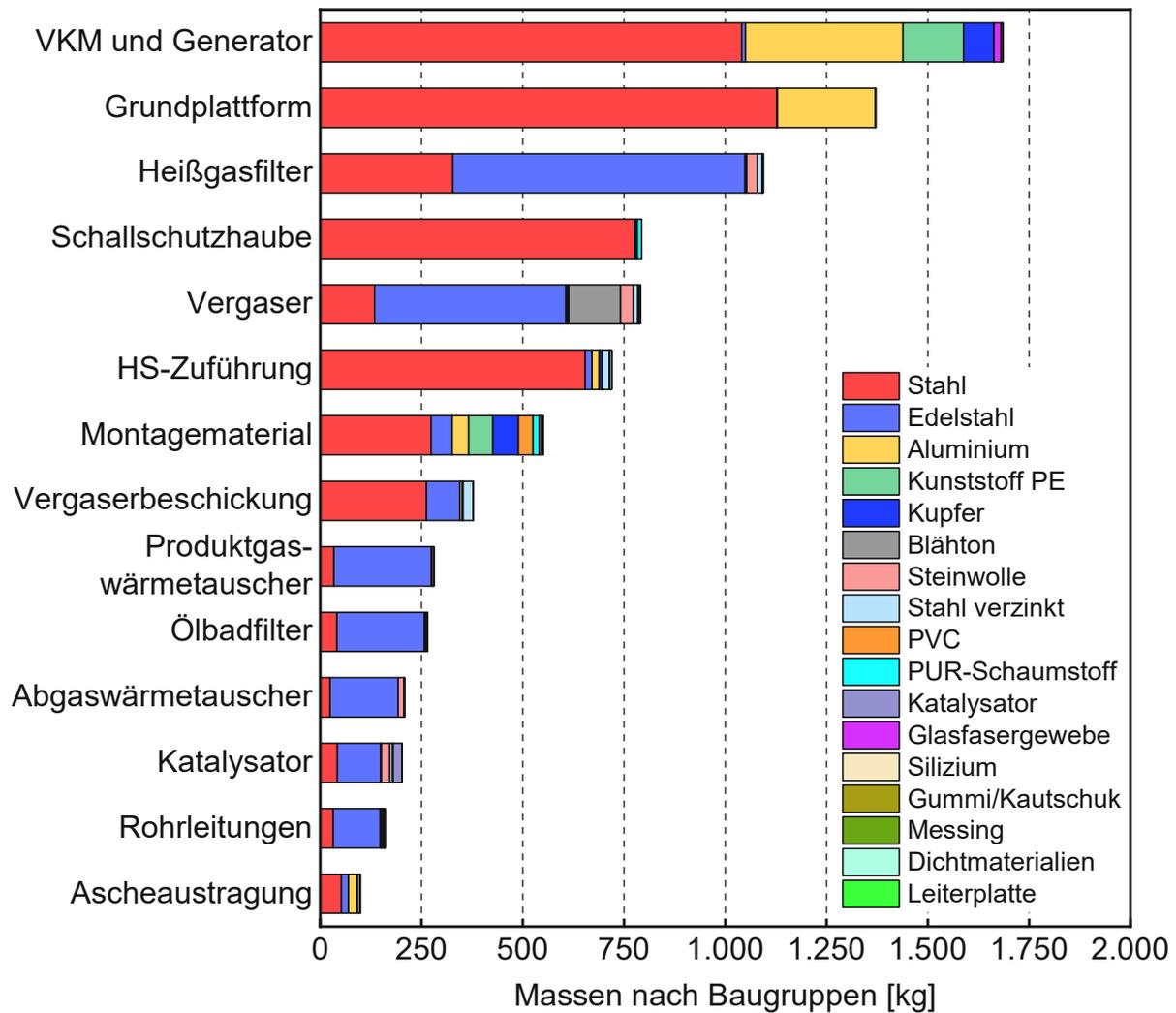


Abbildung 19: Massen nach Baugruppen des BHKW

Für die Herstellung des BHKW werden insgesamt 8,6 t Rohstoffe (ohne Verschnitt), aus 23 verschiedenen Materialien und zwei Komponenten, eingesetzt. In [Tabelle 5](#) sind die Inputs der Materialien der Lebensphase *Rohstoffe und Lieferketten BHKW* zusammengefasst. Hier werden die Bilanzierungsmaterialien aller Baugruppen inklusive Berücksichtigung des Verschnitts gemeinsam in einer Sachbilanz dargestellt.

Tabelle 5: Sachbilanz Materialien für *Rohstoffe und Lieferketten BHKW*

INPUT		
Material	Masse [kg]	Davon Verschnitt beim Hersteller [%]
Stahl	5.029,57	4
Edelstahl	2.336,66	5
Aluminium	769,30	5
Kunststoff PE	222,82	4
Kupfer	160,49	5
Blähton	131,00	2
Steinwolle	103,55	5
Stahl verzinkt	100,94	10
PVC	40,77	5
PUR-Schaumstoff	29,20	10
Glas	17,78	1
Silizium	6,24	10
Gummi/Kautschuk	5,92	10
Messing	4,90	10
NBR 70	4,69	11
Klingersil C4400	4,09	5
Kunststoff PA	3,50	6
Novamica Thermex	3,29	6
Flexitallic Thermiculite 815	3,24	6
Rotguss (Rotmessing)	3,01	10
TPE-A	1,51	13
Silikondichtschnur	0,47	21
Glasfasergewebe	0,04	0

In Tabelle 6 werden die in den Baugruppen des BHKW berücksichtigten Komponenten bereitgestellt. Die aufgelisteten Komponenten wurden auf Basis bestehender Ökobilanzen modelliert.

Tabelle 6: Sachbilanz Komponenten für *Rohstoffe und Lieferketten BHKW*

INPUT		
Komponente	Masse [kg]	Davon Verschnitt beim Hersteller [%]
Katalysator	23,00	4
Leiterplatte	2,25	9

Für jedes Material sowie jede Komponente werden auf Basis des in der Datenbank angegebenen Produktionsstandorts die Lieferketten bis nach Griffen abgeschätzt. Es werden fünf Transportarten unterschieden: Transport mit Zug nicht EU, Transport mit LKW nicht in EU, Transport mit Schiff, Transport mit Zug in EU, Transport mit LKW in EU. Die gesamte Lieferleistung für diese Lebensphase beläuft sich auf 17.850,00 tkm. Die Aufteilung nach Transportart ist in Tabelle 7 bereitgestellt.

Tabelle 7: Sachbilanz Lieferleistung für *Rohstoffe und Lieferketten BHKW*

INPUT	
Transport mit	Lieferleistung [tkm]
Zug nicht EU	1.830,00
LKW nicht EU	90,00
Schiff	20,00
Zug in EU	12.020,00
LKW in EU	3.890,00

Die verwendeten Verpackungsmaterialien werden auf Basis der gesamten zu transportierenden Massen abgeschätzt. Dabei werden für die Verpackungen folgende Quoten angenommen (Angabe in Masse-%): Holz 2,0%, Karton 0,5%, Styropor und Plastikfolie jeweils 0,2%. Insgesamt werden in dieser Lebensphase 265,00 kg Verpackungsmaterialien eingesetzt. Die Aufteilung nach Verpackungsmaterial ist in Tabelle 8 bereitgestellt.

Tabelle 8: Sachbilanz Verpackungsmaterial für *Rohstoffe und Lieferketten BHKW*

INPUT	
Verpackungsmaterial	Masse [kg]
Holz	181,00
Karton	46,00
Styropor	19,00
Plastikfolie	19,00

5.4.2 Sachbilanz Herstellung BHKW

In der Lebensphase *Herstellung BHKW* werden alle notwendigen Inputs berücksichtigt, um aus den genannten Material- bzw. Komponenten-Inputs das GLOCK GG-CHP 2.7 zu fertigen. Zu den Inputs zählen die eingesetzten Energiemengen für den Betrieb der Fertigungsmaschinen in Form von elektr. Strom und Kraftstoff (beispielsweise Diesel für Gabelstapler) sowie der aufgetragene Lack der Anlage. Die Mengen sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Sachbilanz *Herstellung BHKW*

INPUT	
Bezeichnung	Menge [MWh]
Elektr. Strom (AT-Mix)	2,50
Bezeichnung	Masse [kg]
Kraftstoff (Diesel)	116,90
Lack	13,50

5.4.3 Sachbilanz Betrieb BHKW

Die Sachbilanz der Lebensphase *Betrieb BHKW* teilt sich in die Sachbilanz der Betriebsstoffe und Service/Wartung sowie in die Sachbilanz für die Hackschnitzellogistik (Vergleich Abbildung 18).

Sachbilanz für Betriebsstoffe und Service/Wartung

In dieser Sachbilanz werden die Betriebsstoffe der Anlage, wie etwa Motoröl und Biodiesel (RME), sowie die Verschleißteile, die während der durchgeführten Wartungen des BHKW ausgetauscht werden, bilanziert. Im *Motor-service* werden hauptsächlich Zündkerzen und Luftfilter gewechselt sowie Motoröl nachgefüllt. Im *großen Service* werden ergänzend dazu noch einige Komponenten im Gaserzeuger (Baugruppe Vergaser), beispielsweise das Oberteil der Pyrolyse, die Filterkerzen sowie verschiedene Dichtungen, erneuert. Zusätzlich werden die gesamten Füllmengen des Motoröls und Biodiesels gewechselt. In Tabelle 10 werden die Inputs der Betriebsstoffe und Service/Wartung für das gesamte Produktleben bereitgestellt.

Tabelle 10: Sachbilanz Betriebsstoffe und Service/Wartung

INPUT			
<i>Betriebsstoffe</i>	Bezeichnung	Menge [MWh]	Davon Verschnitt beim Hersteller [%]
	Elektr. Strom (AT-Mix)	96,00	-
	Bezeichnung	Masse [kg]	Davon Verschnitt beim Hersteller [%]
	Motoröl	24.254,00	-
	Biodiesel (RME)	16.614,00	-
<i>Motorservice</i>	Bezeichnung	Masse [kg]	Davon Verschnitt beim Hersteller [%]
	Motoröl	6.675,00	-
	Stahl	1.014,60	5
	Kunststoff PE	373,80	10
<i>Großes Service</i>	Bezeichnung	Masse [kg]	Davon Verschnitt beim Hersteller [%]
	Motoröl	7.383,00	-
	Biodiesel (RME)	8.025,00	-
	Edelstahl	27.242,20	5
	Stahl verzinkt	1.444,50	10
	Kunststoff PE	599,20	10
	Stahl	406,60	5
	Novamica Thermex	353,10	5
	Flexitallic Thermiculite 815	331,70	5
	Klingersil C4400	96,30	5
NBR 70	32,10	10	
<i>Zylinderkopf</i>	Bezeichnung	Masse [kg]	Davon Verschnitt beim Hersteller [%]
	Stahl	189,00	5
<i>Kolben</i>	Bezeichnung	Masse [kg]	Davon Verschnitt beim Hersteller [%]
	Stahl	150,10	5

Nach demselben Schema wie für die Sachbilanz in [Kapitel 5.4.1](#) werden für den Materialeinsatz, der sich aus dem Austausch der Verschleißteile ergibt, die Lieferketten bis nach Griffen abgeschätzt und die eingesetzten Massen der Verpackungsmaterialien berechnet. Die gesamte Lieferleistung beträgt 90.880,00 tkm. [Tabelle 11](#) zeigt die Aufteilung nach Transportart.

Tabelle 11: Sachbilanz Lieferleistung für Betriebsstoffe und Service/Wartung

INPUT	
Transport mit	Lieferleistung [tkm]
LKW nicht EU	1.070,00
Schiff	2.140,00
Zug in EU	59.580,00
LKW in EU	28.090,00

In Tabelle 12 wird der Input für die abgeschätzten Verpackungsmaterialien der Verschleißteile aufgelistet. Insgesamt müssen 1.060,60 kg Verpackungsmaterialien in dieser Lebensphase bereitgestellt werden.

Tabelle 12: Sachbilanz Verpackungsmaterial für Betriebsstoffe und Service/Wartung

INPUT	
Verpackungsmaterial	Masse [kg]
Holz	682,30
Karton	190,90
Styropor	93,70
Plastikfolie	93,70

Sachbilanz der Hackschnitzellogistik

Der spezifische Heizwert H_u der Hackschnitzel kann in Abhängigkeit des Wassergehalts w , ausgehend vom spezifischen Heizwert $H_{u,atro}$ pro Kilogramm absolut trockenem Nadelholz, durch Formel 9 bei $L = 0,68 \text{ kWh/kg}$ (bezogen auf 20 °C) berechnet werden [15, 40].

$$H_u(w) = H_{u,atro} * (1 - w) - L * w \quad (9)$$

w Wassergehalt in [%]

$H_u(w)$ spezifischer Heizwert in Abhängigkeit Wassergehalt in [kWh/kg]

$H_{u,atro}$ spezifischer Heizwert absolut trockenes Nadelholz W_0 in [kWh/kg]

L Verdampfungsenthalpie Wasser in [kWh/kg]

Die Schüttdichte in Abhängigkeit des Wassergehaltes wird aus Literaturwerten bestimmt [39, 41]. Die benötigte Masse der Hackschnitzel wird auf Basis des in Kapitel 3 angegebenen Massenstroms von $39,65 \text{ kg/h}$ von Hackschnitzel aus Nadelholz mit einem Wassergehalt von 6% ermittelt. Die Trockenmasse dieses Massenstroms (W_0) definiert die Masse der notwendigen Hackschnitzel mit

W13 (Zufuhr BHKW), die Masse mit W25 (Lufttrocken) sowie die Masse aus dem Wald mit W45 (Fällung). Die Übersicht wird in Tabelle 13 bereitgestellt.

Tabelle 13: Übersicht Hackschnitzel Heizwert, Schüttdichte, Masse, Energieinhalt, Volumen in Abhängigkeit des Wassergehalts

Wassergehalt	W0	W13	W25	W45
Bezeichnung	Absolut trocken	Zufuhr BHKW	Lufttrocken	Fällung
Heizwert [kWh/kg]	5,20	4,44	3,73	2,56
Schüttdichte [kg/Srm]	175	185	205	278
Masse [t]	6.008	6.906	8.011	10.923
Energieinhalt [MWh]	31.242	30.663	29.882	27.963
Volumen [Srm]	34.332	37.330	39.079	39.292

Für die Sachbilanz der Hackschnitzellogistik wurde eine vereinfachte Modellierung einer Logistikkette mit den bekannten Prozessschritten aus Kapitel 2.2 durchgeführt. Die Ernte des Holzes bzw. die Bereitstellung der Hackschnitzel wird über den Kraftstoffeinsatz durch den Einsatz von Harvester, Forwarder und LKW-Hacker modelliert. Die Bereitstellung von 1 t Hackschnitzel bis zum Waldrand, aus Nadelholz mit einem Wassergehalt von 45%, wird auf Basis von Werten aus der Literatur für die benötigte Einsatzzeit und dem Kraftstoffverbrauch (Diesel) der eingesetzten Fahrzeuge und Maschinen bilanziert [16, 42, 43, 44]. Tabelle 14 liefert eine Übersicht für die Berechnung des Diesel-Einsatzes nach Verfahrensschritt.

Tabelle 14: Übersicht Hackschnitzelbereitstellung bis zur Waldgrenze

Verfahrensschritte	Einsatzzeit Maschine [h/t]	Diesel-Verbrauch Maschine [kg/h]	Diesel-Einsatz pro Tonne-Hackschnitzel [kg/t]
1. Ernten/Fällen: Harvester	0,15	10	1,50
2. Rücken/Poltern: Forwarder	0,18	17	3,10
3. Hacken: LKW-Hacker	0,05	42	2,10

Für den Betrieb des GLOCK GG-CHP 2.7 werden insgesamt 10.923 t Hackschnitzel mit 45% Wassergehalt benötigt. Für die Ernte und das Hacken des Holzes werden 73.184,10 kg Diesel eingesetzt. Nach Bereitstellung der Hackschnitzel am Waldrand werden diese laut Angabe von GLOCK im Durchschnitt 60 km bis zum Betriebsstandort nach Griffen transportiert. Die Anlieferung erfolgt durch einen Container-LKW mit 35 m³ Ladevolumen [16]. Mit dem Schüttgewicht der Hackschnitzel

von 278 kg/m³ (lose Aufschüttung: 1 Srm entspricht 1 m³ siehe [Tabelle 13](#)), ergibt sich eine Zuladung von 9,73 t Hackschnitzel pro Fahrt und somit eine Lieferleistung von 1.167,60 tkm pro Fahrt. Der Diesel-Verbrauch von 20,59 g/tkm ergibt sich mit Hilfe des Faktors für die Beladung des verwendeten Container-LKW für die Wegstrecken von der Waldgrenze bis zum Betriebsstandort und der Leerfahrt zurück (siehe Anhang [Tabelle A5](#)). Bei benötigten 1.123 Fahrten für die Anlieferung der Hackschnitzel ergibt sich eine Lieferleistung von ca. 1,3 Mio.-tkm. Am Betriebsstandort werden die Hackschnitzel natürlich (mit Lufttrocknung von Wassergehalt 45% bis 25%) und technisch vor-getrocknet (bis Wassergehalt 13%). Die Menge der benötigten Wärme für die Vor-Trocknung ergibt sich aus der Differenz des Energiegehaltes der Hackschnitzel W25 und W13 aus [Tabelle 13](#) zu 781,00 MWh. Für das Vor-Trocknen der Hackschnitzel müssen ca. 1,1 kt Wasser verdampft werden, womit sich ein spezifischer Energieeinsatz von 0,71 kWh/kg-Wasser ergibt. Dieser Wert weist eine gute Übereinstimmung mit Richtwerten aus der Literatur auf [10, 45, 46]. Für die Vor-Trocknung wird Wärme aus einem BHKW verwendet. Die Inputs für die Hackschnitzellogistik sind in [Tabelle 15](#) zusammengefasst.

Tabelle 15: Sachbilanz Hackschnitzellogistik

INPUT	
Bezeichnung	Masse [kg]
Diesel für Ernte und Hacken des Holzes	73.184,10
Bezeichnung	Lieferleistung [tkm]
Container-LKW für HS-Transport	1.311.214,80
Bezeichnung	Menge [MWh]
Wärme für Vor-Trocknung aus BHKW	781,00

Sachbilanz Betrieb BHKW

Die Sachbilanz für die Lebensphase *Betrieb BHKW* ergibt sich aus den Inputs der beiden Teil-Sachbilanzen „Betriebsstoffe und Service/Wartung“ sowie „Hackschnitzellogistik“. Als Output dieser Lebensphase wird die bereitgestellte Energie in Form von Strom und Wärme bilanziert. Mit der Angabe der elektrischen bzw. thermischen Leistung aus [Tabelle 4](#), ergibt sich über die Gesamtlebensdauer der Output von 8.432,00 MWh elektr. Strom und 15.808,00 MWh Wärme. Laut Abgasmessprotokoll [38] wurden als Abgasemissionen CO, CO₂, HC und NO_x gemessen. Die Emission von Kohlenstoffdioxid (CO₂) wird nicht bilanziert, da der hier freigesetzte

Kohlenstoff zuvor von den Bäumen während des Wachstums aus der Atmosphäre aufgenommen wurde. Die Emissionen von Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoff (HC) tragen nicht zur untersuchten Wirkungskategorie *Klimaänderung* bei und werden deshalb nicht bilanziert (Vergleich [26]). Stickoxide (NO_x) sind flüchtige Verbindungen, denen ein indirektes Treibhauspotenzial (Auswirkungen auf andere Treibhausgase) zugeschrieben wird. Da die Emission lokal stattfindet ist diese nicht zu bilanzieren (siehe [47]). Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Sachbilanz *Betrieb BHKW*

INPUT	
Bezeichnung	Verweis
Input Sachbilanz Betriebsstoffe und Service/Wartung	Tabellen 10, 11,12
Input Sachbilanz Hackschnitzellogistik	Tabelle 15
OUTPUT	
Bezeichnung	Menge [MWh]
Elektr. Strom	8.432,00
Wärme	15.808,00

5.4.4 Sachbilanz End-of-Life BHKW

Die Sachbilanz für das End-of-Life behandelt sämtliche Stoffströme für die Entsorgung bzw. für das Recycling. Für die Lebensphase *Rohstoffe und Lieferketten BHKW* werden auf Grundlage der in Kapitel 4.2 erläuterten Methodik die Masse an bereitgestelltem Sekundärrohstoff durch Recycling sowie die zu entsorgenden Abfallmassen bilanziert. Zur Lebensphase *Herstellung BHKW* gehören die Entsorgung des angefallenen Verschnitts aus der Fertigung des BHKW sowie die Entsorgung der Verpackungsmaterialien aus den Lieferketten. Aus der Lebensphase *Betrieb BHKW* werden die ausgeschleusten Mengen an Restkoks und Asche (werden nicht weiterverwendet) sowie die Entsorgung der Stoffströme aus den Wartungen bilanziert. Zu den EoL-Stoffströmen aus den Wartungen zählen neben der Entsorgung bzw. Recycling der Rohstoffe der ausgetauschten Komponenten, der Entsorgung der ersetzten Füllmengen des Motoröls auch die Entsorgung der Verpackungsmaterialien aus den Lieferketten. Die Energieströme aus den EoL-Entsorgungsprozessen, in Form des produzierten elektrischen Stroms bzw. der produzierten Wärme, werden ebenso bilanziert. Die Outputs sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Sachbilanz *End-of-Life BHKW*

OUTPUT		
Rohstoffe und Lieferketten BHKW	Bezeichnung	Masse [kg]
	Recycling Stahl	4.098,20
	Recycling Edelstahl	1.890,96
	Recycling Aluminium	618,72
	Recycling Kupfer	129,01
	Recycling Blähton	102,40
	Recycling Stahl verzinkt	77,30
	Recycling Glas	8,80
	Recycling Messing	3,74
	Recycling Silizium	2,82
	Recycling Rotguss (Rotmessing)	2,30
	Recycling Katalysator	8,80
	Recycling Leiterplatte	0,82
	Entsorgung Metall auf Deponie gesammelt	1.206,40
	Entsorgung Verschnitt Deponie Glas/Blähton	34,40
	Entsorgung Müllverbrennung gesammelt	376,62
Entsorgung Deponie gesammelt	40,24	
Herstellung BHKW	Bezeichnung	Masse [kg]
	Entsorgung Verpackungsmaterial gesammelt zu Müllverbrennung	238,50
	Entsorgung Verpackungsmaterial gesammelt auf Deponie	26,50
	Entsorgung Verschnitt Metall auf Deponie	381,66
	Entsorgung Verschnitt Deponie Glas/Blähton	3,18
	Entsorgung Verschnitt nichtmetallische Materialien in Müllverbrennung	19,67
Entsorgung Verschnitt nichtmetallische Materialien auf Deponie	2,19	
Betrieb BHKW	Bezeichnung	Masse [kg]
	Recycling Edelstahl	23.155,87
	Recycling Stahl	1.496,26
	Recycling Stahl verzinkt	1.227,83
	Entsorgung Verpackungsmaterial gesammelt zu Müllverbrennung	954,54
	Entsorgung Verpackungsmaterial gesammelt auf Deponie	106,06
	Entsorgung Metall auf Deponie	4.567,04
	Entsorgung Müllverbrennung gesammelt	1.607,58
	Entsorgung Deponie gesammelt	178,62
	Entsorgung Asche	64.000,00
	Entsorgung Restkoks	160.000,00
Entsorgung Motoröl	14.058,00	
EoL-Energie	Bezeichnung	Menge [MWh]
	Elektr. Strom aus EoL-Prozessen	1,13
	Wärme aus EoL-Prozessen	2,49

6 Umweltauswirkungen des BHKW

Durch das Zusammenführen der Sachbilanzergebnisse und die Durchführung der Wirkungsabschätzung werden die Umweltauswirkungen des GLOCK GG-CHP 2.7 bestimmt. In der Auswertung der Wirkungskategorie *Klimaänderung* sowie des *Kumulierten Energieaufwands* werden signifikante Parameter des Produktsystems abgeleitet, welche anschließend in der Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

6.1 Auswertung des Produktsystems

6.1.1 Klimaänderung

Für das GLOCK GG-CHP 2.7 wurde über das gesamte Produktleben hinweg ein Treibhauspotenzial (GWP) von 612 tCO₂eq. ermittelt. Um den CO₂-Emissionsfaktor des BHKW zu bestimmen, werden die über die Gesamtlebensdauer bereitgestellte thermische und elektrische Energie (Output aus Tabelle 16) laut gewählter funktioneller Einheit (f_E) herangezogen. Der CO₂-Emissionsfaktor gibt an, wieviel CO₂eq. pro kWh_{fE} erzeugter Energie ausgestoßen wird.

$$CO_2 - \text{Emissionsfaktor} = 25,24 \text{ gCO}_2\text{eq./kWh}_{fE}$$

Abbildung 20 zeigt die Zusammensetzung des Treibhauspotenzials nach den untersuchten Lebensphasen.

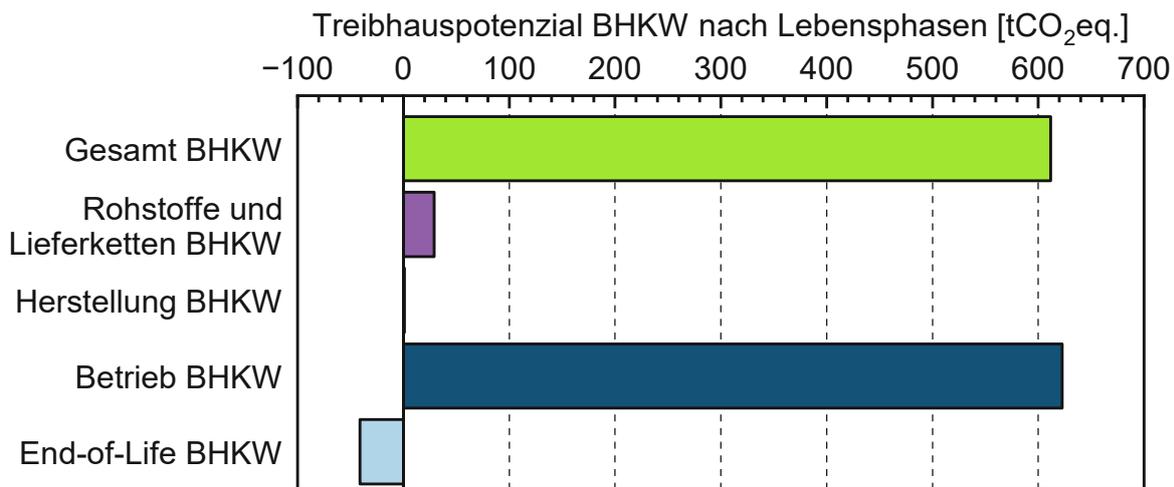


Abbildung 20: Treibhauspotenzial BHKW nach Lebensphasen

Aus der Darstellung des Treibhauspotenzials nach Lebensphasen wird ersichtlich, dass es sich beim BHKW um ein nutzungsintensives Produkt handelt. Mit 623 tCO₂eq. stammt der Großteil der verursachten Treibhausgasemissionen (ca. 95,4%) aus der Betriebsphase des BHKW. Aufgrund der langen Gesamtlebensdauer der Anlage und der hohen mit dem Betrieb verbundenen Treibhausgasemissionen haben die Rohstoffe und Herstellprozesse des GLOCK GG-CHP 2.7 einen geringen Anteil am Treibhauspotenzial. Durch das Recycling im End-of-Life kann das Treibhauspotenzial um 41 tCO₂eq. reduziert werden. Die detaillierte Übersicht des Treibhauspotenzials nach den Lebensphasen wird im Anhang bereitgestellt (siehe [Tabelle A7](#)).

Unter Berücksichtigung des Fokus der durchgeführten Ökobilanz, werden Herstellung und Entsorgung des GLOCK GG-CHP 2.7 genauer untersucht. Das Treibhauspotenzial der Rohstoffe (ohne Berücksichtigung des Verschnitts) beträgt 27,0 tCO₂eq. Zusammen mit der Gesamtmasse der eingesetzten Rohstoffe von 8,6 t ergibt sich ein durchschnittliches massenspezifisches Treibhauspotenzial von 3,1 kgCO₂eq./kg. [Abbildung 21](#) zeigt auf Basis der eingesetzten Materialien das massenspezifische Treibhauspotenzial für jede Baugruppe.

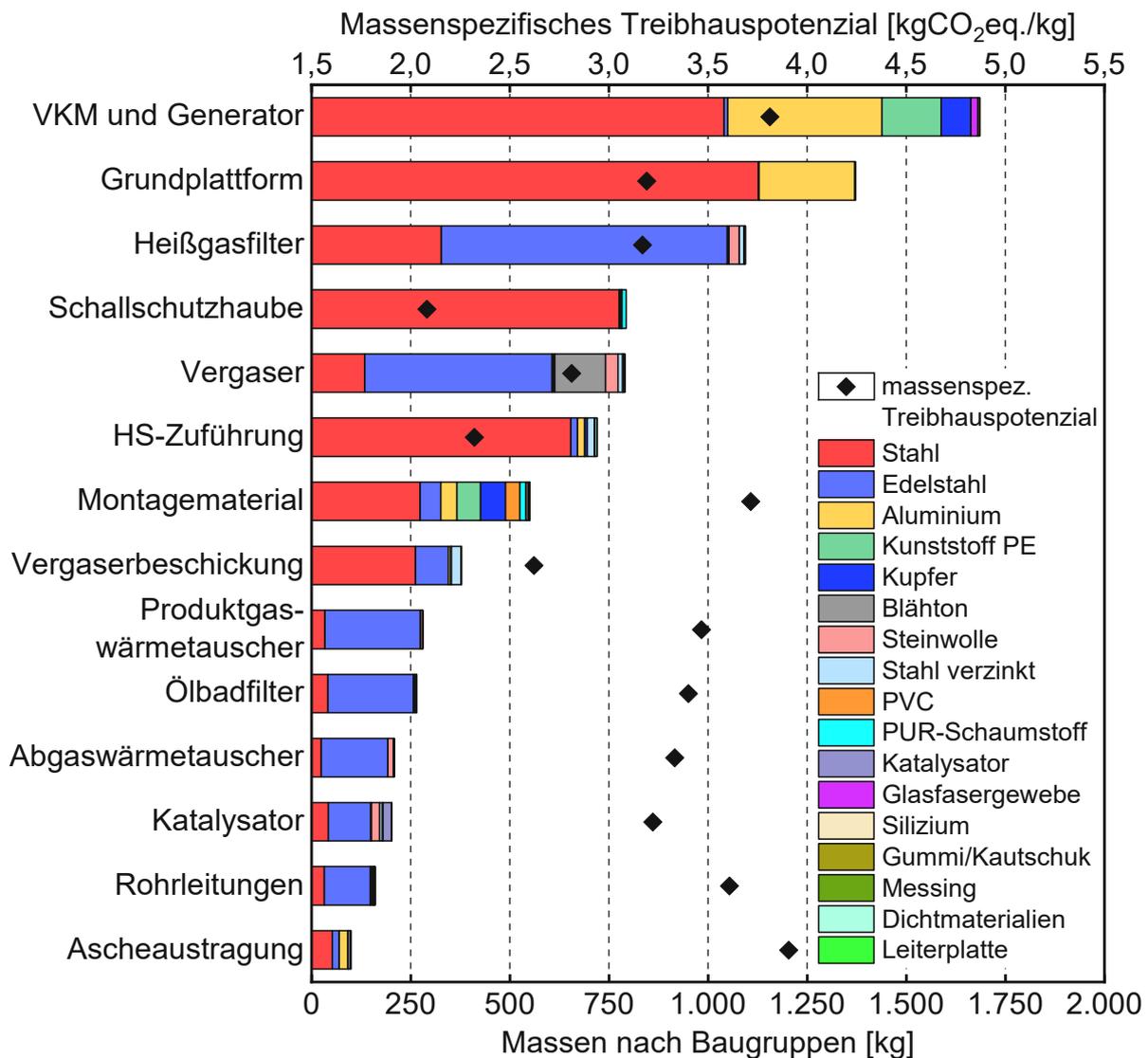


Abbildung 21: Massenspezifisches Treibhauspotenzial nach Baugruppen

Am Beispiel der Schallschutzhaube ist gut erkennbar, wie sich der Anteil an eingesetztem Stahl auf das massenspezifische Treibhauspotenzial der Baugruppe auswirkt. Wird in einer Baugruppe anteilmäßig viel Stahl eingesetzt, liegt das massenspezifische Treibhauspotenzial niedrig und nahe bei dem von Stahl (2,0 kgCO₂eq./kg). Übersicht siehe Anhang Tabelle A3). Werden Aluminium (8,9 kgCO₂eq./kg) oder Edelstahl (3,7 kgCO₂eq./kg) verbaut, so steigt das massenspezifische Treibhauspotenzial der Baugruppe deutlich an (Vergleich Baugruppe VKM und Generator bzw. Heißgasfilter). Ein hoher Anteil an verbautem Stahl erweist sich in Bezug auf das Treibhauspotenzial als positiv. Aus der Abbildung ist ebenso der hohe Anteil an verwendeten metallischen Rohstoffen ersichtlich, woraus sich ein großes Potenzial für

Recycling ergibt. Für die metallischen Rohstoffe werden Recyclingquoten in Höhe von 85% (auf Masse bezogen) angenommen [33]. Glas wird zu 50% recycelt [33] und Blähton zu 80% (eigene Annahme).

Im End-of-Life werden aus der Herstellung des GLOCK GG-CHP 2.7 insgesamt 6,8 t Metalle und 0,1 t andere Materialien (Glas, Blähton) recycelt. Für die restliche Abfallbehandlung ergeben sich 1,2 t Metall auf Deponie und 0,5 t andere Materialien (verwendete Kunststoffe bzw. Dichtungen) für Deponie bzw. Verbrennung. Unter Berücksichtigung des Recyclings kann das Treibhauspotenzial der Herstellung um 10,3 tCO₂eq. (-38,1%) reduziert werden. In Abbildung 22 werden das Treibhauspotenzial sowie die Reduzierung des Treibhauspotenzials nach Berücksichtigung des Recyclings für jede Baugruppe dargestellt.

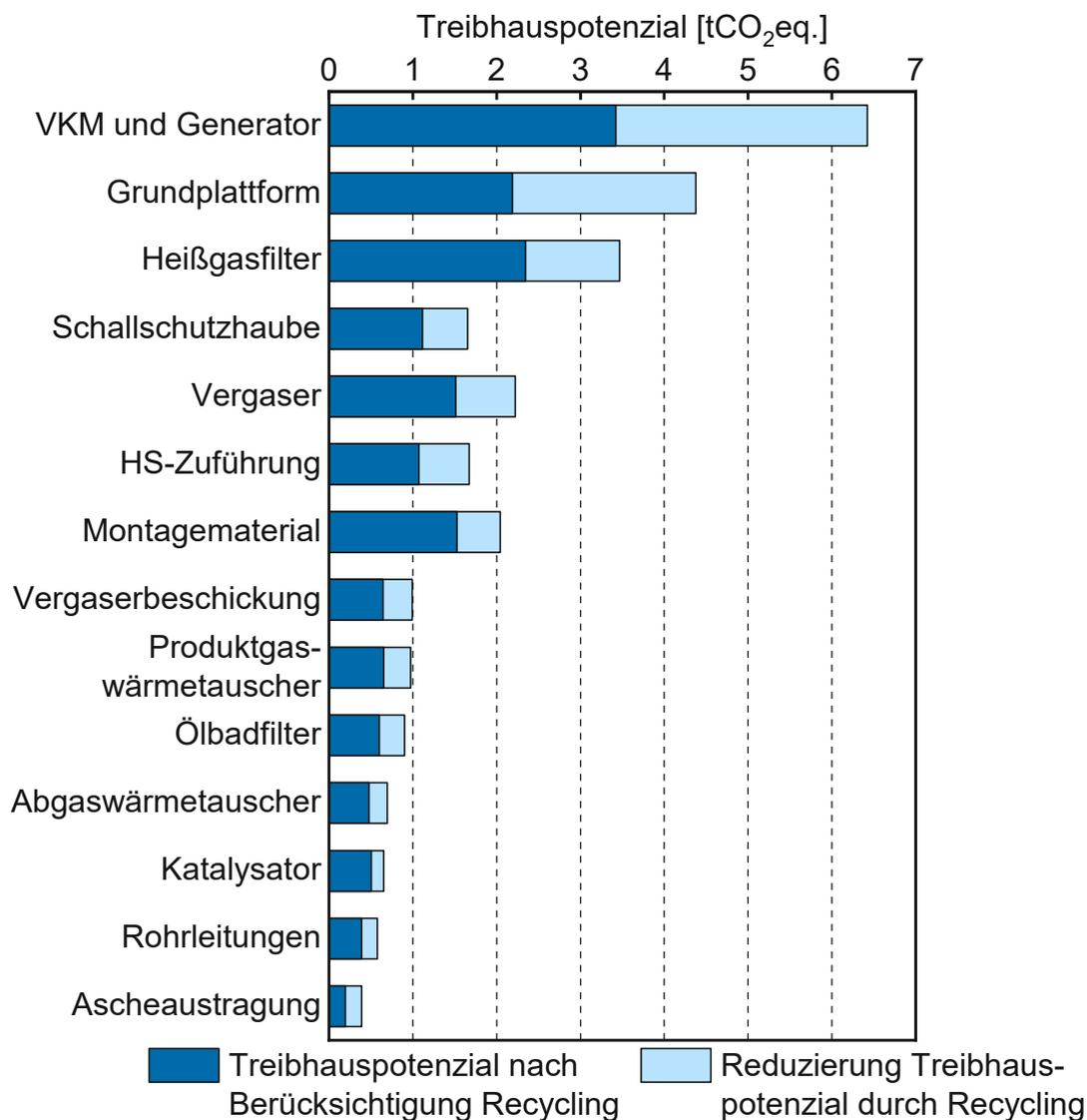


Abbildung 22: Reduzierung Treibhauspotenzial durch Recycling nach Baugruppen

Aus der Darstellung ist der Einfluss der Materialzusammensetzung der Baugruppe gut ableitbar. Im Allgemeinen gilt: je größer der Anteil an metallischen Rohstoffen in einer Baugruppe ist, desto größer fällt die Reduzierung des Treibhauspotenzials durch das Recycling aus. Beispielsweise wird unter Berücksichtigung des Recyclings das Treibhauspotenzial der Baugruppe Grundplattform, welche hauptsächlich aus Stahl und Aluminium besteht, halbiert. Die Entsorgung von Materialien auf einer Deponie bzw. durch Verbrennung erhöht das GWP. In Summe wird das Treibhauspotenzial der Herstellung durch das Recycling auf 16,7 tCO₂eq. reduziert.

Aufgrund ihrer Signifikanz wird die Betriebsphase des GLOCK GG-CHP 2.7 genauer untersucht. Zu diesem Zweck werden die Lebensphasen *Rohstoffe und Lieferketten BHKW* sowie *Herstellung BHKW* zur Kategorie Herstellung zusammengefasst. Die Lebensphase *Betrieb BHKW* wird weiter in die Kategorien Betriebsstoffe und elektr. Strom, Service und Wartung sowie Hackschnitzzellogistik aufgeschlüsselt. In [Abbildung 23](#) wird die Zusammensetzung des CO₂-Emissionsfaktors nach den definierten Kategorien dargestellt.

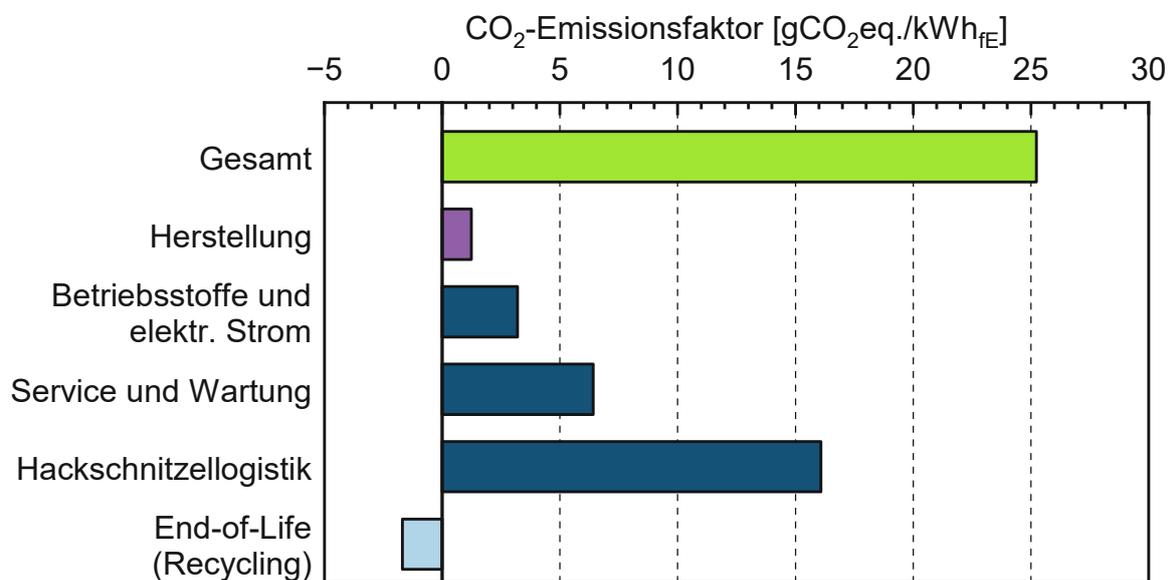


Abbildung 23: Zusammensetzung des CO₂-Emissionsfaktors

Die Kategorie Betriebsstoffe und elektr. Strom trägt mit 3,20 gCO₂eq./kWh_{fE} zum CO₂-Emissionsfaktor des GLOCK GG-CHP 2.7 bei, die Kategorie Service und Wartung mit 6,41 gCO₂eq./kWh_{fE}. Mit 16,08 gCO₂eq./kWh_{fE} hat die Hackschnitzzellogistik einen besonders großen Anteil an den Treibhausgasemissionen des BHKW.

Die drei Kategorien der Betriebsphase werden nun im Detail genauer analysiert. Abbildung 24 zeigt die Aufschlüsselung der Zusammensetzung des Emissionsfaktors für Betriebsstoffe und elektr. Strom sowie für Service und Wartung.

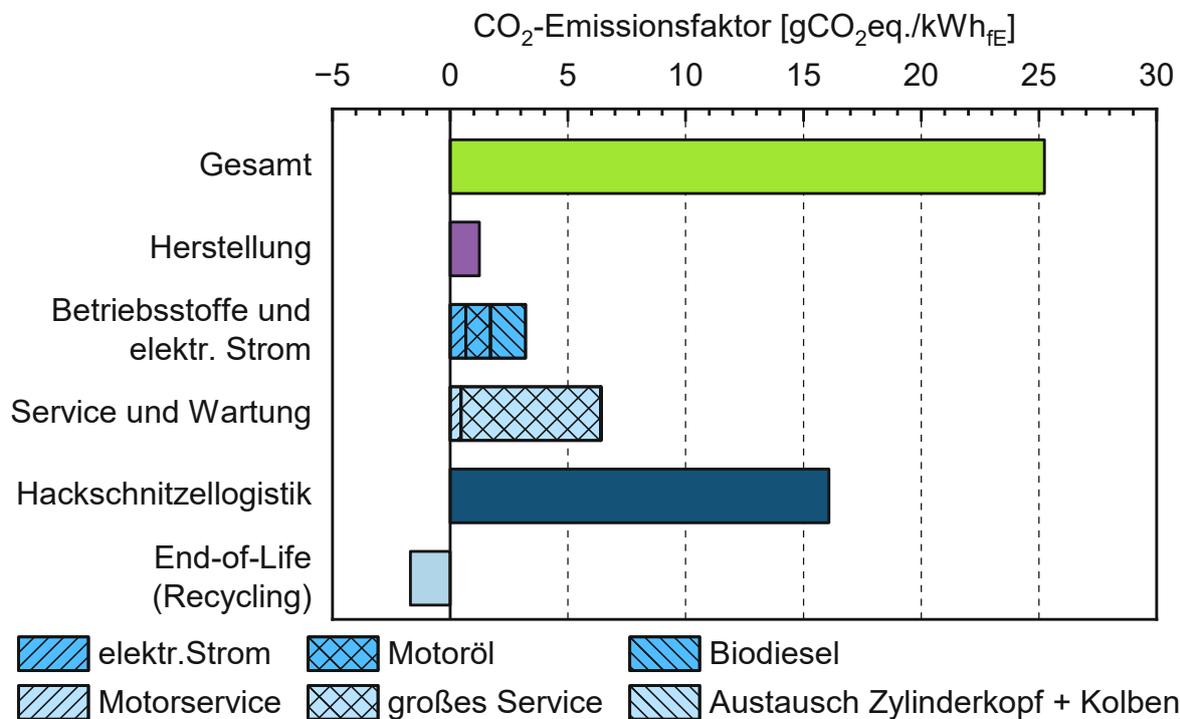


Abbildung 24: Aufschlüsselung der Zusammensetzung des CO₂-Emissionsfaktors für Betriebsstoffe und Service/Wartung

Knapp die Hälfte der Treibhausgasemissionen innerhalb der Kategorie Betriebsstoffe und elektr. Strom sind dem Einsatz des Biodiesels im Ölbadfilter zuzuschreiben, während ein Drittel auf die Nachfüllmenge des Motoröls entfällt. Der CO₂-Emissionsfaktor für das *große Service* beträgt 5,92 gCO₂eq./kWh_{fE} und ist damit für 92,3% der Treibhausgasemissionen der Kategorie Service und Wartung verantwortlich. Dieser Wert liegt deshalb so hoch, weil bei jedem *großen Service* (Wartungsintervall 1.500 h) unter anderem ca. 285 kg Materialien, davon 255 kg Edelstahl, ausgetauscht werden. Über die Gesamtlebensdauer der Anlage werden für Service und Wartung 32,2 t Materialien benötigt. Zum Vergleich: in der Herstellung des BHKW werden 8,6 t Materialien eingesetzt. Insgesamt können aus Service und Wartung 25,9 t Materialien recycelt werden, weshalb der Großteil (82,2%) des Recyclings im End-of-Life dieser Kategorie zuzuordnen sind.

Abbildung 25 zeigt die Aufschlüsselung der Hackschnitzellogistik nach: Bereitstellung der Hackschnitzel bis zur Waldgrenze durch Harvester, Forwarder und LKW-Hacker, Transport mit Container-LKW zum Betriebsstandort sowie Vor-Trocknung der Hackschnitzel.

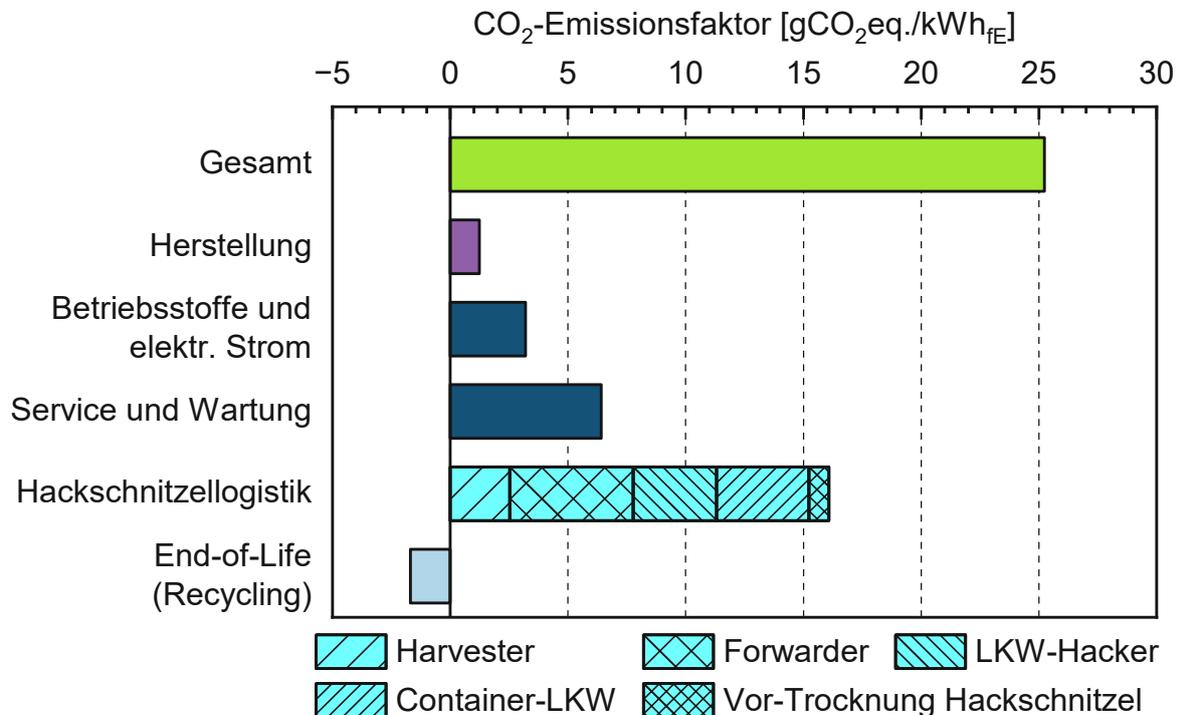


Abbildung 25: Aufschlüsselung der Zusammensetzung des CO₂-Emissionsfaktors für Hackschnitzellogistik

Die Bereitstellung der Hackschnitzel bis zur Waldgrenze verursacht Treibhausgasemissionen in Höhe von 11,32 gCO₂eq./kWh_{fE}. Davon entfallen ca. 46,3% auf den Einsatz des Forwarders und ca. 31,4% auf den LKW-Hacker. Die Treibhausgasemissionen des Transports durch Container-LKW betragen 3,92 gCO₂eq./kWh_{fE}, die der Vor-Trocknung 0,84 gCO₂eq./kWh_{fE}. Da die Logistikkette mit Hilfe einer vereinfachten Modellierung abgebildet wurde, wird das Ergebnis an dieser Stelle mit Werten aus der Literatur verglichen und validiert. Werden die Treibhausgasemissionen der Bereitstellung der Hackschnitzel bis zum Waldrand auf die bereitgestellte Masse der Hackschnitzel bezogen, so ergeben sich Emissionen von ca. 25 gCO₂eq./kg-Hackschnitzel. Um das Ergebnis der Bereitstellung einzuordnen, wurden Vergleichswerte aus der Literatur herangezogen, die bei 17 gCO₂eq. [48], 19 gCO₂eq. [49] und 37 gCO₂eq. [50] pro kg-Hackschnitzel liegen. Das Ergebnis der vereinfachten Modellierung weist eine gute Übereinstimmung mit den Literaturwerten auf.

6.1.2 Kumulierter Energieaufwand

Der *Kumulierte Energieaufwand* (KEA) für das GLOCK GG-CHP 2.7 wurde unter Berücksichtigung des Einsatzes von erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Primärenergie zu 32.220 MWh ermittelt. Ähnlich zum CO₂-Emissionsfaktor aus dem vorherigen Abschnitt wird für den KEA der Primärenergieeinsatz-Faktor (total) bestimmt. Dieser Faktor gibt an, wie viel erneuerbare und nicht-erneuerbare Primärenergie pro kWh_{fE} eingesetzt wird.

$$\text{Primärenergieeinsatz – Faktor(total)} = 1,33 \text{ kWh/kWh}_{fE}$$

Abbildung 26 zeigt Verteilung des Primärenergieeinsatzes (total) nach den untersuchten Lebensphasen des BHKW.

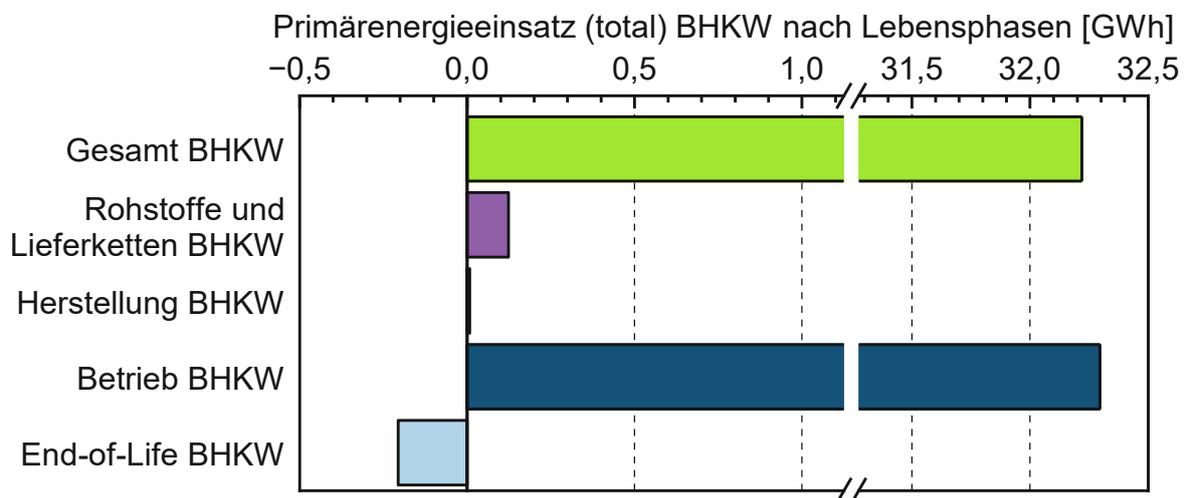


Abbildung 26: Primärenergieeinsatz (total) BHKW nach Lebensphasen

Bei der Auswertung des Primärenergieeinsatzes des GLOCK GG-CHP 2.7 bestätigt sich die Aussage, dass es sich um ein nutzungsintensives Produkt handelt. Im Betrieb werden insgesamt 32.295 MWh Primärenergie eingesetzt, wovon 94,6% der Hackschnitzellogistik zuzuschreiben sind. Der Primärenergieeinsatz der Hackschnitzellogistik berücksichtigt neben dem Primärenergieeinsatz für die Bereitstellung der Hackschnitzel (Einsatz von Diesel) auch den Heizwert der eingesetzten Biomasse. Da der Großteil des Primärenergieeinsatzes aus dem Heizwert der Hackschnitzel resultiert, ergibt sich der Anteil des erneuerbaren Primärenergieeinsatzes zu 91,6%. Durch das Recycling im End-of-Life können 206 MWh Primärenergie eingespart werden. Eine detaillierte Übersicht des KEA nach den Lebensphasen wird im Anhang

bereitgestellt (siehe [Tabelle A8](#)). Der Einsatz von nicht-erneuerbarer Primärenergie nach den Lebensphasen wird in [Abbildung 27](#) dargestellt.

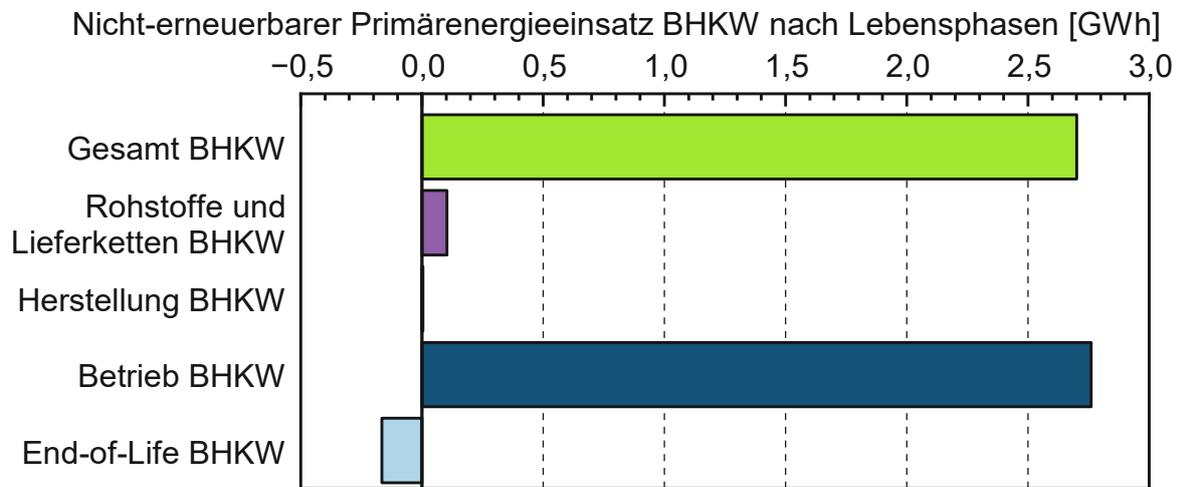


Abbildung 27: Nicht-erneuerbarer Primärenergieeinsatz BHKW nach Lebensphasen

Der Großteil des Primärenergieeinsatzes der Rohstoffe in der Herstellung des BHKW ist nicht-erneuerbare Primärenergie (83,4%). Durch Recycling kann ca. ein Drittel davon eingespart werden. Im Betrieb werden 2.760 MWh nicht-erneuerbare Primärenergie eingesetzt, wovon 1.515 MWh dem verbrauchten Diesel der Hackschnitzellogistik zuzuschreiben sind. Auf die Nachfüllmengen des Biodiesels entfallen 63 MWh und auf das verbrauchte Motoröl im Betrieb 374 MWh. Insgesamt werden durch das Recycling im End-of-Life 166 MWh nicht-erneuerbare Primärenergie eingespart. Die detaillierte Auflistung des Einsatzes von nicht-erneuerbarer Primärenergie wird im Anhang bereitgestellt (siehe [Tabelle A9](#)).

6.2 Sensitivitätsanalysen

Die Sensitivitätsanalysen dienen dazu das Ergebnis der Ökobilanz zu validieren und auf Unsicherheiten zu überprüfen. Aus der Auswertung der untersuchten Wirkungskategorien wurden die Recyclingquote im End-of-Life, die Gesamtlebensdauer des BHKW, die Menge der eingesetzten Betriebsstoffe und das Wartungsintervall des BHKW (Fokus auf *großes Service*) als signifikante Parameter des Produktsystems identifiziert. Durch die Variation dieser identifizierten System- bzw. Betriebsparameter wird deren Einfluss auf das Treibhauspotenzial des GLOCK GG-CHP 2.7 gezeigt. Die

Auswirkungen auf den Kumulierten Energieaufwand werden kompakt präsentiert, da der KEA zum Großteil von der Hackschnitzellogistik (bzw. von der Masse der eingesetzten Hackschnitzel) abhängt und diese nicht Teil der Sensitivitätsanalysen ist.

6.2.1 Recyclingquoten

Die Variation der Recyclingquoten der eingesetzten Materialien bestimmt, wie groß die Reduzierung des Treibhauspotenzials durch Recycling im EoL ausfällt. Die Recyclingquote für die verwendeten metallischen Rohstoffe wird von 85% auf 100% erhöht bzw. auf 0% (kein Recycling) verringert. Diese Variation bestimmt die Masse der zu recycelnden bzw. zu entsorgenden Rohstoffe aus den Lebensphasen *Rohstoffe und Lieferketten BHKW* und *Betrieb BHKW* (aus dem Austausch der Verschleißteile in Service und Wartung). Die restlichen Quoten und Annahmen bleiben unverändert. Die Ergebnisse sind in [Abbildung 28](#) dargestellt.

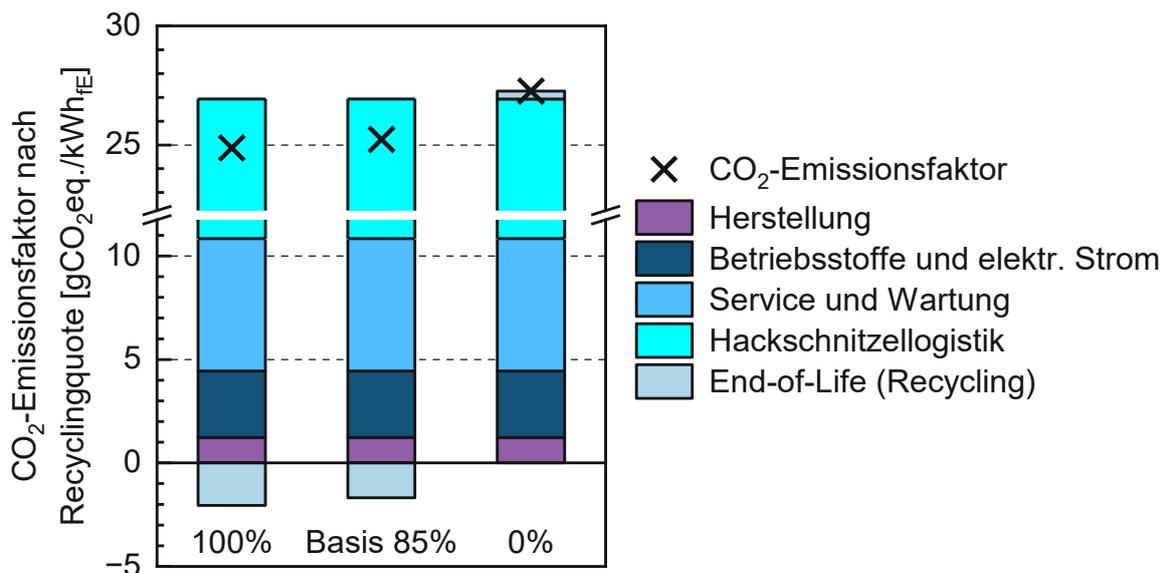


Abbildung 28: CO₂-Emissionsfaktors abhängig von Recyclingquote der metallischen Rohstoffe

Eine Recyclingquote von 100% für den Primärrohstoff resultiert in den gleichen Umweltauswirkungen, wie wenn im System Sekundärrohstoffe eingesetzt werden würden (Vergleich Formel 4 aus [Kapitel 2.4.1](#)). Durch die Erhöhung der Recyclingquote werden insgesamt 5,8 t mehr Metall recycelt, wodurch sich eine Reduzierung des CO₂-Emissionsfaktors um 1,4% auf 24,87 gCO₂eq./kWh_{FE} ergibt. Die Recyclingquote von 0% verdeutlicht die erhöhten Umweltauswirkungen, die mit der Entsorgung

der Rohstoffe verbunden sind. Wird auf das Recycling verzichtet, müssen 38,9 t Metalle auf einer Deponie entsorgt werden und die Treibhausgasemissionen steigen um 8,1% auf 27,27 gCO₂eq./kWh_{fE}.

Durch die erhöhte Recyclingquote kann 0,12% Primärenergie eingespart werden. Fehlendes Recycling erhöht den Primärenergieeinsatz um 0,7%.

6.2.2 Gesamtlebensdauer des BHKW

Die Variation der Gesamtlebensdauer beeinflusst, welchen relativen Einfluss die Herstellung des BHKW am CO₂-Emissionsfaktor des GLOCK GG-CHP 2.7 hat. Je kürzer die Gesamtlebensdauer der Anlage, desto größer wird der relative Anteil der Herstellung am CO₂-Emissionsfaktor der Anlage. Der CO₂-Emissionsfaktor in Abhängigkeit von der Gesamtlebensdauer wird in [Abbildung 29](#) dargestellt.

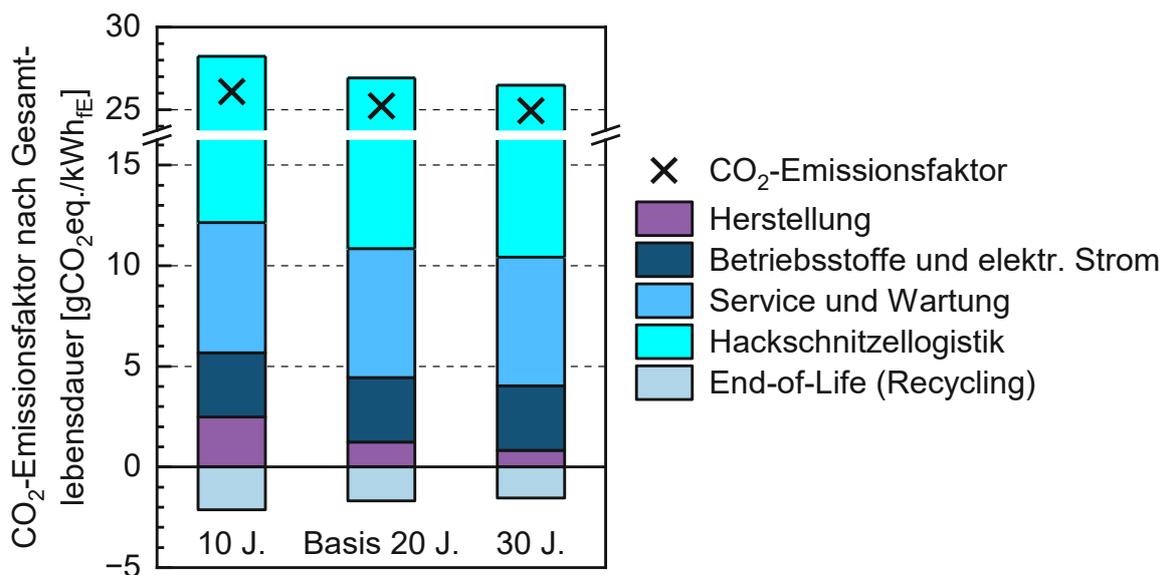


Abbildung 29: CO₂-Emissionsfaktors abhängig von Gesamtlebensdauer des GLOCK GG-CHP 2.7

Bei einer Erhöhung bzw. Verkürzung der Gesamtlebensdauer der Anlage werden die absoluten Treibhausgasemissionen der Betriebsphase des BHKW direkt beeinflusst: Halbe Lebensdauer resultiert in halber Menge an benötigten Hackschnitzel bzw. Verschleißteile müssen über die Lebensdauer betrachtet halb so oft ausgetauscht werden. Das bedeutet, der relative CO₂-Emissionsfaktor der Lebensphase *Betrieb BHKW* bleibt unverändert, egal welche Gesamtlebensdauer der Anlage angenommen wird. Bei einer Erhöhung der Gesamtlebensdauer der Anlage auf 30 Jahre ergibt sich

eine Reduzierung des CO₂-Emissionsfaktors um 1,2% auf 24,94 gCO₂eq./kWh_{fE}. Wird die Anlage 10 Jahre lang betrieben, erhöhen sich die Emissionen um 3,4% auf 26,10 gCO₂eq./kWh_{fE}.

Durch die Erhöhung der Gesamtlebensdauer kann relativ zum Output der Anlage 0,1% Primärenergie eingespart werden. Eine Verkürzung der Lebensdauer resultiert in einem um 0,3% höheren Primärenergieeinsatz-Faktor.

6.2.3 Menge der Betriebsstoffe

In der Sensitivitätsanalyse der Menge der Betriebsstoffe soll das Potenzial untersucht werden, welches sich durch die Reduzierung des Motorölverbrauchs im Betrieb sowie durch den Entfall des Gaswäschers (kein Biodiesel notwendig) ergibt. Die Füllmenge des Motoröls der Anlage wird im Rahmen von Service und Wartung weiterhin gewechselt. Abbildung 30 zeigt die Auswirkungen der Reduzierung.

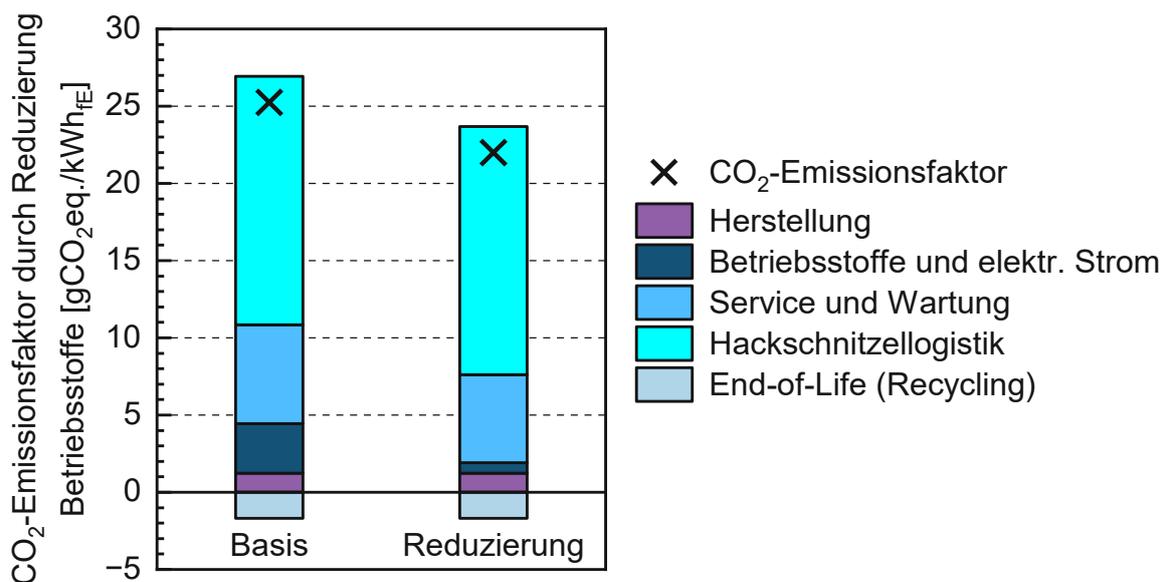


Abbildung 30: CO₂-Emissionsfaktor abhängig von Betriebsstoffen Motoröl und Biodiesel

Durch die beschriebene Reduzierung werden im Betrieb der Anlage 24,2 t Motoröl und 24,6 t Biodiesel eingespart. Die Treibhausgasemissionen der Kategorie Betriebsstoffe und elektr. Strom werden um 79,1% reduziert. In der Kategorie Service und Wartung entfallen 8,0 t Biodiesel, wodurch sich die Treibhausgasemissionen dieser Kategorie um 11,1% verringern.

In Summe wird der CO₂-Emissionsfaktor um 12,8% auf 22,00 gCO₂eq./kWh_{fE} reduziert und es wird 2,3% weniger Primärenergie eingesetzt.

6.2.4 Wartungsintervall des BHKW

Während für die Herstellung des BHKW 8,6 t an Rohstoffen verarbeitet werden, müssen durch den Austausch von Verschleißteilen im *großen Service* weitere 32,2 t Rohstoffe eingebracht werden. In dieser Sensitivitätsanalyse soll gezeigt werden, wie sich die Erhöhung des Wartungsintervalls des *großen Service* mit der damit verbundenen Reduzierung des Rohstoffeinsatzes auf die Treibhausgasemissionen des BHKW auswirkt. Bei unverändertem Rohstoffeinsatz für jedes *große Service* wird verglichen, wenn dieses halbjährlich (alle 4.000 h) bzw. jährlich (alle 8.000 h) durchgeführt wird. Die Wartungsintervalle für das *Motor Service* bzw. für den Austausch des Zylinderkopfs bzw. der Kolben bleiben unverändert. Die Auswirkungen sind in Abbildung 31 dargestellt.

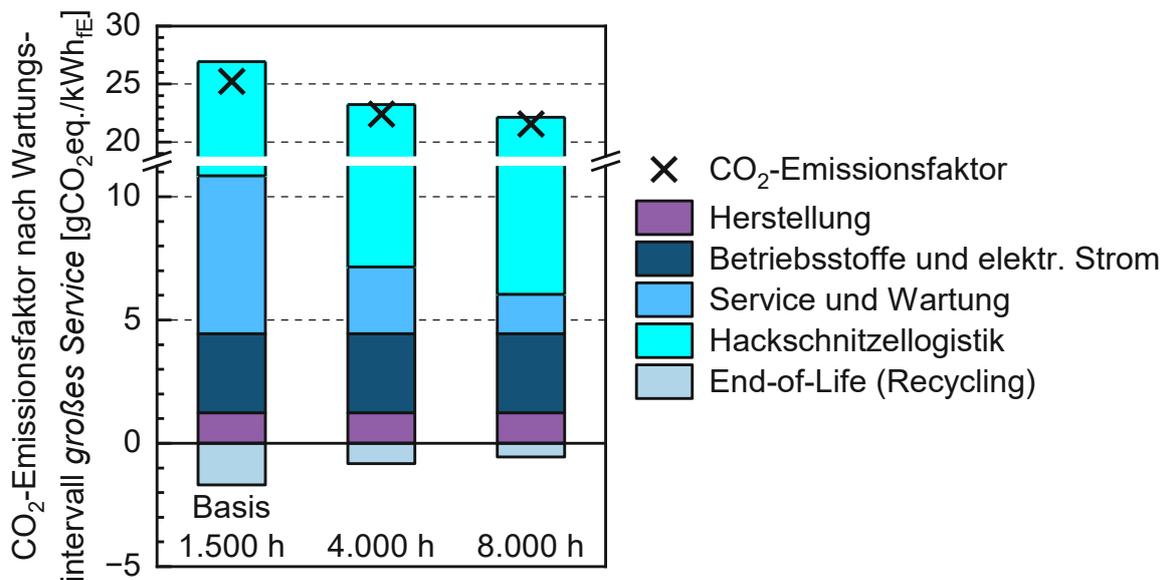


Abbildung 31: CO₂-Emissionsfaktors abhängig vom Wartungsintervall *großes Service*

Durch die Erhöhung des Wartungsintervalls des *großen Service* auf 4.000 h reduziert sich der CO₂-Emissionfaktor der Kategorie Service und Wartung von 6,41 gCO₂eq./kWh_{fE} auf 2,71 gCO₂eq./kWh_{fE} (davon 81,7% für *großes Service*). Aufgrund des verringerten Rohstoffeinsatzes wird auch die Masse für Recycling um 15,4 t verringert, wodurch sich die Reduzierung des Treibhauspotenzials durch

Recycling im End-of-Life halbiert. Mit dem Wartungsintervall des *großen Service* von 4.000 h ergibt sich eine Reduktion des CO₂-Emissionsfaktors um 11,2% auf 22,41 gCO₂eq./kWh_{fE}.

Bei Erhöhung des Wartungsintervalls auf 8.000 h ergibt sich der CO₂-Emissionfaktor für die Kategorie Service und Wartung zu 1,60 gCO₂eq./kWh_{fE}, wovon 69,1% auf das *große Service* entfallen. Gegenüber dem Wartungsintervall 1.500 h werden 20,1 t weniger Rohstoffe recycelt und die Reduzierung des Treibhauspotenzials durch Recycling im End-of-Life verringert sich um 66,9%. Der CO₂-Emissionsfaktor der Anlage reduziert sich um 14,6% auf 21,56 gCO₂eq./kWh_{fE}.

Bei einem Wartungsintervall von 4.000 h reduziert sich der Einsatz von Primärenergie um 1,2%, bei einem Wartungsintervall von 8.000 h um 1,6%.

7 Vergleich Strombereitstellungsvarianten

Um das Ergebnis der Ökobilanz des GLOCK GG-CHP 2.7 einzuordnen, werden die ermittelten Umweltauswirkungen des BHKW mit anderen Strombereitstellungsvarianten verglichen. Dafür ist es notwendig, die ursprünglich gewählte funktionelle Einheit anzupassen, weshalb die ermittelten Treibhausgasemissionen bzw. der bestimmte Primärenergieeinsatz zur Gänze auf die Strombereitstellung bezogen werden. Die parallele Wärmebereitstellung des BHKW wird mit keinem Treibhauspotenzial bzw. keinem Primärenergieeinsatz belastet. Da die Vor-Trocknung der Hackschnitzel mit Wärme aus einem BHKW modelliert wurde, entfallen das GWP bzw. der KEA für diesen Prozess. Mit dem Treibhauspotenzial von 591 tCO₂eq. bzw. dem Kumulierten Energieaufwand von 31.130 MWh und der bereitgestellten elektrischen Energie von 8.432 MWh, ergeben sich der CO₂-Emissionsfaktor bzw. der Primärenergieeinsatz-Faktor zu:

$$\text{CO}_2 - \text{Emissionsfaktor}_{\text{elektr.}} = 70,14 \text{ gCO}_2\text{eq./kWh}_{\text{elektr.}}$$

$$\text{Primärenergieeinsatz} - \text{Faktor}(\text{total})_{\text{elektr.}} = 3,69 \text{ kWh/kWh}_{\text{elekt.}}$$

Bevor der CO₂-Emissionsfaktor bzw. der Primärenergieeinsatz-Faktor des GLOCK GG-CHP 2.7 im Vergleich zu anderen Strombereitstellungsvarianten präsentiert werden, sollen Potenziale für eine Verbesserung dieser Faktoren aufgezeigt werden. Zu diesem Zweck werden die Auswirkungen eines erhöhten elektrischen Wirkungsgrades bzw. die Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch die Nutzung nachhaltiger Energien und Kraftstoffe betrachtet. Die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades wurde in den vorangegangenen Sensitivitätsanalysen nicht unter-

sucht, da diese mit einer gleichzeitigen Verringerung des thermischen Wirkungsgrades einhergeht und somit kaum Auswirkungen auf die gewählte funktionelle Einheit hat.

7.1 Verbesserungspotenzial

7.1.1 Elektrischer Wirkungsgrad des BHKW

Auf Basis des unveränderten Massenstroms der Zufuhr der Hackschnitzel W6 von 39,95 kg/h wird durch die Verbesserung des Kaltgaswirkungsgrades (siehe Formel 7 aus [Kapitel 3](#)) sowie des Wirkungsgrades von VKM und Generator (Formel 8 aus [Kapitel 3](#)) ein erhöhter elektrischer Output des GLOCK GG-CHP 2.7 modelliert. Der Input der Betriebsstoffe und der Wartungsplan der Anlage bleiben unverändert (Vergleich [Kapitel 3](#)). Auf Basis der Arbeit von [51] wird die Annahme eines auf 80,0% gesteigerten Kaltgaswirkungsgrades getroffen bzw. basierend auf [52] wird ein um 5,7% (Angabe in Prozentpunkten) auf 34,5% verbesserter Wirkungsgrad für VKM und Generator angenommen.

Der elektrische Wirkungsgrad ergibt sich zu 32,2% wodurch die elektrische Leistung der Anlage auf 62,4 kW steigt. Die Veränderung des CO₂-Emissionsfaktors ist in [Abbildung 32](#) dargestellt.

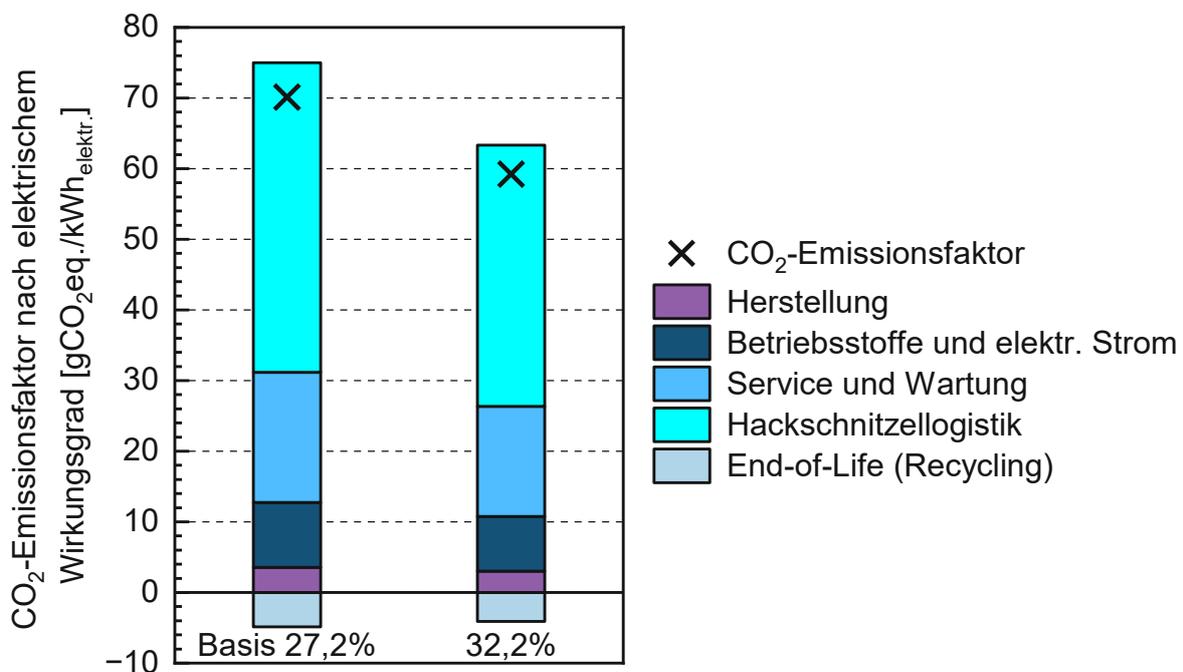


Abbildung 32: CO₂-Emissionsfaktors abhängig vom elektrischen Wirkungsgrad

Die absoluten Treibhausgasemissionen und der absolute Primärenergieeinsatz bleiben aufgrund der gleichbleibenden Betriebsparameter unverändert. Durch den verbesserten elektrischen Wirkungsgrad erhöht sich der elektrische Output der Anlage von 8.432 MWh auf 9.984 MWh. Der CO₂-Emissionsfaktor des GLOCK GG-CHP 2.7 reduziert sich auf 59,23 gCO₂eq./kWh_{elektr.} und der Primärenergieeinsatz-Faktor ergibt sich zu 3,12 kWh/kWh_{elektr.}.

7.1.2 Nutzung nachhaltiger Energien und Kraftstoffe

Mit Blick auf das Potenzial einer zukünftigen nachhaltigen Hackschnitzellogistik, wird in diesem Abschnitt die Nutzung nachhaltiger Energien und Kraftstoffe untersucht. Der elektrische Wirkungsgrad und die Betriebsparameter der Anlage bleiben unverändert. Für diese Untersuchung stammt der in der Betriebsphase eingesetzte Strom aus nachhaltigem BHKW-Strom (Wert als einfache Iterationsschleife). In der Hackschnitzellogistik wird anstelle des fossilen Kraftstoffs (Diesel) grüner Wasserstoff eingesetzt. Das Potenzial für die Reduzierung durch den Einsatz von Wasserstoff wird auf Basis von [53] über das Verhältnis der Treibhausgasemissionen eines Brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugs (*FCEV mit grünem H₂*) gegenüber einem Fahrzeug mit fossilem Verbrennungsmotor (*fossil VKM*) bestimmt. Die Auswirkungen der Reduzierung sind in Abbildung 33 dargestellt.

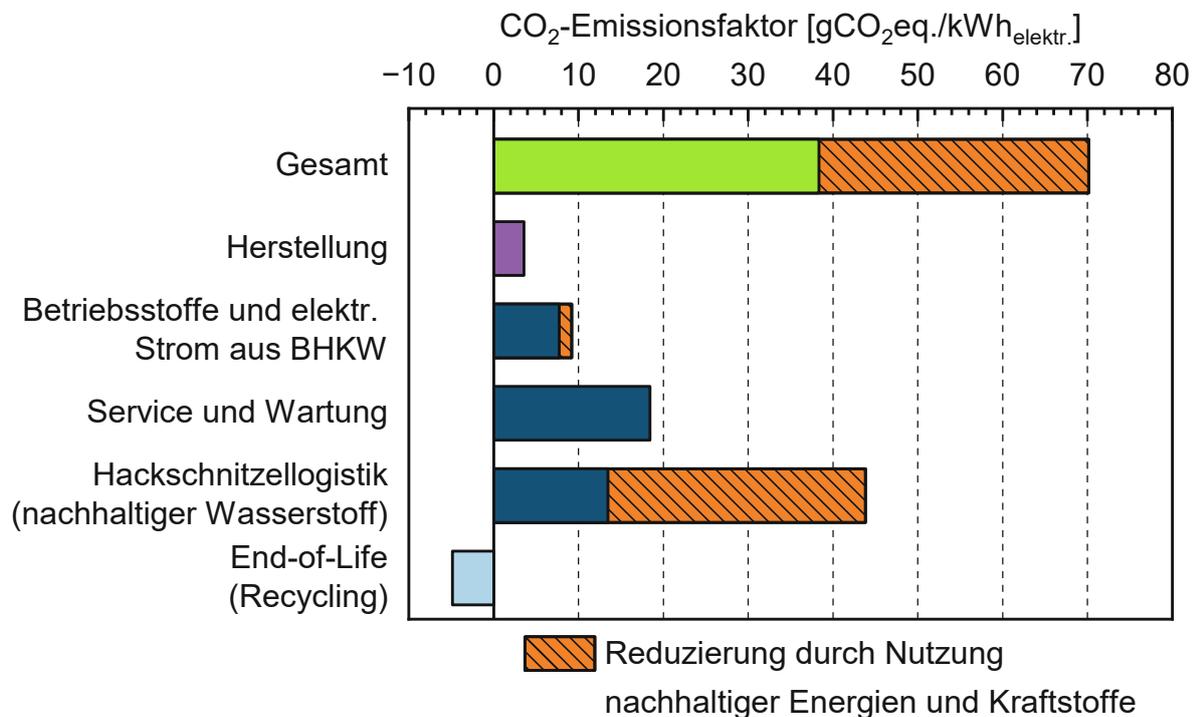


Abbildung 33: CO₂-Emissionsfaktor durch Nutzung nachhaltiger Energien und Kraftstoffe

Durch die Nutzung nachhaltiger Energien und Kraftstoffe werden die Treibhausgasemissionen der Kategorie Betriebsstoffe um 16,0% und die der Kategorie Hackschnitzellogistik um 69,3% reduziert. Der CO₂-Emissionsfaktor ergibt sich zu 38,34 gCO₂eq./kWh_{elektr.}. Der Primärenergieeinsatz ändert sich geringfügig, da dieser zum Großteil durch den Heizwert der eingesetzten Hackschnitzel bestimmt wird und die Masse der eingesetzten Hackschnitzel nicht verändert wurde.

7.2 Einordnung zu Strombereitstellungsvarianten

In Abbildung 34 wird der Vergleich nach dem CO₂-Emissionsfaktor der am häufigsten eingesetzten Strombereitstellungsvarianten gezeigt. Das GLOCK GG-CHP 2.7 wird mit drei Faktoren eingereiht: das Basis-Ergebnis, das Ergebnis bei Verwendung nachhaltiger Energien und Kraftstoffe sowie dazu angedeutet das Potenzial für die zusätzliche Reduzierung des CO₂-Emissionsfaktors durch die Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades.

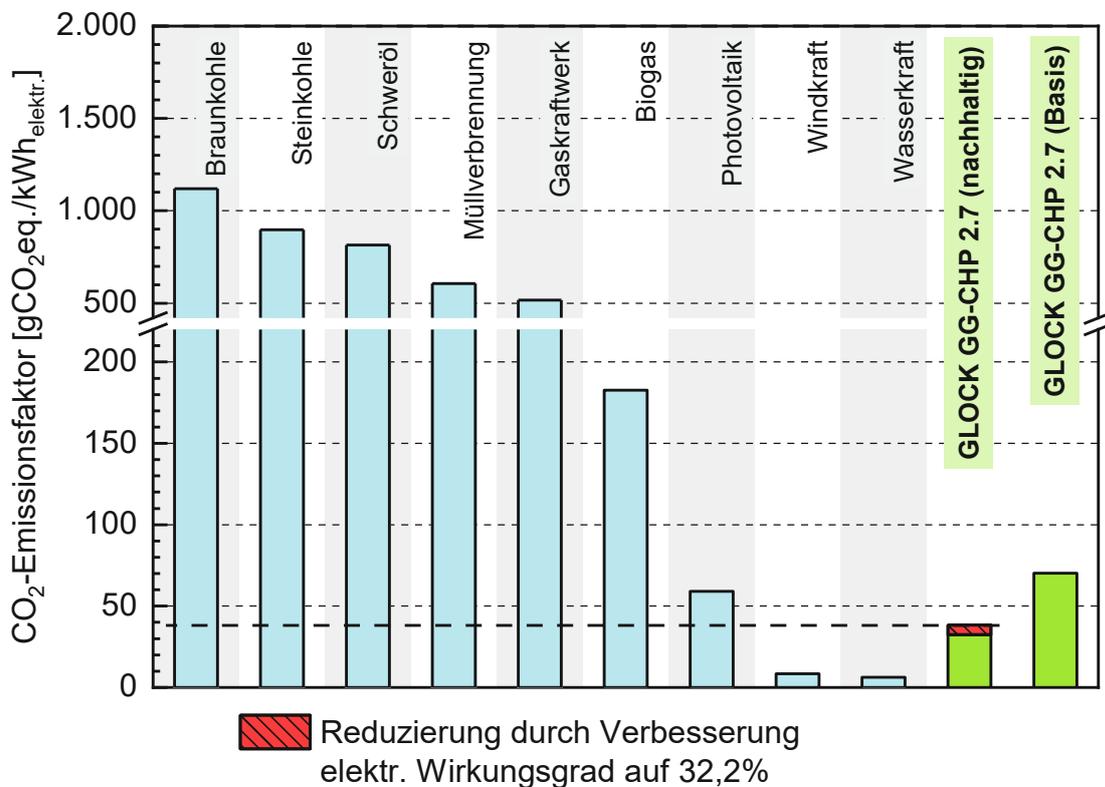


Abbildung 34: CO₂-Emissionsfaktor nach Strombereitstellungsvarianten. Werte und Datenquelle siehe Tabelle A10

Das GLOCK GG-CHP 2.7 (Basis) liegt in der Größenordnung der Treibhausgasemissionen unter der Strombereitstellung aus Biogas und nahe dem Strom aus Photovoltaik. Wird zusätzlich zur Nutzung nachhaltiger Energien und Kraftstoffe ein verbesserter elektrischer Wirkungsgrad berücksichtigt, ergibt sich der CO₂-Emissionsfaktor des BHKW zu 32,38 gCO₂eq./kWh_{elektr.}. Aus dem Vergleich der Strombereitstellungsvarianten zeigt sich, dass das GLOCK GG-CHP 2.7 eine gute Ergänzung der erneuerbaren Stromquellen darstellt, insbesondere für die Bereitstellung der Grundlast. Dies ist relevant, da das Potenzial an Wasserkraftwerken in Österreich weitgehend ausgeschöpft ist und die Stromerzeugung aus Windkraft bzw. Photovoltaik volatil sind. Abbildung 35 zeigt den Vergleich der Strombereitstellungsvarianten auf Basis des notwendigen Einsatzes an erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Primärenergie.

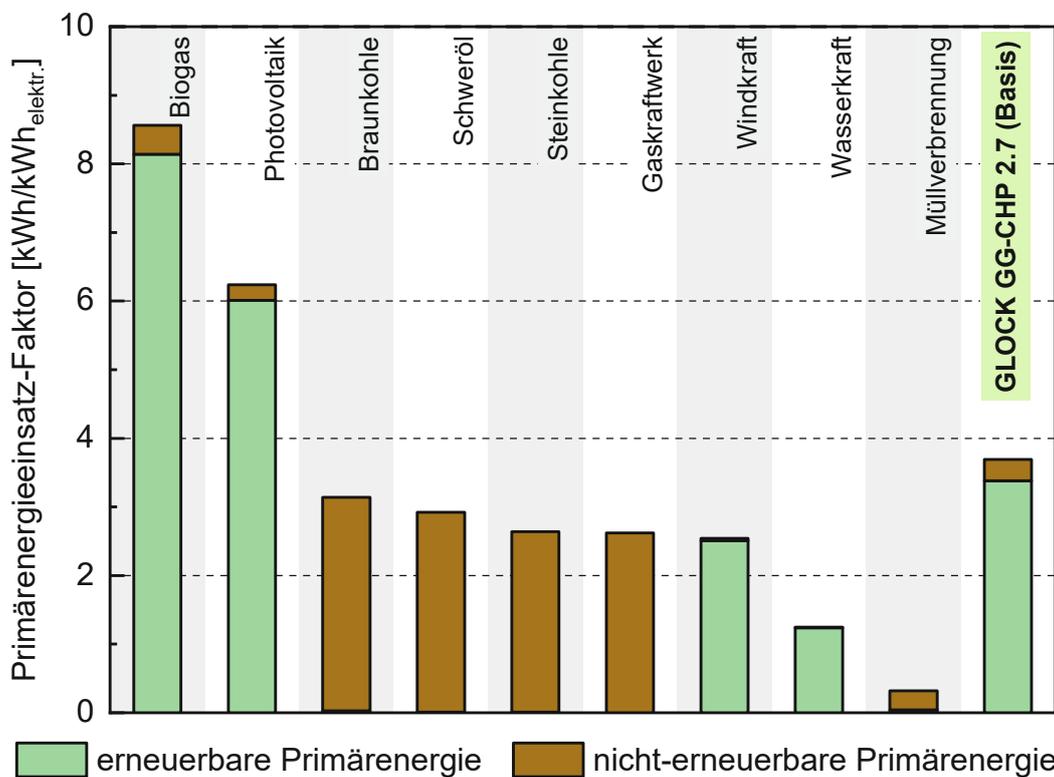


Abbildung 35: Primärenergieeinsatz-Faktor nach Strombereitstellungsvarianten. Werte und Datenquelle siehe Tabelle A10

Der Primärenergieeinsatz-Faktor des GLOCK GG-CHP 2.7 reiht sich unterhalb dem von Biogas und Photovoltaik, aber über dem der fossilen Energieträger ein. Für Strom aus dem GLOCK GG-CHP 2.7 muss zwar mehr Primärenergie aufgewendet werden, wie beispielsweise für Strom aus einem Gaskraftwerk, allerdings wird beim BHKW ein hoher Anteil an erneuerbarer Primärenergie eingesetzt (91,6%).

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Ökobilanz für das Holzgas-Blockheizkraftwerk GLOCK GG-CHP 2.7 durchgeführt. Die Untersuchung erfolgte nach dem methodischen Rahmen gemäß DIN EN ISO 14040 und 14044, mit Fokus auf Herstellung und Entsorgung (End-of-Life) der Anlage. Holzgas-BHKW zählen zu den Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen und ermöglichen die gekoppelte Bereitstellung von thermischer und elektrischer Energie. Das GLOCK GG-CHP 2.7 wird mit Hackschnitzel betrieben, aus denen in einem Gaserzeuger ein Holzgas hergestellt wird. Das Holzgas wird nach einer Aufbereitung (Reinigung und Abkühlung) in einem Gas-Otto-Motor umgesetzt. Die abgegebene Wärme wird über Wärmetauscher an das Wärmenetz weitergegeben. Ein Generator wandelt die von der Verbrennungskraftmaschine (VKM) erzeugte mechanische Energie in elektrischen Strom um. Die ideale Umsetzung des Holzgases in der VKM ist CO₂-neutral, da der freigesetzte Kohlenstoff zuvor aus der Luft im Holz gebunden wurde.

Um die Umweltauswirkungen des GLOCK GG-CHP 2.7 zu bestimmen, wurden die Wirkungskategorie *Klimaänderung* (Aussagen zum Beitrag an globaler Erwärmung) sowie der *Kumulierte Energieaufwand* (Aussagen zu Effizienz und Nachhaltigkeit) untersucht. Als funktionelle Einheit (fE) wurde die Bereitstellung 1 kWh_{fE} Energie in Form von Strom und Wärme definiert (Übergabepunkte am Betriebsstandort). Für das Produktsystem wurden die Lebensphasen *Rohstoffe und Lieferketten BHKW*, *Herstellung BHKW*, *Betrieb BHKW* und *End-of-Life BHKW* untersucht. Mit Hilfe der Sachbilanz wurden alle relevanten Energie- bzw. Stoffflüsse über die Systemgrenze erfasst und dokumentiert. Die mit dem Einsatz von Rohstoffen bzw. Betriebsstoffen

verbundenen Umweltauswirkungen wurden aus Datenbanken (Software *GaBi* bzw. Literatur) übernommen. Zusammengesetzte Produkte wurden nach Möglichkeit über den Anteil der Materialien aufgetrennt und anhand dieser bilanziert oder durch vorhandene Ökobilanz-Studien berücksichtigt. Sämtliche Infrastruktur wie Straßen, Wärmenetz, Gebäude sowie jegliche Fahrzeuge, Maschinen, Geräte und Hilfsstoffe, für die Herstellung des BHKW bzw. für die Hackschnitzellogistik, wurden nicht berücksichtigt. Für die Ökobilanz wurde kein Abschneidekriterium festgelegt. Als Allokationsmethode wurde die Methode 0:100 verwendet. Der Rohstoffeinsatz in der Herstellung wird als Primärrohstoff modelliert. Durch Recycling im End-of-Life wird Sekundärrohstoff bereitgestellt und eine Gutschrift für vermiedenen Primärrohstoff verrechnet (*quasi-closed loop recycling*).

Für das GLOCK GG-CHP 2.7 wurde ein Treibhauspotenzial von 612 tCO₂eq. ermittelt. Knapp 95,4% der verursachten Treibhausgasemissionen stammen aus der Betriebsphase des BHKW. Der Großteil dieser Emissionen ist durch die Bereitstellung der Hackschnitzel bedingt. Für die Herstellung des GLOCK GG-CHP 2.7 werden insgesamt 8,6 t Materialien mit einem Treibhauspotenzial von 27,0 tCO₂eq. eingesetzt. Durch das Recycling im End-of-Life wird dieses Treibhauspotenzial auf 16,7 tCO₂eq. reduziert. Der kumulierte Energieaufwand für das BHKW beträgt 32.220 MWh, mit einem Einsatz von 91,6% erneuerbarer Primärenergie. Über die Gesamtlebensdauer stellt das BHKW insgesamt 8.432 MWh elektrischen Strom und 15.808 MWh Wärme bereit. Werden die Treibhausgasemissionen zur Gänze auf die Strombereitstellung bezogen (gleichzeitige Bereitstellung der Wärme treibhausgasemissionsfrei) ergeben sich spezifische CO₂-Emissionen von 70,14 gCO₂eq./kWh_{elektr.}.

In den durchgeführten Sensitivitätsanalysen wurden als signifikante Parameter des Produktsystems unter anderem der elektrische Wirkungsgrad des BHKW sowie die Hackschnitzellogistik identifiziert und untersucht. Durch die Nutzung von nachhaltigen Energien und Kraftstoffen werden die Emissionen der Betriebsstoffe um 16,0% und die der Hackschnitzellogistik um 69,3% reduziert. In diesem Fall ergeben sich die spezifischen CO₂-Emissionen des BHKW zu 38,34 gCO₂eq./kWh_{elektr.}. Werden zusätzlich zur Nutzung nachhaltiger Energien und Kraftstoffe eine Optimierung des Gaserzeugers sowie ein verbesserter VKM-Wirkungsgrad angenommen, reduzieren sich die spezifischen CO₂-Emissionen auf 32,38 gCO₂eq./kWh_{elektr.}.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass es Potenziale für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen des GLOCK GG-CHP 2.7 gibt. Die größten Verbesserungspotenziale bieten die Optimierung des elektrischen Wirkungsgrades sowie eine nachhaltige Hackschnitzellogistik und sollten deshalb in weiteren Forschungsarbeiten genauer untersucht werden. Gleichzeitig gilt es auch den Betrieb des BHKW kontinuierlich zu optimieren und damit die Mengen der eingesetzten Betriebsmittel sowie die Wartungsaufwände zu reduzieren.

Literaturverzeichnis

- [1] E-CONTROL: Strom- und Gaskennzeichnungsbericht 2022. Berichtjahr 2021 E-Control, Wien, 2022.
- [2] Statistik Austria: Website: www.statistik.at, [Online], <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/energieeinsatz-der-haushalte>, 2022, Zugriff am 02.03.2023.
- [3] Lechinger, V.; Matzner, S.: So heizt Österreich - Heizungsarten und Energieträger in österreichischen Haushalten im sozialen Kontext. Report. AK Wirtschaftspolitik Standpunkte, 36/2020, Jahrgang 10.
- [4] Schaumann, G., Schmitz, K. W.: Kraft-Wärme-Kopplung. Berlin: Springer Verlag, ISBN: 978-3-642-01424-6, 2010.
- [5] Zahoransky, R.: Energietechnik: Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-21847-8, 2019.
- [6] Hinnells, M.: Combined heat and power in industry and buildings. Energy Policy, 12/2008, Jahrgang 36, Seite 4522-4526.
- [7] ASUE-Arbeitskreis „Brennstoffzellen/ Blockheizkraftwerke“: BHKW–Grundlagen. ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Berlin, 2010.
- [8] Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, J.: Handbuch Regenerative Energietechnik. Berlin: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-662-53072-6, 2017.
- [9] Bruckmüller, T.; Graf, J.; Konrad, J.; Scharinger-Urschitz, G.; Werner, A.; Hammerschmid, M.; Geringer, B.: Ökologische und ökonomische Analyse der Energieversorgung und Mobilität einer Referenzregion und deren Entwicklungspotentiale bis 2030. Research Report TU Wien, 2019.
- [10] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse. Heidelberg: Springer Verlag, ISBN: 978-3-540-85094-6, 2009.
- [11] Glock ecotech-Technology: Website: www.glock-ecoenergy.com, [Online], <https://www.glock-ecoenergy.com/de/technology>, 2023, Zugriff am 02.03.2023.
- [12] Galović, J.; Hofmann, P.; Popov, T.; Müller, S.; Frieling, D.: Application of Wood Gas in Internal Combustion Engines–Efficiency and Emissions. 13th

- International Colloquium Fuels: Conventional and Future Energy for Automobiles, Ostfildern 2021, ISBN: 978-3-8169-3539-6.
- [13] Kuptz, D.; Schulmeyer, F.; Hüttl, K.; Dietz, K.; Turowski, P.; Zormaier, F.; Borchert, H.; Hartmann, H.: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Straubing, 2015.
- [14] Pierobon, F.; Zanetti, M.; Grigolato, S.; Sgarbossa, A.; Anfodillo, T.; Cavalli, R.: Life cycle environmental impact of firewood production – a case study in Italy. Applied Energy, 2015, Volume 150, Seite 185-195, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.033>
- [15] Vogt, R.; Fehrenbach, H.: Vergleichende ökologische Bewertung der technischen Trocknung von Holzhackschnitzeln. IFEU - Arbeitskreis Holzhackschnitzel im Bundesverband Bio-Energie e.V. Heidelberg, 2010.
- [16] Schulmeyer, F.; Mergler, F.; Hüttl, K.; Zormaier, F.: Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, 2016.
- [17] John Deere: Website: <https://www.deere.de>, [Online], <https://www.deere.de/assets/publications/index.html?id=85eaa87c#1>, 2023, Zugriff am 02.07.2023.
- [18] Mirabella, N.; Castellani, V.; Sala, S.: Forestry operations in the alpine context. Life cycle assessment to support the integrated assessment of forest wood short supply chain. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, Volume 19, Seite 1524-1535, <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0756-8>
- [19] Valente, C.; Spinelli, R.; Hillring, B.G.; Solberg, B.: Mountain forest wood fuel supply chains: comparative studies between Norway and Italy. Biomass and Bioenergy, 2014, Volume 71, Seite 370-380, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.09.018>
- [20] EcoLog: Website: <https://www.ecologforestry.com>, [Online], <https://ecologforestry.com/en/products/forwarders/forwarder-1050f/>, 2023, Zugriff am 02.07.2023.
- [21] Mus Max: Website: <https://www.mus-max.at>, [Online], <https://www.mus-max.at/forsttechnik/hack-truck>, 2023, Zugriff am 01.07.2023.

- [22] Farmtech: Website: <https://www.farmtech.eu>, [Online], https://www.farmtech.eu/wp-content/uploads/2022/08/fortis_2022-de.pdf, 2023, Zugriff am 29.06.2023.
- [23] DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020). Beuth, Berlin, <https://dx.doi.org/10.31030/3179655>
- [24] Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH, ISBN: 978-3-527-32043-1, 2009.
- [25] European Commission-Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2011, <https://dx.doi.org/10.2788/33030>
- [26] UNITED NATIONS – Climate Change: Website: unfccc.int, [Online], <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/frequently-asked-questions/global-warming-potentials-ipcc-fourth-assessment-report>, 2022, Zugriff am 07.03.2023
- [27] DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020). Beuth, Berlin, <https://dx.doi.org/10.31030/3179656>
- [28] Frischknecht, R.: Lehrbuch der Ökobilanzierung. Berlin: Springer Spektrum, ISBN: 978-3-662-54762-5, 2020.
- [29] Koffler, C.; Finkbeiner, M.: Are we still keeping it “real”? Proposing a revised paradigm for recycling credits in attributional life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2018, Volume 23, Seite 181–190, <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1404-x>
- [30] DIN EN ISO 14067:2019-02: Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO 14067:2018). Beuth, Berlin, <https://dx.doi.org/10.31030/2851769>
- [31] Allacker, K.; Mathieux, F.; Pennington, D.; Pant, R.: The search for an appropriate end-of-life formula for the purpose of the European Commission Environmental Footprint initiative. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, Journal 22, Seite 1441–1458, <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1244-0>

- [32] Frischknecht, R.: LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, Volume 15, Seite 666–671, <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0201-6>
- [33] Zampori, L.; Pant, R.: Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg: European Union, 2019, ISBN: 978-92-76- 00654-1, <https://doi.org/10.2760/424613>
- [34] Glock ecotech: Website: www.glock-ecoenergy.com, [Online], <https://www.glock-ecoenergy.com/de>, 2023, Zugriff am 02.03.2023.
- [35] Glock ecotech GmbH: GLOCK ecotech – Hackgut-Standard, Griffen, 2023.
- [36] Glock ecotech-GG-CHP: Website: www.glock-ecoenergy.com, [Online], <https://www.glock-ecoenergy.com/de/GG-CHP>, 2023, Zugriff am 02.03.2023.
- [37] Schriftliche Mitteilung von Dipl.Ing. Popov am 10. Mai 2023
- [38] Schriftliche Mitteilung von Dipl.Ing. Galovic am 31. Januar 2023
- [39] Reisinger, K.; Kuptz, D.: Heizwerttabellen für verschiedene Holzarten, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Straubing, 2015.
- [40] Hahn, J.; Schardt, M.; Schulmeyer, F.; Mergler, F.: Der Energieinhalt von Holz, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2014.
- [41] Biomasseverband OÖ: Masse und Energieinhalt von Hackgut in Abhängigkeit vom Wassergehalt, Linz, 2023.
- [42] Kühmaier, M.; Kral, I.; Kanzian, C.: Greenhouse Gas Emissions of the Forest Supply Chain in Austria in the Year 2018. *Sustainability*, 2022, Jahrgang 14, Nr.2, Seite 792, <https://doi.org/10.3390/su14020792>
- [43] De la Fuente, T.; Athanassiadis, D.; Gonzalez-Garcia, S.; Nordfjell, T.: Cradle-to-gate life cycle assessment of forest supply chains: Comparison of Canadian and Swedish case studies. *Journal of cleaner production*, 2017, Volume 143, Seite 866-881, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.034>
- [44] Laschi, A.; Marchi, E.; González-García, S.: Environmental performance of wood pellets' production through life cycle analysis. *Energy*, 2016, Volume 103, Seite 469-480, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.165>
- [45] Heindl, A.: Praxisbuch Horden- und Flächentrocknung. Berlin: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-662-60432-8, 2020.

- [46] Saller, G.; Derißen, D.; Lodde, M.: Einsatz eines neuen energiesparenden Verfahrens zur Schnittholz Trocknung. Abschlussbericht, Duisburg, 2014.
- [47] Lasek, J.A.; Lajnert, R.: the Issues of NOx as Greenhouse Gases: An Ongoing Discussion. Applied Sciences, 2022, 12. Jg., Nr. 20, Seite 10429, <https://doi.org/10.3390/app122010429>
- [48] Eriksson, L.; Gustavsson, L.: Comparative analysis of wood chips and bundles—Costs, carbon dioxide emissions, dry-matter losses and allergic reactions. Biomass and Bioenergy, 2010, Volume 34(1), Seite 82-90, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.002>
- [49] Wihersaari, M.: Greenhouse gas emissions from final harvest fuel chip production in Finland. Biomass and Bioenergy, 2005, Volume 28(5), Seite 435-443, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.007>
- [50] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - wood chips, wet
- [51] Schriftliche Mitteilung von Dipl.Ing. Popov am 26. Juni 2023
- [52] Galovic, J.; Konrad, J.; Hofmann, P.: Combustion process optimization for wood gas engine of a biomass power plant. 30th CIMAC World Congress 2023 in Busan, Busan 2023.
- [53] Umweltbundesamt Österreich: Die Ökobilanz von Personenkraftwagen. Wien, 2021, <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0763.pdf>
- [54] Friedrich, B.; Trentmann, A.; Pophanken, A.; Gath, A.: Elektronikschrott – eine komplexe Rohstoffquelle für neue Werkstoffe. Aachen, Aachener Kompetenzzentrum- für Ressourcentechnologie e.V., 2015, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3185.7526>
- [55] Parthey, F.: Lebenszyklusanalyse und Bestimmung von Einflussfaktoren zur nachhaltigen Produktgestaltung von GuD-Kraftwerken. Cottbus, Dissertation an der BTU Cottbus-Senftenberg, 2010, <https://d-nb.info/1003470017/34>
- [56] Thuve, C.; Yuvaraj, H.: Life cycle assessment of a combustion engine. Gothenburg Sweden, Master Thesis an Chalmers University of Technology, 2022, <https://hdl.handle.net/20.500.12380/304924>
- [57] ÖKOBAUDAT - Blähton Granulat: Website: www.oekobaudat.de, [Online], https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uid=d5df3d3b-abfa-4ba9-9ec0-60e7fe21b72a&version=20.21.060&stock=OBD_2021_II, 2023, Zugriff am 12.07.2023.

- [58] ÖKOBAUDAT - Fugendichtungsbänder Butyl: Website: www.oekobaudat.de, [Online], https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b060ccb6-2e27-456e-87c4-0b5d4453d917&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II, 2023, Zugriff am 12.07.2023.
- [59] KlingerGermany - KLINGERSIL® C-4400: Website: www.klinger.de, [Online], <https://www.klinger.de/de/produkte/faserverstaerkte-dichtungsmaterialien/klingersil-c-4400>, 2023, Zugriff am 12.07.2023.
- [60] Frenzelit - novamica: Website: www.frenzelit.com, [Online], <https://www.frenzelit.com/produkte/dichtungen/dichtungsmaterialien/novamica>, 2023, Zugriff am 12.07.2023.
- [61] Flexitallic - Thermiculite 815: Website: www.flexitallic.com, [Online], <https://flexitallic.com/global/product/thermiculite-815-tanged-sheet-material/>, 2023, Zugriff am 12.07.2023.
- [62] ÖKOBAUDAT - Elastomer Fugenbänder: Website: www.oekobaudat.de, [Online], https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e39f8b09-c362-4a42-a96a-1a192c0899a3&version=20.21.060&stock=OBD_2021_II, 2023, Zugriff am 12.07.2023.
- [63] Belcastro, E.: Life Cycle Analysis of a Ceramic Three-Way Catalytic Converter. Virginia USA, Master Thesis am Virginia Polytechnic Institute und State University, 2012, <http://hdl.handle.net/10919/32342>
- [64] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - printed circuit board
- [65] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - cardboard
- [66] Umweltbundesamt Österreich: Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger, 2022, <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>
- [67] ÖKOBAUDAT - Pulverlackierung: Website: www.oekobaudat.de, [Online], https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=eaec8e5d-f70a-4993-b3a6-814607f5e7b3&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II, 2023, Zugriff am 12.07.2023.
- [68] Felten, D.; Fröba, N.; Fries, J.; Emmerling, C.: Energy balances and greenhouse gas-mitigation potentials of bioenergy cropping systems (Miscanthus, rapeseed, and maize) based on farming conditions in Western Germany. *Renewable Energy*, 2013, 55 Jg., Seite 160-174, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.004>

- [69] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - steel
- [70] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - stainless steel
- [71] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - aluminium, primary
- [72] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - copper
- [73] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - galvanised steel
- [74] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - brass
- [75] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - silicon
- [76] Datenbankeintrag aus ecoinvent: ecoinvent basic 1.5 - disposal of lubricant

Anhang

Tabelle A1: Massenanteile Aufspaltung Komponenten

Für Komponente	
allgemeine Elektronikkomponente	Massenanteil laut [54] [%]
Massenanteil Kunststoff PE	64
Massenanteil Kupfer	18
Massenanteil Aluminium	7
Massenanteil Silizium	6
Massenanteil Eisen	5
Elektromotor	Massenanteil laut [55] [%]
Massenanteil Stahl	84
Massenanteil Kupfer	13
Massenanteil Kunststoff PE	3
Verbrennungskraftmaschine	Massenanteil laut [56] [%]
Massenanteil Stahl	42
Massenanteil Aluminium	41
Massenanteil Kunststoff PE	15
Massenanteil Glas	2

Tabelle A2: Transportdistanz nach Material und Komponenten

Transportkette für		Transport mit				
Material	Herkunft	Zug nicht EU [km]	LKW nicht EU [km]	Schiff [km]	Zug in EU [km]	LKW in EU [km]
Stahl	DE				1500	400
Edelstahl	EU-28				1500	400
Aluminium	EU28				1500	400
Blähton	DE				1000	400
Steinwolle	EU-28		500			500
Stahl verzinkt	EU-28				1500	400
Kupfer	DE				1500	400
PVC	RER		200		1000	400
PUR-Schaumstoff	RER		200		1000	400
Gummi/Synthesekautschuk	DE				1000	400
Messing	EU-28				1500	200
Kunststoff PE	EU-28				1500	200
NBR 70	DE				500	500
Klingersil C4400	EU-28		200		500	500
Kunststoff PA	EU-28				1000	200
Novamica Thermex	DE				500	500
Flexitallic Thermiculite 815	US			6000		500
Rotguss (Rotmessing)	EU-28				1500	400
TPE-A	DE				1000	200
Silikondichtschnur	DE				500	500
Glasfasergewebe	DE				500	500
Komponente	Herkunft	Zug nicht EU [km]	LKW nicht EU [km]	Schiff [km]	Zug in EU [km]	LKW in EU [km]
Allg. Elektronikkomponente	EU28				1500	400
Verbrennungskraftmaschine	RUS	2000				500
Elektromotor	DE				1000	200
Katalysator	EU-28					1000
Leiterplatte	EU-28				1500	500

Tabelle A3: Verzeichnis GWP und KEA für Lebensphase *Rohstoffe und Lieferketten BHKW*

Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kg]	KEA [kWh/kg]	Recyclingquote laut [33] [%]
Stahl	BF Steel billet / slab / bloom	2,019	5,137	85
Edelstahl	Stainless steel cold rolled coil (316)	3,711	17,824	85
Aluminium	Primary aluminium ingot consumption mix	8,642	45,118	85
Kunststoff PE	Polyethylene terephthalate fibres (PET)	4,123	32,290	0
Kupfer	Copper mix	3,715	14,887	85
Blähton	[57]	0,372	1,738	80
Steinwolle	Stone wool	1,050	4,164	0
Stahl verzinkt	Steel electrogalvanized coil	3,027	9,524	85
PVC	Polyvinylchloride pipe (PVC)	3,320	18,681	0
PUR-Schaumstoff	Polyurethane rigid foam (PU)	4,298	28,429	0
Glas	Container glass	0,879	4,149	50
Silizium	Silicon mix	4,587	41,814	50
Gummi/Kautschuk	Styrene-butadiene rubber (S-SBR) mix	3,061	27,694	0
Messing	Brass (CuZn20)	0,577	2,434	85
NBR 70	[58]	5,684	41,242	0
Klingersil C4400	laut [59]: Kunststoff PA + [58]	6,529	44,552	0
Kunststoff PA	Polyamide 6.6 fibres (PA 6.6)	9,908	57,791	0
Novamica Thermex	laut [60]: Edelstahl + Phlogopit-Glimmer (GaBi: Silica sand)	7,863	43,012	0
Flexitallic Thermiculite 815	laut [61]: Edelstahl + Phlogopit-Glimmer (GaBi: Silica sand)	7,790	40,909	0
Rotguss (Rotmessing)	Red brass	0,621	2,410	85
TPE-A	Als Kunststoff PA	12,207	70,851	0
Silikondichtschnur	[62]	8,153	51,681	0
Glasfasergewebe	Glass fibres	1,695	8,851	0

Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kg]	KEA [kWh/kg]	Recyclingquote laut [33] [%]
Katalysator	[63]	5,030	16,431	40
Leiterplatte	[64]	154,600	1023,383	40

Transport mit	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./tkm]	KEA [kWh/tkm]
Zug nicht EU	GLO: Rail transport cargo – Diesel, average train, gross tonne weight 1,000t / 726t payload capacity	0,025	0,109
LKW nicht EU	GLO: Truck, Euro 2, 12 – 14t gross weight / 9.3t payload capacity	0,206	0,888
Schiff	GLO: Container ship, 5,000 to 200,000 dwt payload capacity, ocean going	0,020	0,078
Zug in EU	EU-28: Rail transport incl. fuel, average train, gross tonne weight 1,000t / 726t payload capacity	0,013	0,095
LKW in EU	GLO: Truck, Euro 5, 7.5 t – 12t gross weight / 5t payload capacity	0,081	0,345

Verpackungsmaterial	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Holz	OSB (Oriented Strand Board)	0,212	1,008
Karton	[65]	0,850	0,877
Styropor	EPS (product)	2,868	25,016
Plastikfolie	Polyethylene-film (PE)	2,431	25,106

Tabelle A4: Verzeichnis GWP und KEA für Lebensphase *Herstellung BHKW*

Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kWh]	KEA [kWh/kWh]
Elektr. Strom	AT: Electricity grid mix (production mix)	0,170	2,029
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Kraftstoff (Diesel)	[66]	3,749	14,995
Lack	[67]	4,735	28,983

Tabelle A5: Verzeichnis GWP und KEA für Lebensphase *Betrieb BHKW*

Betriebsstoffe			
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kWh]	KEA [kWh/kWh]
Elektr. Strom	AT: Electricity grid mix (production mix)	0,170	2,029
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Motoröl	Lubricants at refinery	1,049	15,585
Biodiesel	[68]	2,160	14,139

Motorservice			
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Motoröl	Lubricants at refinery	1,049	15,585
Stahl	BF Steel billet / slab / bloom	2,019	5,137
Kunststoff PE	Polyethylene terephthalate fibers (PET)	4,123	32,290

Großes Service			
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Motoröl	Lubricants at refinery	1,049	15,585
Biodiesel	[68]	2,160	14,139
Edelstahl	Stainless steel cold rolled coil (316)	3,711	17,824
Stahl verzinkt	Steel electro-galvanised coil	3,027	9,524
Kunststoff PE	Polyethylene terephthalate fibers (PET)	4,123	32,290
Stahl	BF Steel billet / slab / bloom	2,019	5,137
Novamica Thermex	laut [60]: Edelstahl + Phlogopit-Glimmer (GaBi: Silica sand)	7,863	43,012
Flexitallic Thermiculite 815	laut [61]: Edelstahl + Phlogopit-Glimmer (GaBi: Silica sand)	7,790	40,909
Klingsil C4400	laut [59] aus: Kunststoff PA + [58]	6,529	44,552
NBR 70	[58]	5,684	41,242

Zylinderkopf und Kolben			
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Stahl	BF Steel billet / slab / bloom	2,019	5,137

Lieferketten			
Transport mit	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO₂eq./tkm]	KEA [kWh/tkm]
Zug nicht EU	GLO: Rail transport cargo – Diesel, average train, gross tonne weight 1,000t / 726t payload capacity	0,025	0,109
LKW nicht EU	GLO: Truck, Euro 2, 12 – 14t gross weight / 9.3t payload capacity	0,206	0,888
Schiff	GLO: Container ship, 5,000 to 200,000 dwt payload capacity, ocean going	0,020	0,078
Zug in EU	EU-28: Rail transport incl. fuel, average train, gross tonne weight 1,000t / 726t payload capacity	0,013	0,095
LKW in EU	GLO: Truck, Euro 5, 7.5 t – 12t gross weight / 5t payload capacity	0,081	0,345

Lieferketten			
Verpackungsmaterial	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO₂eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Holz	OSB (Oriented Strand Board)	0,212	1,008
Karton	[65]	0,850	0,877
Styropor	EPS (product)	2,868	25,016
Plastikfolie	Polyethylene-film (PE)	2,431	25,106

Hackschnitzellogistik			
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO₂eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Diesel für Ernte und Hacken des Holzes	[66]	3,749	14,995
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO₂eq./tkm]	KEA [kWh/tkm]
Container-LKW für HS-Transport	GLO: Truck, Euro 5, 20 - 26t gross weight / 17.3t payload capacity	0,073	0,309
Wegstrecke	(Aus)Nutzung als Eingabe in GaBi: GLO: Truck, Euro 5, 20 - 26t gross weight / 17.3t payload capacity	Wegstrecke [km]	Diesel-Verbrauch [kg]
Waldgrenze-Griffen	0,56 als (Zuladung/max. Zuladung)	60	13,274
Griffen-Waldgrenze	0,000058 als (1/max. Zuladung)	60	10,768
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO₂eq./kWh]	KEA [kWh/kWh]
Wärme für Vor-Trocknung aus BHKW	BHKW-Heizung - iterativ bestimmt	0,026	1,400

Tabelle A6: Verzeichnis GWP und KEA für Lebensphase *End-of-Life BHKW*

Rohstoffe und Lieferketten BHKW			
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO ₂ eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Recycling Stahl	"BF Steel billet / slab / bloom" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [69]	-0,808	-2,055
Recycling Edelstahl	"Stainless steel cold rolled coil (316)" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [70]	-1,484	-7,129
Recycling Aluminium	"Primary aluminium ingot consumption mix" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [71]	-6,914	-36,095
Recycling Kupfer	"Copper mix" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [72]	-2,229	-8,932
Recycling Blähton	[57] reduziert um 50% (eigene Annahme)	-0,186	-0,869
Recycling Stahl verzinkt	"Steel electrogalvanized coil" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [73]	-1,211	-3,810
Recycling Glas	"Container glass" reduziert um 60% (eigene Annahme)	-0,352	-1,660
Recycling Messing	"Brass (CuZn20)" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [74]	-0,173	-0,730
Recycling Silizium	"Silicon mix" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [75]	-0,688	-6,272
Recycling Rotguss (Rotmessing)	"Red brass" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [74]	-0,186	-0,723
Recycling Katalysator	"[63]" reduziert um 80% (eigene Annahme)	-1,006	-3,286
Recycling Leiterplatte	"[64]" reduziert um 80% (eigene Annahme)	-30,920	-204,677
Entsorgung Metall auf Deponie gesammelt	EU-28: Ferro metals on landfill	0,046	0,228
Entsorgung Deponie Glas/Blähton	EU-28: Glass/inert waste on landfill	0,014	0,067
Entsorgung Müllverbrennung gesammelt	EU-28: Municipal waste in waste incineration plant	0,943	0,191
Entsorgung Deponie gesammelt	EU-28: Commercial waste (AT, DE, IT, LU, NL, SE, CH) on landfill	1,021	0,248

Herstellung BHKW			
Entsorgung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO₂eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Verpackungsmaterial zu Müllverbrennung	EU-28: Municipal waste in waste incineration plant	0,943	0,191
Verpackungsmaterial auf Deponie	EU-28: Commercial waste (AT, DE, IT, LU, NL, SE, CH) on landfill	1,021	0,248
Verschnitt Metall auf Deponie	EU-28: Ferro metals on landfill	0,046	0,228
Verschnitt Deponie Glas/Blähton	EU-28: Glass/inert waste on landfill	0,014	0,067
Verschnitt nichtmetallische Materialien in Müllverbrennung	EU-28: Municipal waste in waste incineration plant	0,943	0,191
Verschnitt nichtmetallische Materialien auf Deponie	EU-28: Commercial waste (AT, DE, IT, LU, NL, SE, CH) on landfill	1,021	0,248

Betrieb BHKW			
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO₂eq./kg]	KEA [kWh/kg]
Recycling Edelstahl	"Stainless steel cold rolled coil (316)" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [70]	-1,484	-7,129
Recycling Stahl	"BF Steel billet / slab / bloom" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [69]	-0,808	-2,055
Recycling Stahl verzinkt	"Steel electrogalvanized coil" reduziert um Verhältnis Sekundär-/Primärrohstoff aus: [73]	-1,211	-3,810
Entsorgung Verpackungsmaterial zu Müllverbrennung	EU-28: Municipal waste in waste incineration plant	0,943	0,191
Entsorgung Verpackungsmaterial auf Deponie	EU-28: Commercial waste (AT, DE, IT, LU, NL, SE, CH) on landfill	1,021	0,248
Entsorgung Metall auf Deponie	EU-28: Ferro metals on landfill	0,046	0,228
Entsorgung Müllverbrennung	EU-28: Municipal waste in waste incineration plant	0,943	0,191
Entsorgung Deponie	EU-28: Commercial waste (AT, DE, IT, LU, NL, SE, CH) on landfill	1,021	0,248
Entsorgung Asche	EU-28: Glass/inert waste on landfill	0,014	0,067
Entsorgung Restkoks	EU-28: Glass/inert waste on landfill	0,014	0,067
Entsorgung Motoröl	[76]	0,026	0,127

EoL-Energie			
Bezeichnung	GaBi Prozess / [externe Literatur]	GWP [kgCO₂eq./kWh]	KEA [kWh/kWh]
Strom aus EoL-Prozessen	Vermiedener Strommix: "AT: Electricity grid mix (production mix)"	-0,170	-2,029
Wärme aus EoL-Prozessen	Vermiedene BHKW-Heizung	-0,026	-1,400

Tabelle A7: Treibhauspotenzial GLOCK GG-CHP 2.7

Lebensphase	Kategorie	Treibhauspotenzial [kgCO ₂ eq.]
Gesamt:		611.682
Rohstoffe und Lieferketten BHKW		29.118
	Rohstoffe und Komponenten	28.407
	Lieferketten und Verpackungsmaterialien	711
Herstellung BHKW		926
	elektrische Energie	424
	Kraftstoff (Diesel)	438
	Lack	64
Betrieb BHKW		622.711
	Betriebsstoffe und elektr. Strom	77.614
	Service und Wartung	155.391
	Hackschnitzellogistik	389.706
End-of-Life BHKW		-41.073
	EoL Rohstoffe und Lieferketten	-10.094
	EoL Entsorgung Asche/Restkoks	3.065
	EoL Service und Wartung	-33.788
	EoL Gutschrift Energie aus Entsorgungsprozessen: elektr. Strom	-191
	EoL Gutschrift Energie aus Entsorgungsprozessen: Wärme	-65

Tabelle A8: Kumulierter Energieaufwand (total) GLOCK GG-CHP 2.7

Lebensphase	Kategorie	Primärenergieeinsatz (total) [kWh]
Gesamt:		32.219.459
Rohstoffe und Lieferketten BHKW		123.112
	Rohstoffe und Komponenten	119.174
	Lieferketten und Verpackungsmaterialien	3.938
Herstellung BHKW		7.218
	elektrische Energie	5.074
	Kraftstoff (Diesel)	1.753
	Lack	391
Betrieb BHKW		32.294.900
	Betriebsstoffe und elektr. Strom	807.716
	Service und Wartung	928.701
	Hackschnitzellogistik	30.558.483
End-of-Life BHKW		-205.771
	EoL Rohstoffe und Lieferketten	-45.503
	EoL Entsorgung Asche/Restkoks	14.966
	EoL Service und Wartung	-169.455
	EoL Gutschrift Energie aus Entsorgungsprozessen: elektr. Strom	-2.289
	EoL Gutschrift Energie aus Entsorgungsprozessen: Wärme	-3.490

Tabelle A9: Kumulierter Energieaufwand (nicht-erneuerbar) GLOCK GG-CHP 2.7

Lebensphase	Kategorie	Nicht-erneuerbarer Primärenergieeinsatz [kWh]
Gesamt:		2.700.816
Rohstoffe und Lieferketten BHKW		102.710
	Rohstoffe und Komponenten	99.266
	Lieferketten und Verpackungsmaterialien	3.444
Herstellung BHKW		3.549
	elektrische Energie	1.522
	Kraftstoff (Diesel)	1.666
	Lack	361
Betrieb BHKW		2.760.287
	Betriebsstoffe und elektr. Strom	495.466
	Service und Wartung	749.872
	Hackschnitzellogistik	1.514.949
End-of-Life BHKW		-165.730
	EoL Rohstoffe und Lieferketten	-36.240
	EoL Entsorgung Asche/Restkoks	13.344
	EoL Service und Wartung	-141.869
	EoL Gutschrift Energie aus Entsorgungsprozessen: elektr. Strom	-686
	EoL Gutschrift Energie aus Entsorgungsprozessen: Wärme	-279

Tabelle A10: Verzeichnis GWP und KEA für Strombereitstellungsvarianten

Strombereitstellungsvarianten				
elektrische Energie aus	GaBi Prozess	GWP [kgCO ₂ eq./kWh _{elektr.}]	KEA erneuerbarer [kWh/kWh _{elektr.}]	KEA nicht-erneuerbarer [kWh/kWh _{elektr.}]
Braunkohle	DE: Electricity from lignite	1,119	0,030	3,110
Steinkohle	AT: Electricity from hard coal	0,897	0,010	2,630
Schweröl	AT: Electricity from heavy fuel oil	0,815	0,010	2,910
Gaskraftwerk	AT: Electricity from natural gas	0,607	0,040	0,280
Müllverbrennung	AT: Electricity from waste	0,516	0,000	2,620
Biogas	AT: Electricity from biogas	0,183	8,140	0,420
Photovoltaik	AT: Electricity from photovoltaic	0,059	6,010	0,230
Windkraft	AT: Electricity from wind power	0,008	2,510	0,030
Wasserkraft	AT: Electricity from hydro power	0,006	1,240	0,010