



Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften

Masterarbeit



Ökologischer Vergleich von
hochverschleißfesten Bauteilen für Anlagen
der Biogasproduktion

Christoph Maximilian Grabner, BSc

März 2024

Herr Christoph Maximilian GRABNER wird das Thema

Ökologischer Vergleich von hochverschleißfesten Bauteilen für Anlagen der Biogasproduktion

zur Bearbeitung in einer Masterarbeit gestellt.

Im ersten Abschnitt dieser Abschlussarbeit sind die theoretischen Grundlagen zur Bearbeitung der beschriebenen Themenstellung herauszuarbeiten. Hierzu sind die wesentlichen Entwicklungen innerhalb der Biogasbranche samt aller relevanten Rechtsvorschriften zu nennen. Des Weiteren soll eine umfassende Erläuterung der allgemeinen Funktionsweise einer Biogasanlage einschließlich ihrer relevanten Komponenten erfolgen sowie die sich daraus ergebenden verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten skizziert werden. Für die weitere Themenbearbeitung sind anhand einer umfassenden Literaturrecherche die Grundlagen einer Ökobilanzierung sowie die zentralen Charakteristika von Verschleißteilen einer Biogasanlage zu ermitteln.

Der Schwerpunkt des praktischen Teils bildet die Durchführung einer Ökobilanz (auch als Lebenszyklusanalyse, LCA, bekannt), die einen ökologischen Vergleich der Liefer- bzw. Wertschöpfungsketten der Produktionsprozesse von zwei hochverschleißfesten Bauteilen einer Biogasanlage beinhaltet. Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen ist die methodische Vorgehensweise einer Ökobilanzierung zu erläutern, einschließlich einer Beschreibung zur Umsetzung der Modellierung der Verschleißteile unter Einsatz der Ökobilanz-Software IPoint Umberto. Auf Basis der gewonnenen Kenntnisse sollen sowohl energetische als auch ökologische Optimierungspotenziale ermittelt und aufgezeigt werden.

Leoben, 26. Juli 2023

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Wolfgang Posch



EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, den Einsatz von generativen Methoden und Modellen der künstlichen Intelligenz vollständig und wahrheitsgetreu ausgewiesen habe, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich den Satzungsteil „Gute wissenschaftliche Praxis“ der Montanuniversität Leoben gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 05.03.2024

Unterschrift Verfasser/in
Christoph Maximilian Grabner

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit ergreifen, mich bei jenen Personen zu bedanken, die auf unterschiedliche Art und Weise zum erfolgreichen Abschluss dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Zuallererst gebührt mein Dank Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Posch, der mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Abschlussarbeit am Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften zu verfassen.

Ein herzlicher Dank gilt auch meinem Betreuer, Herrn Mag. Dr. Gerald Feichtinger, der mich in jeder Phase der Arbeit mit konstruktivem Feedback und Lösungsvorschlägen bei der Umsetzung unterstützt hat.

Außerdem möchte ich Herrn Stephan Schwarzhoff ausdrücklich danken. Durch zahlreiche aufschlussreiche Gespräche hat er mir viele wertvolle Informationen mit auf den Weg gegeben, und es mir ermöglicht, Produktionsstätten im Bereich der Biogasproduktion zu besuchen.

Zusätzlich möchte ich Herrn Fritz Schwarz, dem Gründer der größten österreichischen Biogasanlage, für die ausführlichen und interessanten Erklärungen während meiner Besichtigung, meinen Dank aussprechen.

Gewisse Details wurden mit Experten aus der Stahl- und Biogasindustrie besprochen. Danke an Herrn Dipl.-Ing. Andreas Hanghofer, Herrn Martin Kumar, Herrn Martin Kolbitsch und Herrn Martin Plautz. Ich weiß es zu schätzen, dass Sie sich die Zeit genommen haben, für ein Interview zur Verfügung zu stehen.

Zu guter Letzt gilt ein ganz besonderer Dank meiner Familie, allen voran meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht und mich dabei zu jeder Zeit unterstützt haben.

Kurzfassung

Angesichts der globalen Veränderungen in den vergangenen Jahren wird die Bedeutung klimafreundlicher Technologien für den Energiewandel in Europa weiter zunehmen. Besonders gefragt sind Lösungen, die den Prinzipien einer Kreislaufwirtschaft entsprechen und dabei vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bieten. In den letzten Jahren hat sich insbesondere die Biogasproduktion als eine vielversprechende Alternative zu fossilen Energieträgern etabliert, da sie eine nachhaltige Energiequelle darstellt und einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen leisten kann.

Zur effizienten Aufbereitung verschiedener Substrate werden in Biogasanlagen Zerkleinerungsanlagen eingesetzt, um die zu fermentierenden Materialien optimal für die Biogasproduktion vorzubereiten. Um die inneren Wände vor dem Abrieb durch den Zerkleinerungsprozess und die korrosiven Bedingungen zu schützen, werden dafür hochverschleißfeste Bauteile verbaut. Diese Wandverkleidungen sind während ihres Betriebs einem hohen Abrieb unterworfen, was häufige Wechsel erforderlich macht. Der Betreiber einer österreichischen Biogasanlage sah sich vor die Herausforderung gestellt, dass die genannten Bauteile in seinem Betrieb eine unbefriedigende Verschleißsituation zeigten.

Zur Bewältigung dieses Problems wurde ein alternatives Bauteil entwickelt, das im Betrieb eine signifikant verbesserte Verschleißfestigkeit und einen geringeren Wartungsbedarf aufwies. Aufgrund aktuell fehlender Daten zu den Materialverbräuchen und den entstehenden Emissionen durch die Herstellung solcher Produkte, soll für die Vergleichbarkeit ein Prototyp eines lebenszyklusbasierten Analysemodells (Life-Cycle-Assessment, kurz LCA) zum Einsatz kommen. Ziel ist es, die Liefer- und Wertschöpfungsketten zweier verschiedener Bauteile zu vergleichen: Hochverschleißfeste Bauteile aus Schwarzstahl mit Schweißungen aus Karbid-Legierungen, kurz HVF-Bauteile genannt, sowie Original-Verschleißteile aus Hardox-Material. Dadurch sollen mögliche energetische und ökologische Optimierungspotenziale identifiziert werden können.

Abstract

Given the global changes in recent years, the importance of climate-friendly technologies for the energy transition in Europe will continue to increase. Solutions that adhere to the principles of a circular economy and offer a wide range of applications are particularly sought after. In recent years, biogas production in particular has established itself as a promising alternative to fossil fuels, as it represents a sustainable source of energy and can make a significant contribution to reducing greenhouse gas emissions.

Shredding systems are used in biogas plants for the efficient processing of various substrates in order to optimally prepare the materials to be fermented for biogas production. Highly wear-resistant components are used to protect the inner walls from abrasion caused by the shredding process and the corrosive conditions. These wall panels are subject to a high level of abrasion during operation, which makes frequent replacement necessary. The operator of an Austrian biogas plant was faced with the challenge that the components in question were showing unsatisfactory levels of wear during operation.

To address this problem, an alternative component was developed that exhibited significantly improved wear resistance and lower maintenance requirements during functioning. Due to the current lack of data on material consumption and the emissions generated during manufacturing, a prototype of a life cycle assessment (LCA) model is to be used for comparability purposes. The objective is to compare the supply and value chains of two different components: Highly wear-resistant components made from black steel with carbide alloy welds, abbreviated as HWR, and original wear parts made from Hardox material. This aims to identify potential energy and ecological optimization potentials.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Untersuchungsrahmen	1
1.3	Methodische Vorgehensweise	2
1.4	Aufbau der Arbeit	2
2	Spezifikationen der Biogasproduktion	4
2.1	Klimaneutrale Zukunft - Die Rolle von Biogas in Europas Energiewende	4
2.1.1	Relevante Rechtsvorschriften auf europäischer Ebene	6
2.1.2	Relevante Rechtsvorschriften auf österreichischer Ebene	8
2.2	Zweck einer Biogasanlage	9
2.3	Funktionsweise einer Biogasanlage	12
2.3.1	Abläufe einer Biogasanlage	12
2.3.2	Nachhaltiger Kreislauf der Biogasproduktion	14
2.4	Substratvorbereitung	15
2.4.1	Einbringsystem	16
2.4.2	Zerkleinerungsanlage	18
2.5	Fermenter	25
2.6	Biogasaufbereitung	27
2.7	Energieproduktion und Energiebereitstellung	30
2.7.1	Energieproduktion	30
2.7.2	Energiebereitstellung	31
2.8	Nebenproduktverarbeitung	34
3	Methodische Vorgehensweise	36
3.1	Aufgabenstellung	36
3.2	Lebenszyklusanalyse (LCA)	36
3.2.1	Systemgrenzen	38
3.2.2	Zieldefinition & Bilanzrahmen	40
3.2.3	Sachbilanz	42
3.2.4	Wirkungsabschätzung	43
3.2.5	Auswertung	46
3.3	Modellierung der Verschleißteile in Umberto	46
3.3.1	Umsetzung	46
3.3.2	Definition der Produktionsprozessketten	47
3.3.3	Datenerfassung	48

3.3.4	Modellkette Hardox	50
3.3.5	Modellkette HVF.....	52
4	Ergebnisse	54
4.1	Daten und Annahmen	54
4.1.1	Annahmen.....	54
4.1.2	Hardox	55
4.1.3	HVF.....	56
4.2	Sachbilanzanalyse	58
4.2.1	Input-Bilanz	58
4.2.2	Output-Bilanz	60
4.2.3	Analyse der Materialflüsse und Energiemengen.....	62
4.3	Wirkungsabschätzung.....	65
4.3.1	CO ₂ -Bilanzen	65
4.3.2	Ableitung CO ₂ -Box	68
4.3.3	Optimierungspotenziale.....	68
4.4	Szenarienanalysen	70
4.4.1	Variation CO ₂ -Box Variante 2 – HVF	70
4.4.2	Energetische Potentiale Variante 2 - HVF	72
4.5	Vereinfachte Darstellung.....	75
4.6	Vergleich der Ergebnisse	76
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Biomethan- und Biogasproduktion in Europa	6
Abbildung 2: Anwendungsmöglichkeiten einer Biogasanlage	11
Abbildung 3: Verwendete Substrate (Inputs) und hergestellte Produkte (Outputs) einer Biogasanlage	12
Abbildung 4: Darstellung innerhalb einer Biogasanlage.....	13
Abbildung 5: Nachhaltiger Kreislauf der Biogasproduktion	15
Abbildung 6: Geeignete Substrate für die Biogasproduktion.....	16
Abbildung 7: Einbringsystem eines Ausstatters für Biogasanlagen.....	17
Abbildung 8: Schneckensystem zur gleichmäßigen Substrateinbringung	18
Abbildung 9: Zerkleinerungsanlage (Lindner-Recyclingtech) mit zugehöriger Ausstattung.....	19
Abbildung 10: Beispiel einer Zerkleinerungsanlage (Lindner-Recyclingtech) mit Schlagpatten.....	20
Abbildung 11: Beispiel einer seitlichen Wandverkleidung	22
Abbildung 12: Beispiel einer zerschlissenen Wandverkleidung	23
Abbildung 13: Funktionsprinzip Pfropfenstrom-Fermenter	25
Abbildung 14: Ring-in-Ring-System.....	26
Abbildung 15: 3-Phasen Gastrennung.....	29
Abbildung 16: Funktionsprinzip Membrantechnologie.....	29
Abbildung 17: Blockheizkraftwerk.....	31
Abbildung 18: Beispiel einer Bio-CNG Tankstelle für PKWs und LKWs.....	33
Abbildung 19: Lebenszyklusphasen einer LCA.....	37
Abbildung 20: Bestandteile einer Ökobilanz gemäß ISO 2006a	38
Abbildung 21: Systemgrenzen einer Ökobilanz	39
Abbildung 22: Modellkette kompakt – Variante Hardox	51
Abbildung 23: Modellkette kompakt – Variante HVF.....	53
Abbildung 24: Materialfluss je Produktionslos Variante 1 – Hardox	62
Abbildung 25: Elektrische Energiemengen je Produktionslos Variante 1 – Hardox	63
Abbildung 26: Materialfluss je Produktionslos Variante 2 – HVF.....	63
Abbildung 27: Elektrische Energiemengen je Produktionslos Variante 2 – HVF	64
Abbildung 28: Variation Fülldrahtpulver Variante 2 – HVF	71
Abbildung 29: Variation Fülldrahtpulver inklusive Umstellung auf Elektrolichtbogenofen-Verfahren.....	72
Abbildung 30: Variation Photovoltaik-Anteil – mit Materialbeschaffung.....	73
Abbildung 31: Variation Photovoltaik-Anteil – ohne Materialbeschaffung.....	74

Abbildung 32: Modellkette detailliert – Variante Hardox..... a
Abbildung 33: Modellkette detailliert – Variante HVF b

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkungskategorien mit den zugehörigen Wirkungsindikatoren und Einheiten.....	45
Tabelle 2: Einteilung der Produktionsschritte im gewählten „Gate-to-Grave“-Ansatz	47
Tabelle 3: Definition der Produktionsgrößen und Komponenten.....	54
Tabelle 4: Distanzen für Materialbeschaffung und Verteilung	55
Tabelle 5: Mengen- und Energiegerüst je Hardox-Verschleißblech	56
Tabelle 6: Mengen- und Energiegerüst je HVF-Verschleißblech.....	57
Tabelle 7: Input-Bilanz je Produktionslos – Variante Hardox	58
Tabelle 8: Input-Bilanz je Produktionslos – Variante HVF	59
Tabelle 9: Output-Bilanz je Produktionslos – Variante Hardox.....	60
Tabelle 10: Output-Bilanz je Produktionslos – Variante HVF	61
Tabelle 11: CO ₂ -Fußabdruck inklusive Vorleistungen je Produktionslos der Hardox-Wandverkleidung	65
Tabelle 12: CO ₂ -Fußabdruck inklusive Vorleistungen je Produktionslos der HVF-Wandverkleidung	66
Tabelle 13: CO ₂ -Fußabdruck exklusive Vorleistungen je Produktionslos der Hardox-Wandverkleidung	67
Tabelle 14: CO ₂ -Fußabdruck exklusive Vorleistungen je Produktionslos der HVF-Wandverkleidung	67
Tabelle 15: CO ₂ -Boxen für beide Verschleißteil-Produkte	68
Tabelle 16: Vergleich der Ergebnisse je Produktionslos zwischen Variante 1 – Hardox und Variante 2 - HVF	76
Tabelle 17: Output-Bilanz detailliert - Variante Hardox	c
Tabelle 18: Output-Bilanz detailliert - Variante HVF.....	e

Abkürzungsverzeichnis

BCM	Billion Cubic Metres (Milliarden Kubikmeter)
BHKW	Blockheizkraftwerk
CFC	Chlorofluorcarbon (Trichlorfluormethan - CCl ₃ F)
CNG	Compressed Natural Gas (Komprimiertes Erdgas)
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalent
EAG	Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz
EGG	Erneuerbares-Gas-Gesetz
ETS	Emission Trading System (Emissionshandelssystem)
EU	Europäische Union
EWG	Erneuerbare-Wärme-Gesetz
FQD	Fuel Quality Directive (Kraftstoffqualitätsrichtlinie)
GWG	Gaswirtschaftsgesetz
GWP	Global Warming Potential (Globales Erwärmungspotenzial)
IFU	Institut für Umweltinformatik
ISO	International Organization for Standardization
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Life-Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
LNG	Liquefied Natural Gas (Verflüssigtes Erdgas)
ODP	Ozonschichtabbaupotenzial
ÖSG	Ökostromgesetz
PCF	Product Carbon Footprint (CO ₂ -Fußabdruck von Produkten)
PE	Polyethylen
RED	Renewable Energy Directive (Erneuerbare-Energien-Richtlinie)
TS	Trockensubstanz
TWh	Terawattstunde

1 Einleitung

Zu Beginn dieser Abschlussarbeit erfolgt die Beschreibung der Ausgangssituation sowie die Formulierung der anfänglichen Problemstellung, die die Notwendigkeit zur Durchführung dieser Studie unterstreicht. Es folgt eine Darstellung der zu erreichenden Ziele und der Rahmenbedingungen der Untersuchung. Um die gesetzten Ziele zu realisieren, wird die der Arbeit zugrundeliegende methodische Vorgehensweise vorgestellt. Abschließend wird die Strukturierung des Schriftstücks näher erläutert.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Zur optimalen Aufschlüsselung von unterschiedlicher Substratmasse werden in Biogasanlagen Zerkleinerungsgeräte eingesetzt. Diese verfolgen den Zweck, diese Materialien bestmöglich für den Prozess der Vergärung zur Herstellung von Biogas vorzubereiten. Dafür ist es notwendig die Anlagen mit verschleißfesten beziehungsweise mit hochverschleißfesten Bauteilen auszustatten, um die Innenwände vor vorzeitigem Abrieb zu schützen. In einer größeren österreichischen Biogasanlage wurde festgestellt, dass diese Bauteile keine zufriedenstellende Verschleißbeständigkeit aufwiesen und somit nicht den Erwartungen des Anlagenbetreibers entsprachen. Die Folge daraus waren häufigere Wechselintervalle und erhöhte Betriebskosten.

Um eine Lösung für dieses Problem zu finden, wurde ein neuartiges Produkt entworfen, das durch eine spezielle Panzerschicht einen wesentlich verbesserten Schutz bot und somit längere Wechselintervalle ermöglichte. Zum jetzigen Zeitpunkt fehlen noch detaillierte Daten bezüglich des Materialverbrauchs und den Emissionen im Lebenszyklus der beiden verschiedenen Bauteile. Die vielversprechenden Verschleißwerte des alternativen Bauteils werfen weitergehend die Frage auf, wie das Produkt in der zukünftigen Entwicklung möglicherweise noch weiter optimiert werden könnte.

1.2 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

Um eine präzisere Vergleichbarkeit der beiden getesteten Bauteile zu gewährleisten, soll mithilfe eines Prototyps eines lebenszyklusbasierten Analysemodells (Life-Cycle-Assessment – kurz LCA) ein ökologischer Vergleich der Liefer- bzw. Wertschöpfungsketten der Produktionsprozesse dieser Bauteile durchgeführt werden. Es handelt sich einerseits um ein Original-Verschleißteil aus Hardox-Material und andererseits um ein alternatives Bauteil aus Schwarzstahl mit Schweißungen aus Chromkarbid, im Folgenden als HVF-Bauteil (HVF = Hoch-Verschleiß-fest) bezeichnet. Ziel dieser Arbeit ist es, die beiden Herstellungsprozesse schematisch darzustellen und die dabei entstehenden Material- und Energieflüsse zu erfassen. Dazu erfolgt die Definition einer geeigneten funktionellen Einheit, die als Bezugsgröße für die beiden

Produkte während des gesamten Betrachtungszeitraums dient, um eine Grundlage für die verschiedenen Berechnungen zu schaffen. Neben der Erstellung einer vorläufigen Sachbilanz der zu untersuchenden Bauteile sollen potenzielle energetische und ökologische Optimierungspotenziale identifiziert werden.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Um die festgelegten Ziele zu erreichen, erfolgt zunächst eine Erhebung der Ist-Daten für die beiden Produkte und ihre Herstellungsprozesse. Die zu vergleichende Bauteile werden als Wandverkleidungen für Zerkleinerungsgeräte in Biogasanlagen eingesetzt. Um eine präzise Modellierung zu ermöglichen, wurden im Rahmen dieser Arbeit neben Besichtigungen von Biogasanlagen und Zulieferbetrieben auch Gespräche mit Vertretern der Industrie geführt. (Hanghofer, 2023; Kolbitsch, 2023; Kumar, 2023; Plautz, 2023)

Anhand der gesammelten Daten und einer zusätzlichen Literaturrecherche wurden die beiden Produkte mithilfe der Ökobilanz-Software Umberto (Version 11) gemeinsam mit der Datenbank Ecoinvent (Version 3.9) schematisch dargestellt. (iPoint, 2024; ecoinvent, 2020)

Ecoinvent ist bereits in das Modellierungsprogramm integriert und bietet umfassende Informationen über den Umwelteinfluss verschiedener Produkte und Prozesse. Somit ermöglicht es eine präzise Erfassung der im gesamten Lebenszyklus der Bauteile entstehenden Emissionen.

Für die Literaturrecherche wurden verschiedene Quellen herangezogen, darunter wissenschaftliche Lehrbücher, Produktdatenblätter, Infobroschüren sowie allgemein öffentlich zugängliche Informationen von Unternehmen, die in der Branche Biogas tätig sind. (Tschandl, 2011; Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2021)

Die Modellierung mittels Umberto erfolgte durch die Anwendung zweier Darstellungsformen. In einem ersten Schritt wurde ein Materialflussdiagramm erstellt, um die Stoffflüsse mengenproportional zu visualisieren. In einem zweiten Modell wurde der CO₂-Fußabdruck des jeweiligen Bauteils konzipiert, um die Treibhausgasemissionen innerhalb klar definierter Systemgrenzen abzubilden. Um diese Modelle zu implementieren, wurde für alle zusätzlich notwendigen Berechnungen das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel eingesetzt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich insgesamt in fünf Kapitel inklusive der Einleitung. Im zweiten Kapitel werden zunächst die aktuellen Entwicklungen in der Biogasbranche vorgestellt und eine Erklärung gegeben, weshalb diese Form der Energieherstellung einen wichtigen zukünftigen Beitrag für Europas Energieunabhängigkeit bieten kann. Außerdem werden die technischen Prozesse innerhalb von Biogasanlagen näher beleuchtet, einschließlich der detaillierten Vorstellung der entsprechenden technischen Komponenten. Dabei erfolgt nicht nur eine umfassende Darstellung der allgemeinen

Funktionsweise und eine Übersicht über potenzielle Anwendungsmöglichkeiten, sondern auch eine genauere Beschreibung der zentralen Zerkleinerungsanlagen, welche mit den in dieser Arbeit zu untersuchenden Wandverkleidungen im Innenbereich ausgestattet sind.

Im darauffolgenden Kapitel wird auf die methodische Vorgehensweise zur Abhandlung einer Lebenszyklusanalyse eingegangen inklusive der vier Hauptphasen gemäß der ISO-Norm 14040. Es folgt anschließend eine Vertiefung in die Bedeutung der Festlegung der Systemgrenzen und der Auswahl einer geeigneten funktionellen Einheit und der Festlegung der Systemgrenzen. Das Kapitel rundet ab mit einer näheren Betrachtung der Modellierung mithilfe der Ökobilanz-Software Umberto, wobei die Definition der Produktionsprozessketten und die Art und Weise der Datenerfassung erläutert wird. Außerdem erfolgt eine ausführliche Schilderung der Modellierungsketten sowohl für das Hardox-Modell, als auch für das HVF-Modell.

Im vierten Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert, bei der die ermittelten Daten in Form eines Mengen- und Energiegerüsts, einer Sachbilanz und einer CO₂-Bilanz aufgeschlüsselt werden. Für die berechneten Emissionen werden sowohl Ergebnisse inklusive der Materialbeschaffung als auch exklusive der Materialbeschaffung betrachtet. Daraus resultiert im Sinne einer Wirkungsabschätzung eine Feststellung der möglichen Optimierungspotenziale sowohl im energetischen als auch im ökologischen Kontext für das neuartige hochverschleißfeste Bauteil.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der bedeutendsten Erkenntnisse aus dieser Arbeit und ein Ausblick, der den Stellenwert des behandelten Themas sowie der Biogasproduktion insgesamt für die Zukunft betont.

2 Spezifikationen der Biogasproduktion

Im folgenden Kapitel soll die Notwendigkeit für den Ausbau einer klimafreundlichen Möglichkeit zur Energieproduktion beschrieben werden und weshalb sich die Biogasproduktion dafür als eine ideale Möglichkeit anbietet. Zusätzlich werden aktuelle Daten für den Ausbau dieser Technologie vorgestellt und die dafür relevante Gesetzgebungen sowohl auf der europäischen als auch auf der österreichischen Ebene. Im Anschluss folgt eine Beschreibung der allgemeinen Funktionsweise einer Biogasanlage und wie diese das Konzept einer Kreislaufwirtschaft erfüllen kann. Außerdem werden auf die zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten eingegangen, die sich durch die Herstellung von Biogas eröffnen.

In den weiteren Subkapiteln werden alle dafür wesentlichen Komponenten vorgestellt und näher beschrieben. Diese umfassen das Einbringsystem, die Zerkleinerungsanlage inklusive der Schlagplatten und die in dieser Arbeit näher beleuchteten Wandverkleidungen mit einer Vorstellung der beiden untersuchten Varianten. Weiters werden der Hauptprozess einer jeden Biogasanlage, der Fermenter, aber auch die anschließende Biogasaufbereitung in Form der Gasreinigung und die verschiedenen Möglichkeiten zur Produktion oder Bereitstellung von Energie im Detail beschrieben. Das Kapitel schließt ab mit der weiteren Möglichkeit der Verwertung von Reststoffen im Sinne einer Nebenproduktverarbeitung zu flüssigem Kohlendioxid (CO₂) oder Düngemittel.

2.1 Klimaneutrale Zukunft - Die Rolle von Biogas in Europas Energiewende

In den vergangenen Jahren hat der menschliche Einfluss auf den globalen Klimawandel durch kontinuierlich steigende Treibhausgasemissionen immer deutlichere Auswirkungen gezeigt. Dies hat ein erhöhtes Bewusstsein in der Gesellschaft und eine gestiegene Nachfrage nach klimaeffizienten Lösungen erwirkt, die im Stande sind, eine Trendumkehr einzuleiten. Gleichzeitig haben geopolitische Veränderungen in einigen Teilen der Welt zu einem Umdenken geführt, um die Abhängigkeit von fossilen Energiequellen, insbesondere Erdöl und Erdgas, in der Zukunft zu senken. Ein aktuelles Beispiel dafür ist die Europäische Union, die sich aufgrund des Russland-Ukraine Konflikts dem Ziel verschrieben hat, ihre langfristige Abhängigkeit vom russischen Gas zu beenden. Deshalb ist sie derzeit aktiv auf der Suche nach Möglichkeiten, um eine größere Autonomie zu erlangen, um somit ihre wirtschaftliche, aber auch politische Abhängigkeit zu reduzieren. Die Ankündigungen der Ukraine, den Gas-Transitvertrag bis 2024 auslaufen zu lassen, unterstreichen zusätzlich die dringende Notwendigkeit eines koordinierten und raschen Handelns. Idealerweise sollten sich diese neuen Energiequellen dabei innerhalb des europäischen Raumes umsetzen lassen und zugleich die Bestrebungen für eine klimafreundliche Strategie unterstützen. Neben bereits erprobten Optionen wie der Geothermie stellt die Biogasproduktion eine äußerst

effektive und bewährte Technologie dar, die den Übergang zu einem nachhaltigeren Energiemix entscheidend unterstützen kann. Die Vorteile daraus sind offensichtlich, da die daraus gewonnenen Energiequellen äußerst flexibel und vielseitig einsetzbar sind.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit im Jahr 2023 sind in Österreich etwa 350 Biogasanlagen im Betrieb, die zusammen rund 150 Millionen Kubikmeter Biogas produzieren. Dies entspricht etwa 2 % des österreichischen Jahres-Gasverbrauchs. (Vgl. Wien Energie, 2023)

Entwicklungen in anderen europäischen Ländern geben aber Anlass zur Hoffnung, dass dieser Anteil in Österreich noch deutlich steigen könnte. In Dänemark macht heimisch produziertes Biogas bereits knapp 40 % des Gasvolumens aus, was auf einen systematischen und zielgerichteten Ausbau dieser Technologie zurückzuführen ist. Obwohl man im europäischen Vergleich bereits als Vorreiter gilt, strebt man hier noch höhere Ziele an, um diesen Anteil bis 2030 sogar auf 100 % steigern zu können. (Vgl. CNG-Mobility, 2023)

Ein Blick auf die globalen Treibhausgasemissionen verdeutlicht, warum ein globaler Umstieg auf nachhaltige und klimaneutrale Lösungen einen so hohen Stellenwert besitzt. Obwohl bereits in den vergangenen Jahren kontinuierliche Anstrengungen unternommen worden sind, um klimafreundliche Technologien auszubauen, prognostiziert eine kürzlich veröffentlichte Schätzung des Global Carbon Project einen Anstieg der fossilen CO₂-Emissionen im Jahr 2023 um weitere 1,1 % im Vergleich zum Vorjahr. Obwohl regionale Unterschiede bestehen und die USA sowie Europa bereits einen Nettorückgang verzeichnen aufgrund des Ausbaues der Erneuerbaren Energien, ist der Rückgang in Europa aber auch größtenteils den Auswirkungen der Energiekrise geschuldet. In derzeit aufstrebenden Ländern wie Indien (+8,2 %) und China (+4,0 %) steigen die Emissionen unentwegt weiterhin stark an. (Vgl. Global Carbon Budget, 2023)

Besonders in Europa zeigt sich eine hohe Abhängigkeit von Gasimporten, insbesondere aus Russland. Im Jahr 2022 lag der Anteil der insgesamt importierten Erdgasmengen durch die EU bei 97 %. Dieser Wert hebt den dringenden Handlungsbedarf in den kommenden Jahren hervor, wobei klimaeffiziente Lösungen auf dem heimischen Markt mehr denn je gefragt sein werden. Die Sinnhaftigkeit der Implementierung von Biogas als langfristige Energiequelle in Europa wurde in den letzten Jahren zunehmend erkannt und spiegelt sich nun auch in der Gesamtmenge der produzierten Energie wider. Daten der European Biogas Association (EBA) zeigen, dass die gesamte produzierte Menge an Biogas im letzten Jahrzehnt stetig zugenommen hat. Auffallend sind dabei die rasanten Zuwächse im Bereich des hergestellten Biomethans, das sich nach entsprechender Aufbereitung für die Einspeisung in das öffentliche Erdgasnetz eignet. Im Zeitraum von 2018 bis 2022 hat sich die Produktionsmenge von 2,4 bcm auf 4,2 bcm verdoppelt. Die Volumens-Einheit bcm entspricht dem Äquivalent von 1 Milliarde Kubikmeter. Es lässt sich daraus ableiten, dass europaweit Anstrengungen unternommen werden, um den Anteil des fossilen Erdgases kontinuierlich zu reduzieren.

Im europäischen Vergleich sind besonders die schnellen Wachstumsraten in Frankreich, Italien, dem Vereinigten Königreich und Dänemark hervorzuheben. Aufgrund der genannten Entwicklungen lässt sich schlussfolgern, dass in den kommenden Jahren mehr Unternehmen in dieser Branche Fuß fassen werden wollen. Daher werden in

diesem Segment hochwertige und effiziente technische Produkte von großem Interesse für jeden Betreiber einer Biogasanlage sein. (Vgl. European Biogas Association, 2023a)

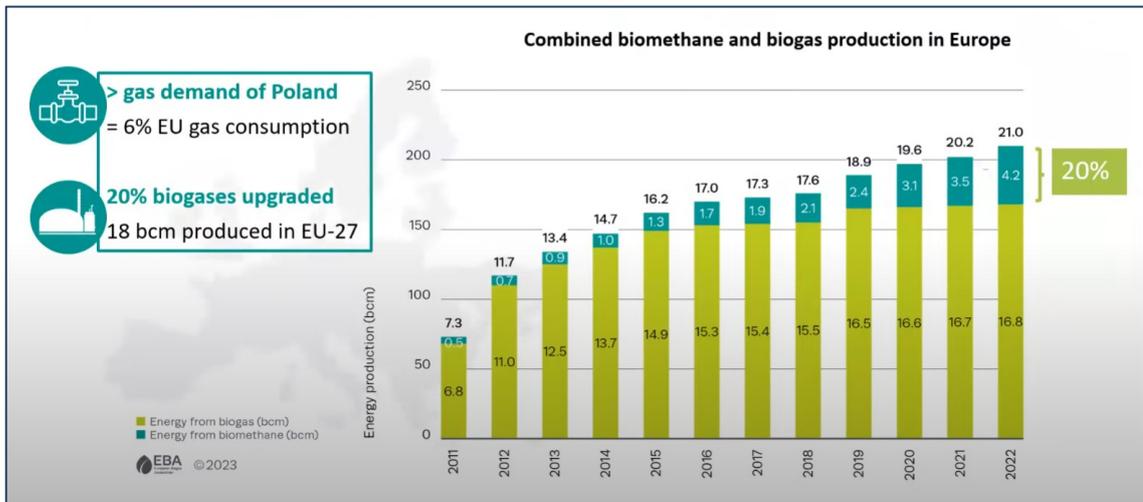


Abbildung 1: Entwicklung der Biomethan- und Biogasproduktion in Europa (Vgl. European Biogas Association, 2023b)

In dieser Grafik sind Biomethan und Biogas getrennt aufgeschlüsselt. Beide dieser Komponenten werden in einer Biogasanlage hergestellt, jedoch unterscheiden sie sich aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrem späteren Verwendungszweck. Während Biogas noch aus mehreren Inhaltsstoffen besteht wie Methan (CH₄), Kohlendioxid (CO₂), Wasserstoff (H₂) und Stickstoff (N₂), stellt Biomethan das bereits extra aufbereitete Biogas mit einem hohen Methangehalt dar. Der Anteil von Biomethan an der gesamten Biogas-Produktionsmenge lag im Jahr 2022 bei 20 % und hat insgesamt über die letzten Jahre stetig zugenommen. Die wesentliche Bedeutung von Biomethan als Ersatz für fossiles Erdgas wurde in der Europäischen Union erkannt und spiegelt sich somit auch in den Daten wider. Im Jahr 2022 waren in Europa gesamt rund 20000 Anlagen im Einsatz. Prognosen zufolge kann der Anteil von Biomethan im Jahr 2050 etwa 30-40 % des Gasverbrauchs in der Europäischen Union ausmachen. Auf diese Weise kann nicht nur ein Beitrag für eine klimafreundlichere Zukunft geleistet werden, sondern auch effektiv die europäische Abhängigkeit von fossilen Energieträgern verringert werden. (Vgl. Zukunft Grünes Gas, 2023)

2.1.1 Relevante Rechtsvorschriften auf europäischer Ebene

Im Folgenden werden die bedeutendsten Richtlinien für alle Mitgliedsstaaten der Europäischen Union vorgestellt, die für den Bereich der Biogasproduktion von Bedeutung sind. Alle davon genannten Regelungen enthalten Vorgaben zur Unterstützung des Ausbaus der Biogas-Technologie und bieten ein Rahmenwerk, wie diese erneuerbaren Energiequellen in Zukunft ausgebaut werden sollen.

Rechtsvorschrift 1: Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED III, Renewable Energy Directive) (Vgl. Europäisches Parlament, 2024)

Diese Richtlinie zielt darauf ab, den Anteil von erneuerbaren Energien gemessen am Gesamtenergieverbrauch innerhalb der Europäischen Union zu erhöhen und die Treibhausgasemissionen gemäß den Vereinbarungen des Pariser Klimaabkommens in Einklang zu bringen. Im Jahr 2023 beschlossen, stellt sie eine Weiterentwicklung der 2018 vorgestellten RED II dar. Erstmals wurde die Richtlinie von der Europäischen Union im Jahr 2009 als RED I für alle Mitgliedsstaaten eingeführt und wurde durch die Überarbeitungen bis heute kontinuierlich weiterentwickelt. In der aktuellen Fassung ist festgelegt, dass der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoenergieverbrauch bis 2030 bei mindestens 42,5 % liegen muss. Die Richtlinie bestimmt dabei Nachhaltigkeitskriterien im Zusammenhang mit Biogas und definiert Voraussetzungen für Treibhausgas-Einsparungen, damit Fördermittel beansprucht werden können. Zum Beispiel ist dabei festgelegt, dass Biogasanlagen (ab 2 MW Feuerungswärmeleistung, vor 2021 in Betrieb genommen) eine Treibhausgasreduktion von 80 % erreichen müssen. (Vgl. AGCS Gas Clearing and Settlement AG, 2024; Vgl. European Commission, 2024; Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024a, 2024e; Vgl. Agentur für Erneuerbare Energien, 2024)

Rechtsvorschrift 2: EU-Emissionshandelssystem (ETS, EU Emission Trading System) (Vgl. Europäisches Parlament, 2020)

Bei diesem von der Europäischen Union eingeführten Instrument zur Senkung der Treibhausgasemissionen werden Emissionsrechte an Unternehmen vergeben, die es erlauben eine gewisse Menge an Emissionen auszustoßen. Biogas oder Biomethan könnte in diesem Kontext eine besondere Rolle einnehmen, da es als eine erneuerbare Energiequelle gilt und somit vom Emissionshandel befreit ist. Das bedeutet, dass Betreiber von Biogasanlagen Emissionsrechte beziehungsweise Zertifikate für die durch den Betrieb erzielten Treibhausgasreduktionen erhalten können. Für diese Zertifikate besteht dann die Möglichkeit diese zu handeln. (Vgl. EBA - European Biogas Association, S. 1 ff.)

Rechtsvorschrift 3: Kraftstoffqualitätsrichtlinie (FQD, Fuel Quality Directive) (Vgl. Europäisches Parlament, 2009)

Diese Regulierung definiert die Qualität von Kraftstoffen innerhalb der Europäischen Union und hat den Zweck die Treibhausgasemissionen im Bereich der Verkehrsmobilität in Zukunft zu senken. Biogas kann zu Biomethan aufbereitet werden und dieser ist gemäß dieser Verordnung als Biokraftstoff definiert. Darin ist seit 2018 festgelegt, dass Biokraftstoffe nur dann gefördert werden dürfen, wenn durch die Verwendung des Biokraftstoffs die Minderung der Treibhausgase mindestens 60 % beträgt. (Vgl. Fehrenbach, 2019; Vgl. Maierhofer *et al.*, S. 5)

2.1.2 Relevante Rechtsvorschriften auf österreichischer Ebene

Rechtsvorschrift 1: Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG) (Vgl. AGCS Gas Clearing and Settlement AG, 2024; Vgl. RIS - Rechtsinformationssystem des Bundes, 2024a)

Dieses vom österreichischen Nationalrat im Jahre 2021 verabschiedete Gesetz sieht eine Umstellung der heimischen Stromerzeugung auf 100 % erneuerbare Energiequellen bis 2030 vor. Außerdem ist darin vorgesehen, dass Österreich bis 2040 die Klimaneutralität erreicht. Dafür bietet diese Gesetzgebung die notwendigen Rahmenbedingungen zur Erreichung dieser Ziele. Außerdem gibt es in jenen Gesetzestexten auch Vermerke über Förderungen für Biogasanlagen. Um den Anteil von Biomethan im Erdgasnetz zu erhöhen, ist für die Umstellung von Stromerzeugung auf eine Gaseinspeisung ein jährlicher Fördersatz von 15 Millionen Euro vorgesehen. Außerdem sind für neu gebaute Anlagen ein jährliches Fördervolumen von 20 Millionen Euro eingeplant. Jene Anlagen, die sich innerhalb von 10 km Nähe zum Gas-Leitungsnetz befinden, werden dazu verpflichtet Biomethan einzuspeisen, um den Anteil an grünem Gas zu erhöhen. Im Bereich der Elektrizität wird eine Marktprämie eingeführt, um Anlagenbetreiber zu unterstützen, die für die Produktion von Strom durch Biogas höhere Produktionskosten im Vergleich zum durchschnittlichen Strom-Marktpreis haben. (Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021; Vgl. Bundesministerium für Finanzen, 2024b)

Rechtsvorschrift 2: Erneuerbares-Gas-Gesetz (EGG) (Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024c; Vgl. Parlament Österreich)

Das EGG wurde im Jahr 2024 im Ministerrat bereits beschlossen und zielt darauf ab, den Ausbau der Biogasproduktion in Österreich genau zu regeln. Dabei ist als zentrales Ziel vorgesehen, dass ab dem Jahr 2030 jedes Jahr 7,5 Terawattstunden an grünem Gas in das öffentliche Gasnetz eingespeist werden müssen. Dabei wurde das im Regierungsprogramm ursprünglich vorgesehene Ziel von 5 Terawattstunden noch einmal deutlich angehoben und soll dabei helfen die Energieunabhängigkeit zu stärken und die heimische Wertschöpfung zu fördern. In Zukunft soll somit die österreichische Landwirtschaft Biogas selbst produzieren und dabei helfen den Anteil an russischem Erdgas im Netz sukzessive zu reduzieren. Für einen finalen positiven Beschluss ist nun eine Zwei-Drittel-Mehrheit im österreichischen Nationalrat notwendig. (Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024d)

Rechtsvorschrift 3: Erneuerbare-Wärme-Gesetz (EWG) (Vgl. RIS - Rechtsinformationssystem des Bundes)

Ein wesentlicher Anteil von den in Österreich verursachten Treibhausgasemissionen ist auf die Raumwärme und Warmwasserbereitstellung in privaten und betrieblichen Gebäuden zurückzuführen. Im Jahre 2019 war allein dieser Bereich für etwa 10 % der gesamten österreichweit emittierten Emissionen verantwortlich. Davon waren ungefähr 40 % von fossilen Energieträgern bereitgestellt. Mit dem Beschluss des Erneuerbaren-

Ausbau-Gesetz Ende 2023 wollte man auch diesem Segment besondere Aufmerksamkeit schenken, indem der Fahrplan zu einer Dekarbonisierung gesetzlich festgelegt wurde. Dies bedeutet, dass seit diesem Zeitpunkt keine Heizungen mehr auf fossiler Basis (zentral oder dezentral) in Neubauten eingesetzt werden dürfen. Defekte Heizsysteme dürfen dann außerdem ausschließlich durch klimaschonende Heizungen getauscht werden. Ziel ist es, bis 2035 einen kompletten Ausstieg aus allen Kohle- oder Ölheizungen zu erreichen, damit die Ziele des im EAG festgeschriebenen Vorhaben bis 2040 klimaneutral zu sein, realisiert werden können. Biogas wird jedoch hier explizit als Ausnahme genannt, da alle Geräte, die mit dem klimafreundlichen Gas betrieben werden, weiterhin genutzt werden dürfen. Somit ist ein Tausch der Gasheizung unter diesen Voraussetzungen für die Energiewende nicht zwingend notwendig. (Vgl. Bundesministerium für Finanzen, 2024a; Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024b; Vgl. VGN Digital GmbH, 2024)

Rechtsvorschrift 4: Gaswirtschaftsgesetz-Gesetz (GWG) (Vgl. RIS - Rechtsinformationssystem des Bundes, 2024b)

Im GWG werden die in Österreich gültigen Rahmenbedingungen für die Nutzung der Gasinfrastruktur geregelt, im Sinne des Transports, der Verteilung und des Vertriebs. Dabei werden auch die Voraussetzungen für die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz definiert, Regelungen zur Vergütung von Biogasanlagen-Betreiber und dem Netzzugang für Biogasproduzenten. (Vgl. Güssing Energy Technologies GmbH, 2014)

2.2 Zweck einer Biogasanlage

Biogasanlagen sind technische Anlagen, die für die Erzeugung von Biogas eingesetzt werden. Dazu werden Substrate wie Pflanzenreste, Abfälle aus der Landwirtschaft oder Lebensmittelindustrie sowie tierischen Exkrementen oder auch extra angebaute Pflanzensorten in sogenannten Fermentern, auch als Biogasreaktoren bezeichnet, unter Sauerstoffausschluss vergoren, um Biogas zu erzeugen. Dieses besteht neben geringen Mengen an Nebenstoffen wie beispielsweise Schwefelwasserstoff (H_2S) hauptsächlich aus Methan (CH_4) sowie Kohlendioxid (CO_2). (Renergon GmbH, 2021)

Grundsätzlich ergeben sich durch den Betrieb einer solchen Einrichtung sechs konkrete Anwendungsmöglichkeiten.

Energieproduktion

Möglichkeit 1: Produktion von elektrischer Energie in Blockheizkraftwerken (BHKW)

Ein erster Anwendungsfall, das in der Anlage produzierte Biogas zu nutzen, ist die Verwendung in sogenannten Blockheizkraftwerken (BHKW), um entweder elektrische Energie oder Wärme zu gewinnen. Die erzeugte elektrische Energie kann als Ökostrom

in das Stromnetz eingespeist werden, um somit Haushalte und Betriebe über das ganze Jahr hinweg mit nachhaltiger Energie zu versorgen. (Vgl. Sunbeam GmbH, 2008, S.24 f.)

Möglichkeit 2: Produktion von Wärmeenergie in Blockheizkraftwerken (BHKW)

Da beim Betrieb eines Blockheizkraftwerks neben der Stromerzeugung auch Wärme als Nebenprodukt anfällt, kann diese Abwärme dem Fernwärmenetz zugeführt werden. (Vgl. Sunbeam GmbH, 2008, S. 24 f.)

Energiebereitstellung

Möglichkeit 3: Produktion von Bio-Treibstoff (Bio-CNG / Bio-LNG)

Eine weitere Möglichkeit ist die Treibstoffversorgung von Tankstellen mit Bio-CNG (Bio-Compressed Natural Gas) für PKWs oder LKWs. Dieser Treibstoff stellt die umweltfreundliche Alternative zu CNG aus fossilem Erdgas dar, da er aus gänzlich erneuerbaren Quellen besteht. Die Nutzung ist CO₂-neutral, weist keine Feinstaubbelastung auf und damit betriebene Fahrzeuge haben eine deutlich niedrigere Geräuschkulisse als Fahrzeuge mit fossilen Kraftstoffen. Durch Verflüssigung wäre es außerdem möglich, Bio-LNG (Bio-Liquified Natural Gas) durch einen geringen zusätzlichen technischen Aufwand aufzubereiten. Diese flüssige Form eignet sich besonders für Anwendungsfälle im Langstreckenbereich. (Vgl. Sunbeam GmbH, 2008, S.26 f.)

Möglichkeit 4: Einspeisung in das öffentliche Erdgasnetz

Andererseits ist es möglich, Biomethan in das öffentliche Erdgasnetz einzuspeisen, um umliegende Gemeinden mit Energie zu versorgen. Somit müssen Endverbraucher nicht auf Erdgas aus fossilen Quellen zurückgreifen, sondern können ihren Haushalt mit Energie aus Abfall- oder Reststoffen aus der Landwirtschaft oder Bioabfällen aus der Lebensmittelproduktion versorgen. Auch Industrieabnehmer können auf diese Weise eine ökologisch sinnvolle Form der Energie für sich beanspruchen. (Vgl. Sunbeam GmbH, 2008, S. 26 f.)

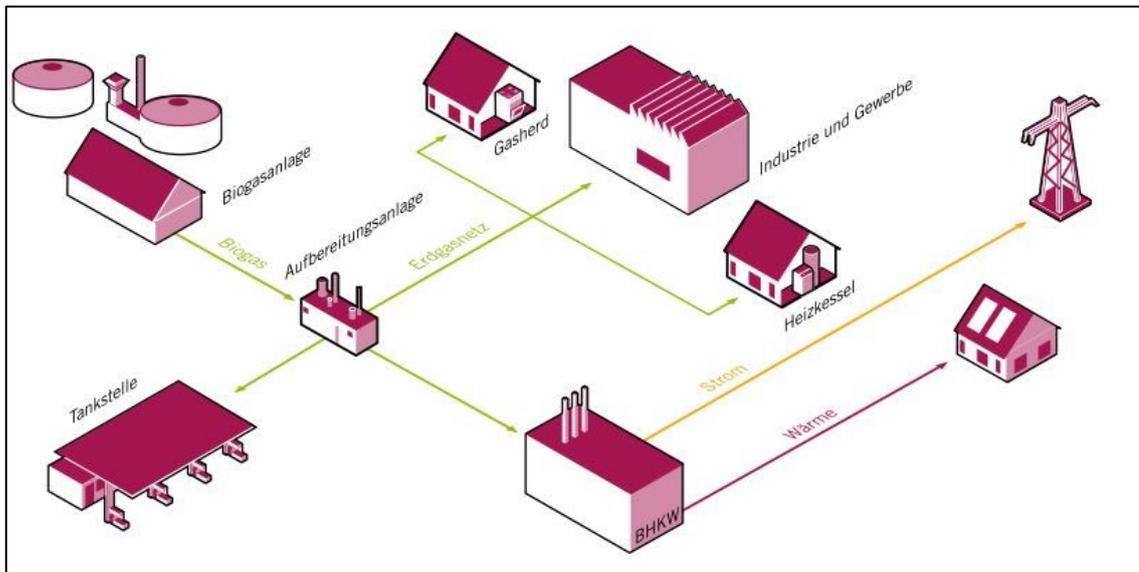


Abbildung 2: Anwendungsmöglichkeiten einer Biogasanlage (Sunbeam GmbH, 2008, S.26)

Nebenproduktverarbeitung

Möglichkeit 5: Herstellung von flüssigem Kohlendioxid (CO₂)

Da das Rohbiogas nach dem Fermentationsprozess neben dem Methan (CH₄) auch einen gewissen Anteil an Kohlendioxid (CO₂) enthält, muss dieses in der Aufbereitungsanlage abgetrennt werden, damit das Methan verwendet werden kann. Doch auch für das Kohlendioxid bietet sich eine wirtschaftliche und ökologisch sinnvolle Anwendungsmöglichkeit im Sinne einer nachhaltigen Wiederverwertung an. Durch einen separaten Verflüssigungsprozess kann es beispielsweise in Gewächshäusern als Dünger für Pflanzen eingesetzt werden. Aber auch Kühlanlagen, die Lebens- und Getränkeindustrie sowie Schlachthäuser wären weitere potenzielle Abnehmer für flüssiges Kohlendioxid (CO₂). (Bright Renewables, 2022)

Möglichkeit 6: Herstellung von Düngemittel

Der gesamte Prozess einer Biogasanlage kann als Kreislaufwirtschaft verstanden werden, da auch die bei der Fermentation entstandenen Feststoffe weiterverwendet werden können. Nach der Fermentation entsteht neben dem Hauptteil, dem Rohbiogas, neben einem flüssigen, auch ein fester Reststoff. Der flüssige Reststoff wird an die meist aus der Landwirtschaft kommenden Substratlieferanten zurückgegeben, die diesen auf ihren Feldern als Dünger wieder ausbringen können, um ihre Ernten zu fördern. Die feste Form des Reststoffes findet auch Verwendung als hochwertiges Düngemittel, den der Anlagenbetreiber selbst beispielsweise als Gemüse- oder Blumendünger weiterverkaufen kann. (Vgl. Sunbeam GmbH, 2012, S. 30–31)

Zusammengefasst können Abfälle organischen Ursprungs in Biogasanlagen nachhaltig verwertet werden, die hergestellten Produkte entstehen durch regenerative Rohstoffe. Das Biogas ist durch seine zahlreichen Verwendungsmöglichkeiten flexibel einsetzbar und eine klimafreundliche Möglichkeit der Energieproduktion oder –bereitstellung. (Vgl. Renergon GmbH, 2021)

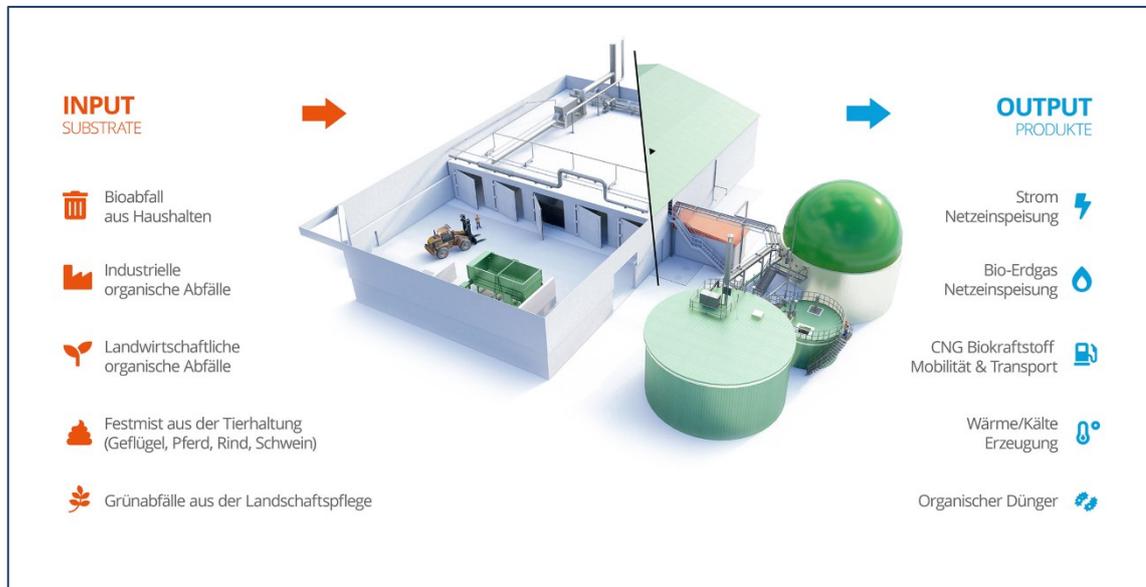


Abbildung 3: Verwendete Substrate (Inputs) und hergestellte Produkte (Outputs) einer Biogasanlage (Renergon GmbH, 2021)

2.3 Funktionsweise einer Biogasanlage

Um ein besseres Verständnis für den Einsatz von verschleißfesten sowie hochverschleißfesten Bauteilen und deren Bedeutung im Kontext der Biogasproduktion zu vermitteln, sollen im folgenden Kapitel näher auf die Abläufe innerhalb einer Biogasanlage eingegangen werden.

2.3.1 Abläufe einer Biogasanlage

Der Betrieb einer Biogasanlage gliedert sich in mehrere aufeinanderfolgende Schritte. Diese sind in der folgenden Darstellung abgebildet.



Abbildung 4: Darstellung innerhalb einer Biogasanlage (Eigene Darstellung)

Der Ablauf innerhalb einer Biogasanlage lässt sich grundsätzlich in folgende Bereiche einteilen: Die erste Phase ist die Substratvorbereitung, welche eine Lagerung, Einbringung und Zerkleinerung der Substrate umfasst, wobei die Materialien für die Fermentation im Vergärungstank vorbereitet werden. In einem ersten Schritt werden alle für die Verarbeitung geeigneten Einsatzstoffe auf einem Substratplatz zwischengelagert. Je nach aktueller Auslastung der Biogasanlage werden die Materialien dann bedarfsgerecht einem Einbringsystem, auch „Feeder“ genannt, zugeführt. Ihr Zweck ist es, die Substratmischung effizient und ohne Verstopfungen der Zerkleinerungsanlage zuzuführen, wo diese dann anschließend fein zerkleinert wird. Diese beiden Vorbereitungsprozesse sind unumgänglich, um die Stoffe so gut wie möglich für den eigentlichen Hauptprozess zu präparieren. Nach erfolgreich abgeschlossener Aufschlüsselung der Biomasse in den Zerkleinerungseinheiten wird diese gemeinsam mit Flüssigstoffen (z.B. Gülle) den Biogas-Reaktoren, auch als Fermenter bezeichnet, über eine Leitung zugeführt, um daraus das Bio-Rohgas herzustellen. Dies geschieht durch den Prozess der anaeroben Fermentation, also der Vergärung unter

Sauerstoffausschluss. Sobald dies abgeschlossen ist, wird das Rohbiogas abgezogen und es erfolgt eine Trennung zwischen den übriggebliebenen festen und flüssigen Bestandteilen.

Um das zu diesem Zeitpunkt noch verunreinigte Gas für spätere Anwendungen nutzbar zu machen, erfolgt in einem nächsten Schritt eine Biogasaufbereitung in Form der Gasreinigung. Diese stellt sicher, dass das Gas von allen Störstoffen befreit wird, um es später sowohl für eine Energieproduktion in Form einer Strom- und Wärmeerzeugung in Blockheizkraftwerken (BHKW) als auch für die Energieversorgung (Bio-Treibstoff, Erdgasnetz) verwenden zu können. Für die abgeschiedenen Reststoffe ergeben sich auch noch weitere Verwendungsmöglichkeiten. Konkret ergeben sich für das reine Bio-Methangas und die Nebenprodukte in Summe sechs verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. (Vgl. EVM Energieversorgung GmbH, 2023a)

2.3.2 Nachhaltiger Kreislauf der Biogasproduktion

Anhand eines beispielhaften Szenarios lässt sich die Nachhaltigkeit einer Biogasanlage darstellen: Ein Landwirt produziert mit seiner Landwirtschaft täglich eine gewisse Menge an Abfällen, die er der Biogasanlage als Substrat zur Verfügung stellt. Seine Fahrzeugflotte hat er bereits entsprechend umbauen lassen, um die Fahrzeuge mit Methangas betreiben zu können. Nachdem die von ihm bereitgestellten Stoffe auf der Anlage verarbeitet worden sind, bekommt er als Endprodukt ein wertiges Düngemittel zurück, das er auf seinen Feldern ausbringen kann, um seine Agrarflächen mit wertvollen Nährstoffen zu versorgen. Diese erweisen sich außerdem als sehr hilfreich bei der Schädlingsbekämpfung, was zu einem reduzierten Pestizideinsatz und einem schonenderen Umgang mit den Böden führt. Die für den Betrieb notwendigen Fahrzeuge können an der Bio-Tankstelle der Biogasanlage mit Methangas betankt werden. Für den Landwirt zahlt sich die Investition in die Biogastechnologie durch die niedrigeren Kosten für den Bio-Kraftstoff, im Vergleich zu Diesel oder Benzin, sowohl positiv auf seine Betriebskosten als auch auf die ökologische Bilanz aus. (EVM Energieversorgung GmbH, 2023b)

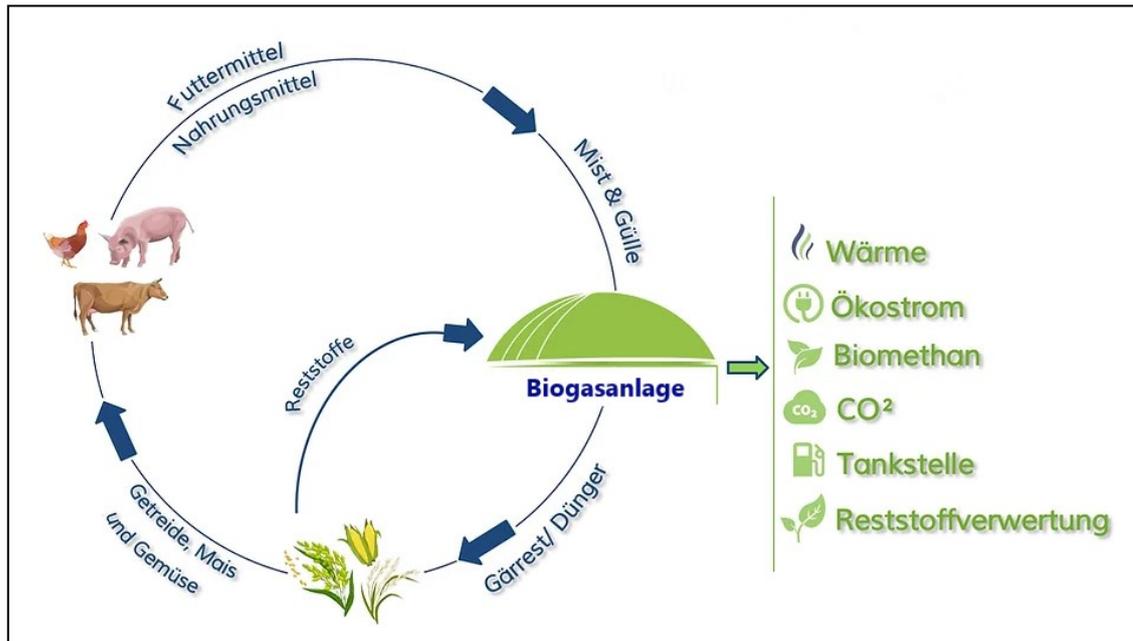


Abbildung 5: Nachhaltiger Kreislauf der Biogasproduktion
(EVM Energieversorgung GmbH, 2023d, Bearbeitet)

Die Grundvoraussetzung für den Betrieb jeder Biogasanlage ist das Vorhandensein von verwertbaren Substraten. Ist dies gegeben, müssen diese vor dem eigentlichen Hauptprozess, dem Fermenter, aber noch entsprechend vorbereitet werden.

2.4 Substratvorbereitung

Für den Betrieb einer Biogasanlage werden heutzutage häufig Substrate in Form von verstoffwechselten Futter- oder Nahrungsmitteln von Tieren wie Pferden, Rindern oder Schweinen verwendet. Aber auch Reststoffe, die aus qualitativen Gründen nicht für die Tierfütterung geeignet sind, werden als Materialien verwendet. Ein erheblicher Anteil dieser eingesetzten Mengen besteht aus strohigem Material, wie z.B. Maisstroh. Dieser entsteht als natürlicher Reststoff beim Anbau von Körnermais in der Landwirtschaft und eignet sich ausgezeichnet für die Verwertung in Biogasanlagen. Der Vorteil von Maisstroh liegt nicht nur in seiner Verfügbarkeit als Reststoff, sondern auch darin, dass kein zusätzlicher Produktionsaufwand beim Anbau betrieben werden muss und kein zusätzlicher Flächenbedarf für den Maisanbau entsteht. Daher ist die Verwendung von Maisstroh als Substrat aufgrund niedriger Anschaffungskosten wirtschaftlich attraktiv und gilt deshalb als wettbewerbsfähiges Substrat. (Vgl. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2023)

Aber auch andere Strohreste wie Weizen-, Roggen- oder Reisstroh, eignen sich für die Biogasproduktion. Zusätzlich liefern Silagen von Mais, Gras oder Futterrüben brauchbare Gasausbeuten. Silage, auch als Silofutter bekannt, wird hauptsächlich als Nahrung für Nutztiere verwendet. Der Silierungsprozess, das wichtigste Konservierungsverfahren für Grundfutter, erfolgt dabei durch die luftdichte Lagerung in

einem Silo. Dabei wird das Material in einem verdichteten Zustand über mehrere Wochen vergoren. Während der Silierung entstehen Milchsäurebakterien, die den Zuckergehalt in der Pflanzenmasse vergären, wodurch sich Milchsäure bildet. Infolgedessen sinkt der pH-Wert auf einen Wert von bis zu 4 herab, was der weiteren Bildung von Fäulnisbakterien entgegenwirkt. Sobald das Material ausreichend sauer ist, stoppt die Bildung neuer Milchsäurebakterien, und der Gärungsprozess ist abgeschlossen. Von diesem Zeitpunkt an ist eine lange Haltbarkeit der Silage gegeben und somit eignet sich dieser Prozess auch für die Konservierung von Energiequellen, die erst zu einem späteren Zeitpunkt in einer Biogasanlage verarbeitet werden. (Vgl. Landwirtschaftskammer Österreich, 2011, S. 5–6)

Zu den weiteren Einsatzstoffen zählt unter anderem der Getreideausputz, auch als Mindergetreide bezeichnet, da dieser nicht den Qualitätskriterien für die Verwendung als Lebens- oder Futtermittel entspricht. Die restlichen Anteile der verwendeten Substrate bestehen aus Reststoffen der Lebensmittelindustrie (Bioabfälle) oder aus Klärschlamm von Kläranlagen. Als geeignete Möglichkeiten zur Lagerung von Substraten bieten sich Fahrsilos, Gruben, Tanks, Hallen sowie offene Lagerplätze an. (Vgl. *Biogrinder - effiziente, wirtschaftliche Substrataufbereitung*, 2023)

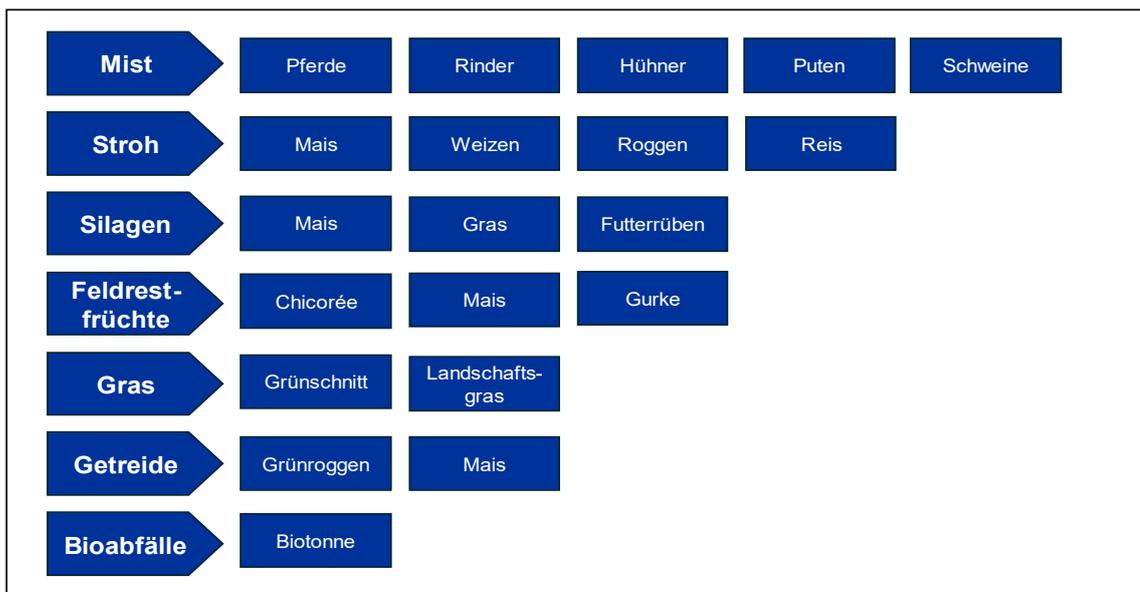


Abbildung 6: Geeignete Substrate für die Biogasproduktion (BHS Sonthofen, Eigene Darstellung)

2.4.1 Einbringsystem

Je nach aktueller Auslastung der Biogasanlage werden die Einsatzstoffe vom Substratplatz per Traktorschaukel in Auffangbehälter geladen. Da die Substrate oft sehr unterschiedliche Zusammensetzungen aufweisen, greift man in manchen Biogasbetrieben auch auf mehrere solcher Einbringsysteme zurück. Feinere Materialien wie Getreideausputz und Gemüse eignen sich besonders für die Einbringung durch ein Schneckensystem, während für strohige Materialien wie Pferdemist alternativ ein

Frässystem mit Förderbandtechnik genutzt wird. Beide Systeme verwenden eine ausgeklügelte Technik, die durch das intelligente Zusammenspiel der Fördermotoren ungleichmäßig strukturierte und langfaserige Materialien wie Mist, Stroh oder Zwischenfrüchte auch ohne Verstopfung in den Förderkreislauf transportieren kann. Für den späteren Verlauf ist es wichtig, dass möglichst wenige Störstoffe in den Fermenter gelangen, da diese für den Gasertrag nicht nützlich sind, und sich am Boden absetzen können. Zu viele Störstoffe würden zu einem kost- und zeitintensiven Prozess führen, da der Fermenter geöffnet werden müsste, was wiederum einen Stillstand der gesamten Anlage verursachen würde.



**Abbildung 7: Einbringsystem eines Ausstatters für Biogasanlagen
(BIOG, 2019)**

Eine mögliche Variante eines Einbringsystems beinhaltet auf der einen Seite des Auffangbehälters ein schräg ausgerichtetes Schneckensystem, das einen gleichmäßigen Materialfluss zum zweiten Aufbereitungsschritt, der Zerkleinerungsanlage ermöglicht. Die eingebrachten Stoffe werden aufgelockert, dosiert und so weit entzerrt, damit sie dann kontrolliert weitertransportiert werden können. Das mit säurebeständigen Edelstahlbauteilen ausgestattete System garantiert dabei einen niedrigen Verschleiß und eine hohe Lebensdauer. Da Materialien mit unterschiedlichen Zusammensetzungen oft zu Verstopfungen führen können, wird auf eine intelligente Fördertechnik zurückgegriffen, die auf die unterschiedlichen Strukturen der Substanzen reagiert. Alle vorhandenen Schnecken sind frequenzgesteuert und miteinander verknüpft. Das bedeutet, dass die erste Schnecke der nächsten Schnecke ein Startsignal sendet, sobald eine Unterlast gemessen wird. Die Unterlast beschreibt dabei den Betriebszustand, bei der die Schnecke unter einer definierten Kapazität arbeitet. Dies stellt sicher, dass die Stoffe zuverlässig weitertransportiert werden und trägt auch zu

einem niedrigeren Stromverbrauch bei. Normalerweise wird vor der Installation vorab die jeweilige Situation mit den verwendeten Substraten an der Anlage begutachtet, um dann eine maßgeschneiderte Steuerungstechnik zu programmieren, die diese Bedingungen berücksichtigt und das System optimiert. Die Anlagenkomponenten werden meist auf einer einzigen Steuerungstechnik zusammengeführt, auf die online zugegriffen werden kann. (BIOG GmbH, 2023)

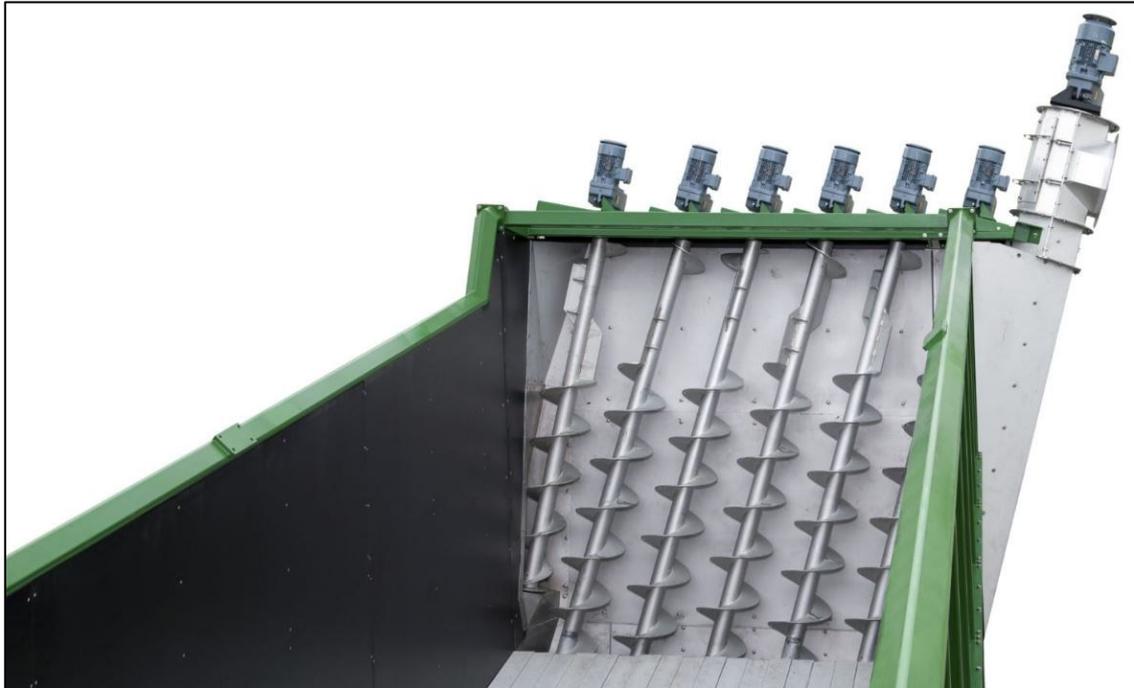


Abbildung 8: Schneckensystem zur gleichmäßigen Substrateinbringung (BIOG, 2019)

2.4.2 Zerkleinerungsanlage

Um die Substrate für den eigentlichen Hauptprozess, die Fermentation, vorzubereiten, werden sie zunächst während des zweiten Aufbereitungsschritts in den Zerkleinerungsgeräten aufbereitet oder „aufgeschlagen“. Rotierende Schlagplatten optimieren die Substratmischungen für den nachfolgenden Fermentationsprozess. Die Auslastung dieses Zerkleinerers hängt von der Anzahl und der Frequenz der Schnecken im Einbringsystem des ersten Aufbereitungsschritts ab. Die Aufschlüsselung der Substratmischung gewährleistet einen verbesserten Kontakt der Bakterien mit dem Rohstoff während der Fermentation, was zu einer höheren Gasausbeute führt. Um eine Biogasanlage wirtschaftlich zu betreiben, ist eine optimale Aufbereitung durch die Zerkleinerungseinheiten entscheidend, um die Materialien für die Bakterien im Fermentationsprozess bestmöglich zugänglich zu machen. Die Zerkleinerung führt auch zu einer größeren Oberfläche, was wiederum zu einer kürzeren Verweildauer im Fermenter führt.

Die Grundausstattung der zylinderförmigen Zerkleinerungsanlagen besteht in der Regel aus Serviceluke, Austragsschieber (Schieberblech), Scheibenrotor, Schlagplatten (Prallplatten) und einer Wandverkleidung, inklusive einer Schlagleiste. Die Serviceluke ermöglicht eine einfache Wartung und den Wechsel von Verschleißteilen durch das

Personal am Gerät. Alle diese Wartungsarbeiten können in der Regel problemlos von einem einzigen Mitarbeiter durchgeführt werden.

Durch den Austragsschieber (Schieberblech) kann der Anlagenbetreiber die Verweildauer des Substratgemisches im Gerät und somit den Grad der Zerkleinerung selbst steuern. Eine nahezu geschlossene Position des Austragsschiebers gibt ein sehr fein gemahlenes Substrat. Bei weiter geöffneter Position wird das Substrat nur mit sehr wenigen (ein bis zwei) Schlägen der rotierenden Schlagplatten versehen und fast sofort wieder aus dem Zerkleinerungsgerät befördert. Der Austrag erfolgt dabei durch einen sich an der Seite des Zerkleinerers befindlichen Schacht. Für beispielsweise reinen Pferdemist würde ein realistischer Durchsatz mit einer solchen Maschine bei einer Tonne zerkleinerten Materials pro Stunde liegen. Dabei variiert der Durchsatz je nach Komposition der verwendeten Einsatzstoffe.

Die zwei wichtigsten Komponenten einer Zerkleinerungsanlage sind die Schlagplatten und die Wandverkleidungen, die das Innengehäuse der Aufbereitungseinheiten effektiv vor Abnutzung schützen sollen. Zum besseren Verständnis folgen zwei Abbildungen eines Modells einer Zerkleinerungsanlage der Firma Lindner-Recyclingtech GmbH.

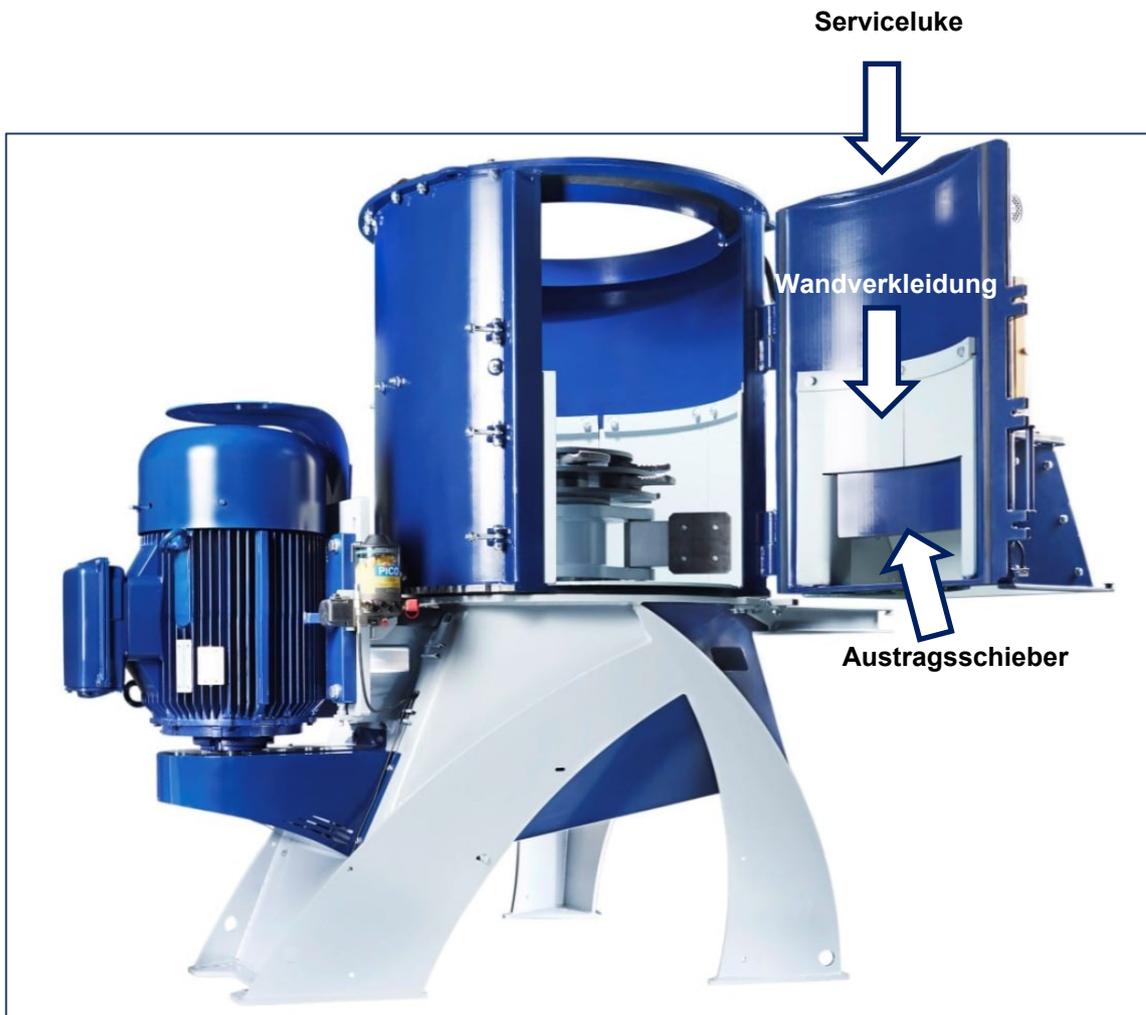


Abbildung 9: Zerkleinerungsanlage (Lindner-Recyclingtech) mit zugehöriger Ausstattung (BIOG GmbH, 2019, Eigene Darstellung)

Schlagplatten (Prallplatten)

Die von oben in das Gerät eingebrachten Materialien werden durch meist zwei gegenüberliegende Schlagplatten, die sich mit hoher Eigenfrequenz drehen (bis zu 1000 Umdrehungen pro Minute), gegen die Außenwände geworfen. Die dabei entstehenden Prall- und Scherkräfte zerkleinern die Materialien effizient, abhängig von ihrer Beschaffenheit. Da pro Stunde Einsatz teilweise bis zu mehrere Tonnen Material von den Prallplatten bearbeitet werden, unterliegen diese Komponenten in der Regel auch erheblichem Verschleiß. Je nach Art des Inputmaterials ist es möglich in der Praxis dafür unterschiedliche Metalllegierungen zu verwenden. Da der Betrieb oft unter korrosiven und abrasiven Bedingungen stattfindet, greifen Betreiber wie bei den Wandverkleidungen auch bei Prallplatten auf verschleißfeste oder hochverschleißfeste Materialien zurück, um die Wartungsintervalle so gering wie möglich zu halten. Im Falle von verschlissenen Schlagplatten sollte ein Wechsel immer möglichst rechtzeitig vorgenommen werden, um zusätzlichen Verschleiß an den Rotorarmen vorzubeugen. Ein Austausch dieser Arme ist in der Regel kostspielig.

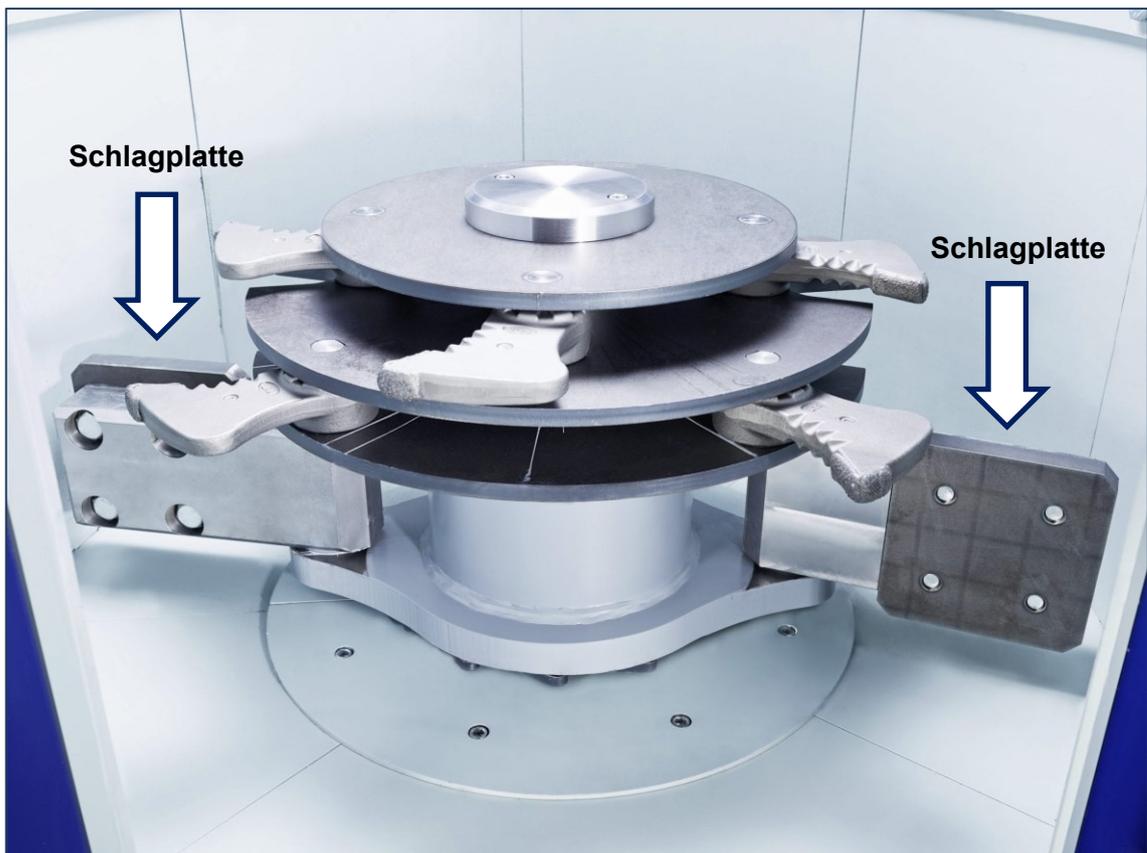


Abbildung 10: Beispiel einer Zerkleinerungsanlage (Lindner-Recyclingtech) mit Schlagplatten (BIOG GmbH, 2019, Eigene Darstellung)

Wandverkleidung

Wandverkleidungen dienen dazu, die Innenfläche der Zerkleinerungseinheit vor frühzeitigem Verschleiß zu schützen. Weiters können diese Verkleidungen in Boden-, Schieber- und Wandbleche unterteilt werden. Die seitlichen Wandverkleidungen sind mit

Schlagleisten versehen, die eine noch höhere Zerfaserung des Materials fördern. Diese Schlagleisten können bei den meisten Herstellern in beliebiger Anzahl konfiguriert werden und dienen dazu den Abstand zwischen dem sich drehenden Rotorarm und der seitlichen Wandverkleidung zu reduzieren. Das geworfene Material wird dadurch zusätzlich gequetscht und geschlagen, was einen feineren Aufbereitungsgrad ermöglicht. Der am stärksten verschleißgefährdete Teil befindet sich dabei seitlich auf Höhe der rotierenden Schlagplatten. Aufgrund der hohen Eigendynamik des behandelten Materials und der rotierenden Platten ist besonders für diesen Bereich ein effektiver Schutz erforderlich. Aus diesem Grund sind Anlagen standardmäßig mit verschleißfesten Bauteilen ausgestattet, wie zum Beispiel einem Hardox-Stahl. Ein Austausch dieser Materialien findet bei durchgehendem Betrieb der Anlage normalerweise mehrmals jährlich statt und macht somit einen nicht unerheblichen Anteil der jährlichen Betriebskosten einer Biogasanlage aus. Betreiber sehen sich somit vor die Herausforderung gestellt eine langlebige Lösung zu implementieren, die diese Betriebskosten langfristig senken und somit zu einem wirtschaftlicheren Betrieb der gesamten Biogasanlage beitragen können. Aus diesem Grund werden hochverschleißfeste Bauteile eingesetzt, um die Verschleißfestigkeit noch weiter zu steigern.

Die Notwendigkeit zum Austausch dieser Komponenten besteht immer dann, wenn die Panzerung des Materials aufgebraucht ist und somit das Risiko besteht, dass die Gehäusewand des Zerkleinerungsgerätes Schaden nimmt. Im schlimmsten Fall könnte der Zeitpunkt des Wechsels übersehen werden, sodass die vollständig verschlissene Wandverkleidung keinen Schutz mehr bietet. Dadurch könnten sich bei weiterlaufendem Betrieb innerhalb kürzester Zeit Löcher in der Außenwand des Geräts bilden, wodurch ein Teil der Substrate im Außenbereich der Maschine landet. Eine Reparatur der Außenwände wäre nur bei Stillstand der Maschine möglich. Während dieser Zeit wäre es auch nicht möglich weiteren Nachschub für die Fermenteranlage herzustellen.

Für den Betrieb sind in der Regel Materialien gefragt, die sowohl eine hohe Abrasionsbeständigkeit als auch eine zufriedenstellende Korrosionsfestigkeit aufgrund des teilweise sauren Milieus durch die feuchte Substratmasse bieten können. In dieser Arbeit werden zwei Varianten von Wandverkleidungen vorgestellt, die bereits über einen längeren Zeitraum in Biogasanlagen erprobt wurden und durch ihre individuelle Zusammensetzung unterschiedliche Verschleißsituationen aufwiesen. Bei den Analysen für diese Verkleidungen wurden ausschließlich die seitlichen Ausführungen betrachtet, die direkt auf Höhe der rotierenden Schlagplatten eingesetzt werden.



Abbildung 11: Beispiel einer seitlichen Wandverkleidung (Eigene Darstellung)

Die obere Abbildung zeigt eine typische seitliche Wandverkleidung bestehend aus vier Verschleißblechen. Der übrige offene Teil wird dann noch von dem bereits erwähnten Ausstragsschieber (Schieberblech) ergänzt. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein einzelnes verschlissenes Verkleidungsblech nach der Auswechslung. Dabei ist auf einem Großteil der Panzerfläche eine signifikante Abrasion zu erkennen, die im mittleren Bereich bereits vereinzelt zu erster Schlaglochbildung im mittleren Bereich geführt hat. Im oberen und unteren Bereich sind jeweils vier Senklöcher zu erkennen, diese dienen dazu vom Personal vor Ort mit Senkkopfschrauben und Muttern in den Zerkleinerungsgeräten eingebaut werden zu können.



Abbildung 12: Beispiel einer zerschlissenen Wandverkleidung (Eigene Darstellung)

Wandverkleidung Variante 1: Hardox

Die erste Wandverkleidung besteht aus einem verschleißfesten Hardox-Stahl mit einer nominellen Brinell-Härte von 450. Dieser speziell gefertigte Stahl stammt vom schwedischen Stahlproduzenten SSAB und ist weltweit bekannt für seine hohe Festigkeit und Beständigkeit gegenüber Verschleiß, Abrieb und Aufprallkräften und wird deshalb häufig in der Baubranche, im Bergbau und der Landwirtschaft eingesetzt.

Die hohe Festigkeit des Materials macht es dabei besonders widerstandsfähig gegenüber Beulenbildung. Aufgrund seiner Zähigkeit bietet es zusätzlich eine hohe Beständigkeit, die besonders unter kälteren Bedingungen hilfreich ist, da die strukturelle Integrität durch die Schlagkräfte nicht beeinträchtigt wird. Das untersuchte Hardox-Bauteil war aus einem Stahl mit einer Brinell-Härte von 450 gefertigt, was eine Maßgröße für die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber Verschleiß ist. (SSAB, 2023)

Die größten Legierungszusätze bei einem Hardox 450 Stahl sind Mangan (max. 1,6 %), Nickel (max. 1,5 %) und Chrom (max. 1,4 %). Quarto-Bleche, auch als Grobbleche bezeichnet, werden vom Unternehmen in Stärken von 3,2 bis 130 Millimeter angeboten. Das Unternehmen SSAB bietet neben dem Hardox 450 Produkt auch noch weitere Brinell-Härten im Bereich von 400 bis 600 an, die jeweils für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden können. Grundsätzlich gilt: Je härter das Material gefertigt ist, desto schwieriger ist es dann auch dieses zu bearbeiten. Derzeit gilt SSAB in diesem Bereich aufgrund seiner jahrzehntelangen Erfahrung als Weltmarktführer in der Herstellung von gehärteten Feinkornstählen. (Vgl. SSAB, S.1 f.)

Trotz der guten allgemeinen Eigenschaften des Hardox- Bleches, war der Einsatz der verschleißfesten Wandverkleidung im Betrieb aufgrund der anspruchsvollen

Verschleißbedingungen dennoch mit erheblichem Wartungsaufwand für den Biogasanlagenbetreiber verbunden. Die Kombination aus häufigen Wartungsintervallen und den beträchtlichen Stückkosten für das Verschleißblech führte zu einer insgesamt unbefriedigenden Situation für den Betrieb. Das Ziel war daher, weniger Wartungsintervalle und insgesamt reduzierte jährliche Betriebskosten zu erreichen.

Wandverkleidung Variante 2: HVF (Hoch-Verschleiß-fest)

Bei der zweiten getesteten hochverschleißfesten Variante griff man nicht auf ein einzelnes Produkt eines Stahlherstellers zurück, sondern kombinierte gewöhnlichen Schwarzstahl mit einer Panzerschicht aus einer speziellen Legierungszusammensetzung aus Chrom-Karbid, die der Verschleißsituation in der Biogasanlage besser entgegenwirken kann. Dabei besteht das Grundblech aus dem Schwarzstahl mit einer Güteklasse von S235, wobei diese gemäß der europäischen Norm EN 10025 die mechanischen Eigenschaften und chemische Zusammensetzung des Stahl-Produkts definiert. (f:data GmbH, 2024)

Der Buchstabe „S“ ist dabei die Abkürzung für einen strukturellen Stahl und die Zahl „235“ definiert die Mindeststreckgrenze in der Einheit Megapascal (MPa) eines unlegierten Baustahls. Die Mindeststreckgrenze ist in diesem Kontext ein Parameter für die strukturelle Integrität und Belastbarkeit des gefertigten Stahls und gibt Auskunft darüber, ab welcher Spannung das Material dauerhaft (plastisch) verformt wird. Je höher diese Zahl ausfällt, desto höher ist auch die Belastbarkeit des Stahls. Ein Schwarzstahl bezeichnet gewöhnlichen Rohstahl ohne zusätzliche spezielle Behandlung oder Zusatzlegierungen. Das Endergebnis entsteht aus dem Hochofenprozess, bei dem Eisenerz und Koks verwendet werden. Die beiden Rohstoffe werden in diesem chemischen Prozess so bearbeitet, dass als Endprodukt der Baustahl entsteht.

Für die alternative Wandverkleidung werden zwei Grundmaterialien eingesetzt. Einerseits für das Grundblech der eben angeführte Schwarzstahl und andererseits die spezielle Panzerschicht aus Chrom-Karbid. Für die Herstellung dieser hochverschleißfesten Panzerschicht muss zunächst der Schwarzstahl angeschmolzen werden, um im Anschluss über eine Portalschweißanlage die spezielle Karbidschicht auftragen zu können. Der Portalschweiß Tisch besteht dabei aus einem stabilen Stahlrahmen, der mit einer horizontalen Schweißplatte ausgestattet ist, die als Arbeitsfläche fungiert. Mithilfe von über der Arbeitsfläche installierten Portalträger, die mit Schweißvorrichtungen ausgestattet sind, können so präzise Schweißungen vorgenommen werden. (VirtualExpo Group, 2024)

Die auf den Schwarzstahl aufgeschweißte Schutzschicht soll dabei die Langlebigkeit des Bauteils signifikant erhöhen. Die ermittelten Standzeit-Werte in einer Biogasanlage haben ergeben, dass sich mit dieser HVF-Variante Betriebszeiten erreichen lassen, die beinahe um das 3-fache höher ausfallen als mit dem Hardox-Produkt.

2.5 Fermenter

Nachdem das Substrat effizient im Power Converter zerkleinert wurde, erfolgt eine Vermischung mit Gülle, die aus einer separaten Leitung kommt, um anschließend gesammelt über ein Rohr dem luftdichten Fermenter zugeführt zu werden. Gülle bezeichnet hierbei einen Abfallstoff aus der Nutztierhaltung, der neben tierischem Urin auch Kot und Reste von Einstreu enthalten kann.

Fermenteranlagen können basierend auf ihrer Bauart grundsätzlich in zwei Arten unterteilt werden. In der Vergangenheit wurden häufig liegende Fermenter, sogenannte Pfropfenstrom-Fermenter eingesetzt. Durch die Positionierung von Beschickung und Überlauf an gegenüberliegenden Enden entsteht ein langsamer Substratstrom, der durch eine oder mehrere Rührwellen initiiert wird. Diese oft quer liegenden Rührwerke verhindern dabei die Bildung von Schwimm- oder Sinkschichten. Die Beheizung der Anlage erfolgt entweder über die Außenwände oder durch eine in der Rührwelle integrierte Heizfunktion. Durch die periodisch arbeitenden Rührwerksantriebe wird eine gleichmäßige Fortbewegung des Substrats in Richtung Fermenterausgang ermöglicht. Das Gärgut wird dann in der Regel auf der gegenüberliegenden Seite ausgetragen und anschließend entwässert. Daraufhin erfolgt eine Abscheidung der Gärreststoffe. Ein Vorteil dieser Ausführungsform liegt dabei in einer schonenden Form der Substratvermischung. Häufig wird diese Anlagenform für strukturreiche Materialien eingesetzt, die einen TS-Gehalt zwischen 15 und 50 % aufweisen, wobei der TS-Gehalt die Menge Trockensubstanz je Kilogramm Substrat beschreibt. Der wesentlichste Grund, warum neuere Anlagen heute aus einer stehenden Form bestehen, liegt in den oft großen Abmessungen von liegenden Fermentern, die häufig zu Platzproblemen bei Betrieben führen. (Vgl. STRABAG Umwelttechnik GmbH, S.2 f.)

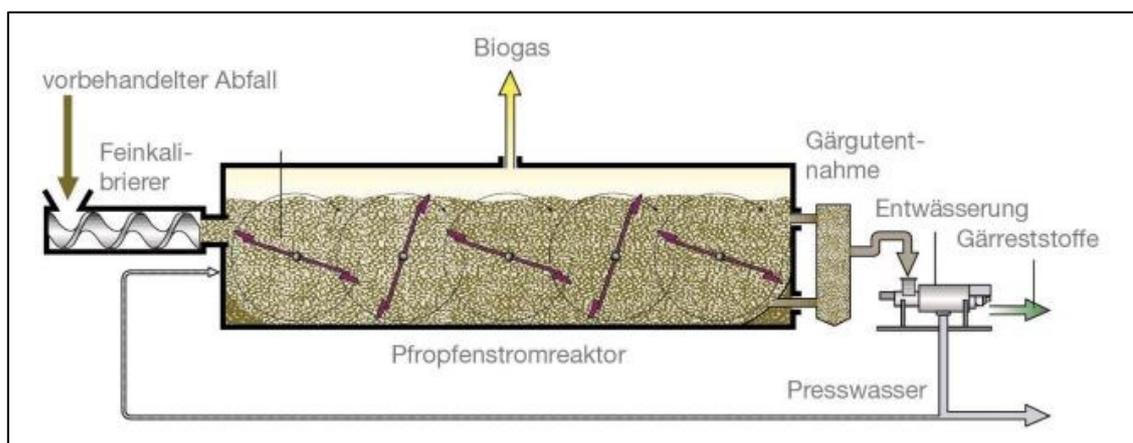


Abbildung 13: Funktionsprinzip Pfropfenstrom-Fermenter (STRABAG Umwelttechnik GmbH)

Bei der anderen Ausführung, den stehenden Fermentern, kann zwischen aus Beton oder Stahl gefertigten Varianten unterschieden werden. Bei beiden Varianten erfolgt die Beheizung entweder über eine Wandheizung (an der Innenseite installierte Edelstahlrohre) oder über eine Fußbodenheizung. Um hohen Temperaturschwankungen

vorzubeugen und gegen Witterungsbedingungen geschützt zu sein, wird die Außenseite mit einer entsprechenden Isolierung ausgestattet. Diese muss dabei im richtigen Ausmaß dimensioniert sein, um auch eine mögliche Luftzirkulation zwischen Isolierungsschicht und Behälterwand zu verhindern. Durch einen Substrateinlass wird der Fermenter nach und nach mit den verschiedenen Mischungen befüllt und dabei mit einem Rührwerk ständig in Bewegung gehalten. Der anschließende Substrataustrag wird durch einen physikalischen Überlauf ermöglicht. Das Biogas entweicht schließlich nach einer gewissen Zeit aus der Fermentationsmasse und sammelt sich im oberen Bereich der Anlage. Das produzierte Biogas setzt sich dabei aus verschiedenen Bestandteilen zusammen, mit durchschnittlich etwa 60 % Methan (CH_4), 35 % Kohlenstoffdioxid (CO_2), 3 % Wasserdampf (H_2O), 1 % Stickstoff (N_2) sowie geringen Mengen an Sauerstoff (O_2), Wasserstoff (H_2), Ammoniak (NH_3) und Schwefelwasserstoff (H_2S). (Vgl. Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft, 2022, S. 13)

Eine besondere Ausführung der Beton-Variante ist dabei das Ring-in-Ring-System, auch „Pott in Pott“ genannt. Die beiden wesentlichen Vorteile dieser Form sind kurze Pumpstrecken und somit auch niedrigere Betriebskosten. Beim Bau werden zwei Betonringe angefertigt, wobei der Innenring für den Eintrag und die Vergärung des Substrats eingesetzt wird, und der äußere Betonring für die Lagerung der Gärreste verantwortlich ist. Diese gelangen über einen Überlauf vom Innenring dort hin, nachdem das Substrat ausgegoren ist. Im Anschluss erfolgt der Verschluss der beide Betonringe mit einer Betondecke, die einen Austritt des Gases verhindert. (Vgl. Biogest®, S. 1–3)

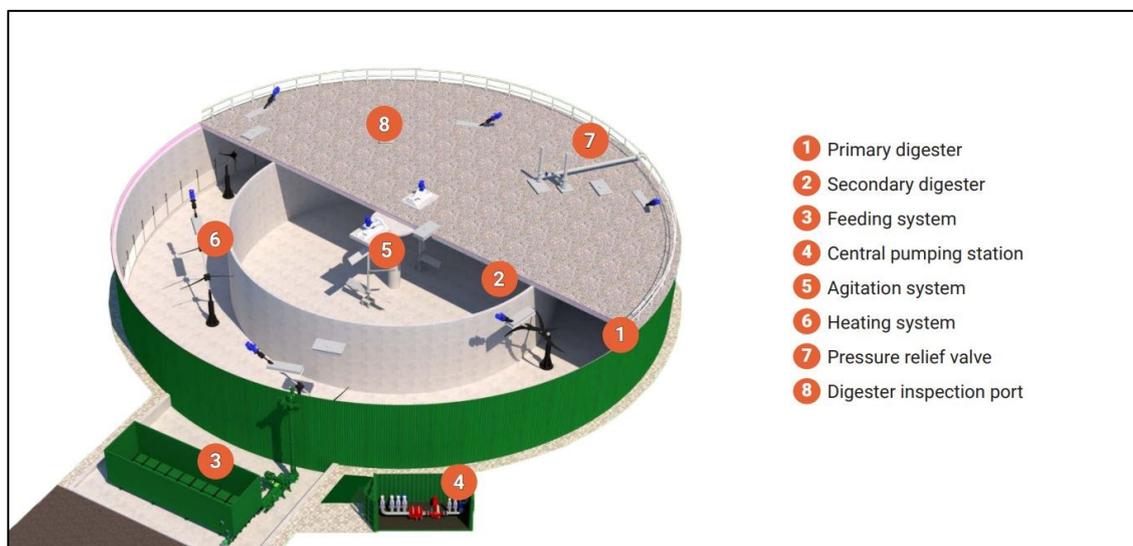


Abbildung 14: Ring-in-Ring-System (Biogest®)

Beim Prozess der Fermentation in den Silos wird die zuvor aufbereitete Substratmischung mit Bakterien versehen und zur Gärung gebracht. In den sowohl wärmeisolierten als auch beheizten Anlagen herrschen mit etwa 35 bis 40 Grad Celsius ideale Bedingungen, damit die Bakterien optimal arbeiten können. Der in den verschiedenen Substraten vorkommende Kohlenstoff wird dabei von den Bakterien innerhalb von ein paar Tagen zu Biogas umgewandelt. Die integrierten Rührwerke

sorgen dafür, dass die Mischung mit nur geringem Energieaufwand durchgemischt wird und das Biogas nach und nach entweichen kann. (Vgl. Sunbeam GmbH, 2012, S.16)

Feststoffabtrennung

Bei der Fermentation entstehen außerdem Gärreststoffe, die mithilfe eines Separators in eine feste und eine flüssige Phase aufgespalten werden. Für die festen Überreste besteht die Möglichkeit einer zusätzlichen Aufbereitung, sowohl in Form einer Kompostierung als auch einer Carbonisierung. Der kompostierte Reststoff eignet sich aufgrund seines sehr hohen Nährstoffanteils (Phosphor, Kalium, Stickstoff) ideal als hochwertiger landwirtschaftlicher Dünger. Bei der Carbonisierung könnten außerdem durch ein spezifisches Temperatur- und Druckverfahren aus diesen Stoffen hochwertige Kohlen erzeugt werden, die sich wiederum als Aktivkohlefilter, beispielsweise zur Reinigung von beispielsweise Biogas, eignen würden. Die flüssige Restphase, die Dünngülle, enthält ebenfalls wertvolle Nährstoffe. Durch das Verfahren der Ultrafiltration kann der verbleibende Wasseranteil abgetrennt werden, um anschließend eine Anreicherung mit zusätzlichen Nährstoffen vorzunehmen. Schließlich entsteht daraus ein weiteres landwirtschaftliches Düngemittel. (Vgl. Burgstaler, 2023)

2.6 Biogasaufbereitung

Das hergestellte Bio-Rohgas muss nun in der nächsten Phase von jeglichen Störstoffen befreit werden, um für eine spätere Nutzung in Form einer Energieproduktion und -bereitstellung einsetzbar zu sein.

Gasreinigung

Nach dem Ausgang aus dem Fermenter besteht das Rohbiogas aus einer Mischung von Methan und Kohlendioxid, die mit Schmutz-, Wasser- und Schaumpartikeln verunreinigt sind. Um das Rohbiogas sowohl in Erdgasqualität anbieten als auch in einem Blockheizkraftwerk verbrennen zu können, ist es notwendig eine Gasreinigung durchzuführen. Jede Anlage ist üblicherweise mit entsprechenden Reinigungstechnologien ausgestattet, um diese Aufgaben bewältigen zu können. Der gesamte Reinigungsprozess kann in vier wesentliche Teilschritte unterteilt werden. Die Entschwefelung, die Gastrocknung, die Trennung von Methan und Kohlendioxid (bzw. anderen verbliebenen Gasresten) und schließlich die Konditionierung des Methangases für die Einspeisung in das Erdgasnetz.

Da nicht entfernte Schwefelwasserstoff-Belastungen bei der späteren Stromerzeugung in Blockheizkraftwerken (BHKW) zu Schäden führen können, werden in einem ersten Schritt diese Moleküle aus dem Gemisch entfernt. Würde das Gas bei der Verwertung im BHKW noch Restanteile von Schwefelwasserstoff (H_2S) enthalten, entstünde bei der Verbrennung von H_2S aggressive Schwefelsäure (H_2SO_4). H_2S ist zudem hoch korrosiv und greift metallische Oberflächen an. Mithilfe dieser Maßnahme kann einer Korrosion von Rohrleitungen und anderen Bauteilen des BHKWs wirksam vorgebeugt werden. Meist ist der Anteil des Schwefelwasserstoffs aber jedoch nur gering. Heutzutage werden in den meisten Anlagen dafür Aktivkohlefilter eingesetzt, die vom

Rohgas von unten nach oben durchlaufen werden, wobei das H₂S von der Aktivkohle aufgefangen wird. Das gereinigte Gas ist nun bereit in den nächsten Reinigungsschritt geleitet zu werden. (Schiffer, 2023)

Im zweiten Teil der Gasreinigung werden die verbliebenen Wasserpartikel (Wasserdampf) mittels Trocknungsverfahren entzogen. Dabei macht man sich die physikalischen Eigenschaften von Gasen zunutze. Indem das Gas unter die Taupunkttemperatur des Wasserdampfes gekühlt wird, erfolgt eine Kondensation des Wassers. Dieses Kondenswasser wird dann in einem Abscheider gesammelt und abgetrennt. (Vgl. Siloxa Engineering AG, 2023)

Der folgende Prozessschritt der Separation dient dazu, das Methan in erster Linie vom Kohlendioxid abzutrennen. Aber auch andere Gaspartikel werden dabei vom Methan abgeschieden. Ziel ist es, das Gas so weit zu reinigen, dass es später auch energetisch nutzbar ist. Nur mithilfe einer vollständig durchgeführten Gasreinigung kann sichergestellt werden, dass höhere Methangehalte für eine Biomethanisierung erreicht werden bzw. diese auch motorisch in Blockheizkraftwerken verwertet werden können. (Vgl. Burgstaler, 2023)

Die am Markt derzeit verfügbaren Methoden zur Methananreicherung sind die Druckwasserwäsche, Druckwechseladsorption, Aminwäsche und das Membranverfahren. Dabei unterscheiden sie sich in der Art und Weise wie der Trenneffekt vom Kohlendioxid und Methan erreicht wird. Auf das Membrantrennverfahren, das bei der Biogasanlage verwendet wird, die im Rahmen dieser Arbeit besichtigt wurde, soll hier näher eingegangen werden. Bei dieser häufig eingesetzten Separationsmethode wird mithilfe einer dreistufigen Membrantechnologie eine effiziente Trennung von Methan und Kohlendioxid erreicht. Über einen Hochdruckkompressor wird die Mischung zunächst auf den notwendigen Betriebsdruck gebracht und daraufhin über eine mehrstufige Membranseparation geleitet. Durch die unterschiedliche Permeabilität (Wandergeschwindigkeit) von Gasen in Polymeren erfolgt die Trennung über hochselektive Membrane. Die Membranoberfläche hat eine höhere Selektivität für Kohlendioxid als für Methan, wodurch die kleineren Kohlendioxid-Moleküle die Mikroporen der Membran in der ersten Phase zügiger durchwandern als die größeren Methanmoleküle. Eine Druckdifferenz ist dabei die treibende Kraft bei der Gastrennung. Die treibende Kraft bei der Gastrennung ist dabei eine Druckdifferenz. In der zweiten Phase wird das bereits methanreiche Gas weiter gesäubert, sodass das Endprodukt eine Reinheit von ca. 97-99,5 % aufweist. Das im ersten Teilschritt abgeschiedene kohlenstoffdioxidhaltige Gas wird dann zur dritten Phase transportiert, um daraus noch die letzten Reststoffe von Methan zu gewinnen. Durch diese Technologie kann sichergestellt werden, dass der ursprünglich vom Methan abgeschiedene Anteil am Ende von Phase 3 nur noch maximal 0,5 % Methangasreste aufweist. Für das kohlenstoffdioxidhaltige Gas kann anschließend noch durch einen Verflüssigungsprozess eine Aufbereitung für industrielle Anwendungen vorgenommen werden. (Vgl. Bright Biomethane, S. 1–3)

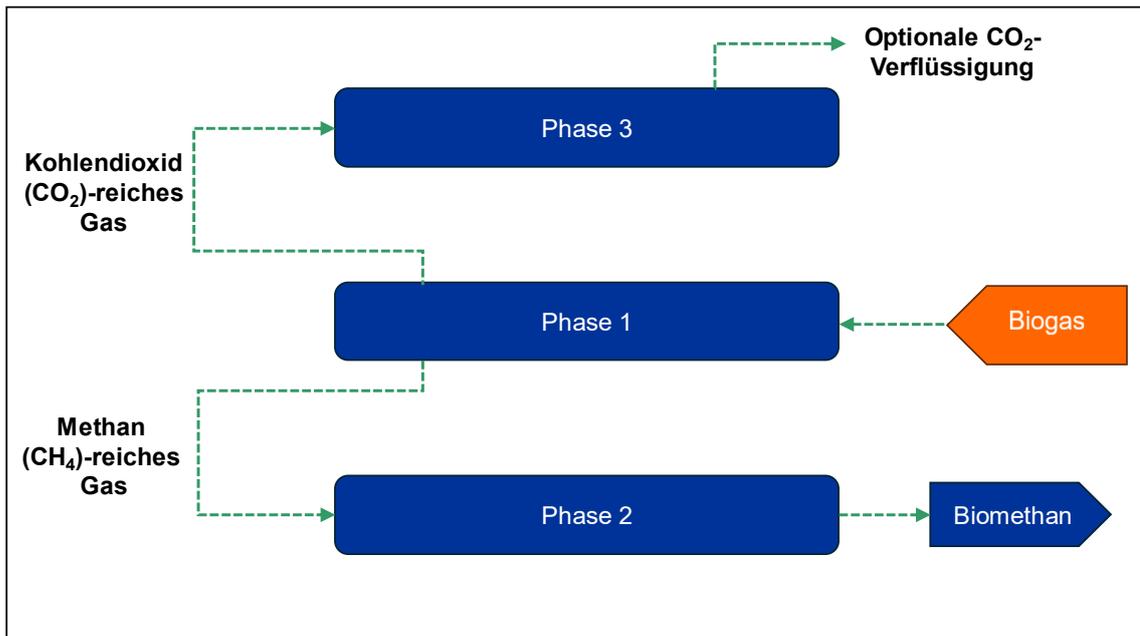


Abbildung 15: 3-Phasen Gastrennung (Bright Biomethane, 2023, Eigene Darstellung)

Um eine optimale Trennung sicherzustellen, wird für jeden spezifischen Anwendungsfall eine individuelle Membrankonfiguration errechnet. Jedes Membranmodul besteht dabei aus mehreren Tausend Hohlfasern, die aus dem Hochleistungskunststoff Polyimid gewonnen werden. Diese aromatischen Kunststoffe eignen sich aufgrund der genannten hohen Selektivität besonders gut für die Separation. Auf der Hochdruckseite der Membran wird das Methan angereichert, während der größte Teil des CO_2 sowie andere kleinere Rückstände wie Wasserdampf, Ammoniak oder Schwefelwasserstoff durch das molekulare Sieb hindurchwandern. Somit macht die Membrantechnologie den fast gesamten Anteil von Methan im hergestellten Biogas für die spätere Nutzung brauchbar. Dabei ist die Technologie auf keine weiteren Hilfsmittel wie Wasser oder Sorptionsmittel angewiesen. (Vgl. Evonik, S.1 ff; Vgl. Sunbeam GmbH, 2012, S.84f.)

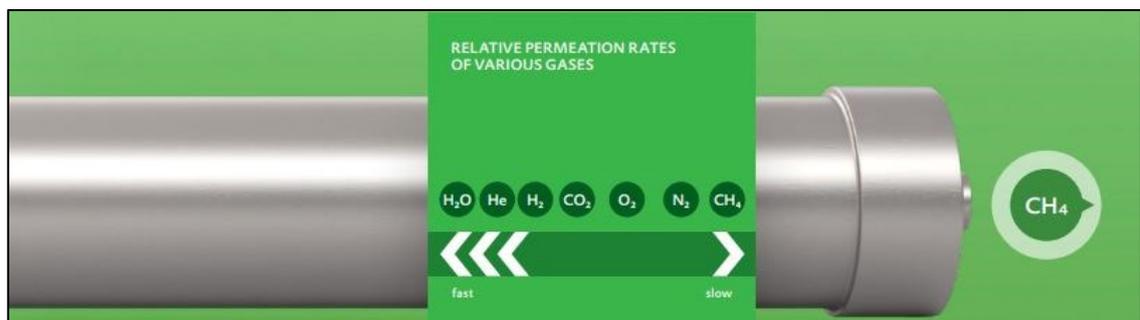


Abbildung 16: Funktionsprinzip Membrantechnologie (Evonik)

Für den Fall, dass das Biomethan später in das Erdgasnetz eingespeist werden soll, ist es notwendig das Gas zu konditionieren. Jedes eingespeiste Gas muss gewissen Qualitätskriterien in puncto Druck, Trockenheit, Brennwert und Odorierung entsprechen. Länderspezifisch gibt es dafür gewisse Richtlinien, die eingehalten werden müssen. Die

Odorierung ist dabei als eine Sicherheitsmaßnahme im Sinne einer Beimengung von geruchsintensiven Substanzen zu verstehen, um das geruchsneutrale Methangas bei ungewollten Austritten frühzeitig erkennbar zu machen. (DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2023)

2.7 Energieproduktion und Energiebereitstellung

Ab diesem Zeitpunkt ist Bio-Rohgas soweit konditioniert, sodass es für die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten nutzbar ist. Einerseits besteht die Möglichkeit zur Energieproduktion in Form eines Blockheizkraftwerkes (BHKW), welches sowohl Strom- als auch Wärmeenergie erzeugen kann. Andererseits kann das fertiggestellte Bio-Methangas für die Energieversorgung in Form eines Bio-Treibstoffes bereitgestellt werden oder in das öffentliche Erdgasnetz eingespeist werden. Ein zentraler Vorteil der Biogasproduktion ist, dass Biogas sowohl speicher- als auch regelbar ist. Im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energiequellen wie Solar- oder Windenergie ist Biogas wetterunabhängig, dauerhaft verfügbar, kann gespeichert und transportiert werden und je nach aktuellem Bedarf verwertet werden. Dadurch ergibt sich ein wesentlicher Wettbewerbsvorteil von Biogas im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien. (Vgl. Renergon GmbH, 2024)

2.7.1 Energieproduktion

Nachdem das ursprüngliche Biorohgas von allen Störstoffen & Verunreinigungen befreit worden ist, steht es für die wirtschaftliche Nutzung bereit. Die Verwertung von Methangas in einem Blockheizkraftwerk ist ein beliebtes Verfahren, um entweder Wärme oder Strom zu erzeugen. Das Funktionsprinzip der Anlage basiert dabei auf der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).

Mithilfe eines üblicherweise genutzten Verbrennungsmotors wird in den häufig kompakt gehaltenen Kraftwerken durch den Antrieb eines Generators das Biomethan verbrannt und daraus sowohl elektrische Energie als auch Wärmeenergie gewonnen. Der erzeugte Strom kann anschließend an die zuständigen Energieversorger verkauft werden. Die bei der Erzeugung von Strom entstandene Wärme kann für die Versorgung von Gebäuden in umliegenden Gemeinden verwendet werden. Durch die gleichzeitige Produktion von Wärme und Strom mit einer solchen Kraft-Wärme-Kopplungsanlage, die mit Biomethan betrieben wird, wird im Vergleich zur separaten Herstellung außerdem weniger Primärenergie benötigt. Blockheizkraftwerke befinden sich typischerweise entweder direkt am Standort der Biogasanlage oder in unmittelbarer Nähe, deshalb fällt ein aufwändiger Transport aus potenziell unsicheren Regionen, wie es beim fossilen Erdgas der Fall ist, weg. Zudem entstehen durch die Verbrennung auch keine zusätzlichen Emissionen. Der Grund dafür ist, dass bei der Herstellung von Biogas lediglich so viel Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt wird, wie die Energiepflanzen während ihres Wachstums aufgenommen haben oder das bei der natürlichen Verrottung von Abfällen ohnehin entweichen würde. Somit ergeben sich durch die parallele Erzeugung von sowohl Wärme als auch Strom mit Biogas durch Blockheizkraftwerke mehrere Vorteile.



Abbildung 17: Blockheizkraftwerk (SWU Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm GmbH, 2023)

Heutzutage liegt der elektrische Wirkungsgrad bei der Verwertung moderner BHKW-Anlagen typischerweise zwischen 28 % und 47 %, während der thermische Wirkungsgrad zwischen 34 % und 55 % variiert. Dies ergibt in der Regel einen Gesamtwirkungsgrad zwischen 85 % und 90 %. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2024b)

Deren Einsatz ist somit gegenüber einer getrennten Erzeugung von Strom und Wärme vorzuziehen. Der Wirkungsgrad trifft dabei eine Aussage darüber, welcher Prozentsatz des verwendeten Brennstoffs in brauchbare Energie umgewandelt werden kann. Diese hohe Effizienz wird maßgeblich durch das Prinzip der KWK (Kraft-Wärme-Kopplung) bestimmt. Biomethan-BHKW sind zudem eine der besten Möglichkeiten, CO₂-Emissionen zu reduzieren und leisten somit einen bedeutsamen Beitrag zum Klimaschutz. (Vgl. EVM Energieversorgung GmbH, 2023c)

2.7.2 Energiebereitstellung

Bio-Treibstoff

Das erzeugte Biogas kann ebenso zur Betankung von CNG- oder LNG-fähigen PKWs oder LKWs genutzt werden. CNG ist die Abkürzung für Compressed Natural Gas und ist ein komprimiertes Gas, das häufig für Fahrzeuge überwiegend im Kurz- bis Mittelstreckenbereich bis maximal 500 Kilometer eingesetzt wird. Allgemein lässt sich festhalten, dass sich die Automobilbranche in Zukunft zwar mehr Richtung Elektromobilität orientieren wird, doch es gibt auch hierfür geeignete Anwendungsbeispiele. Dafür wären Fahrdienste im Bereich des Verteiler-, Zustell- oder Baustellenverkehrs zu nennen. Für den Fernverkehr könnte man auf die Alternative,

das LNG-Gas (Liquified Natural Gas) zurückgreifen. Möchte man diesen Treibstoff neben dem CNG auch dem Endkunden anbieten, wäre es in diesem Fall notwendig zur Verflüssigung zu LNG das gereinigte Biogas mit Stickstoff bis unter seinen Taupunkt zu kühlen. Dafür ist für ein Kilogramm LNG etwa ein Kilogramm flüssiger Stickstoff nötig, was das Endprodukt auch etwas teurer macht als das CNG. Wenn diese beiden Treibstoffarten durch Biogas hergestellt werden, dann werden diese als Bio-CNG oder Bio-LNG bezeichnet. LNG-betriebene Lastkraftwagen schaffen in der Praxis Reichweiten von bis zu 1600 Kilometern, und somit eignet sich diese Variante speziell für den Fernverkehr. Im Vergleich zu gewöhnlichen Diesel- oder Benzinkraftstoffen muss der Fahrer dabei bei beiden Möglichkeiten keine Abstriche in puncto Fahrverhalten oder Dynamik machen. Es ergeben sich daraus sogar gewisse Vorteile, nämlich ein erhöhter Komfort durch eine niedrigere Geräuschkulisse. Ein häufiges Missverständnis betrifft die potenzielle Gefährdungslage durch ein Erdgas- oder Biogas-betriebenes Fahrzeug im Falle eines Unfalls. Während bei einem Fahrzeug mit Benzin- oder Dieselaggregat bei Beschädigung des Tanks die Flüssigkeit ausfließen und dabei die Umwelt nachhaltig verschmutzen kann, ist dieses Problem bei erdgasbetriebenen Fahrzeugen nicht gegeben. Das enthaltene Erdgas würde sich dann nämlich in der Luft verflüchtigen. (Vgl. Knauber Gas GmbH & Co. KG, 2023; Vgl. EVM Energieversorgung GmbH, 2023b)

Ein weiterer Vorteil von Erdgas oder Biogas als Antriebsquelle ist auch die verbesserte Umweltbilanz. Im Gegensatz zu Benzin oder Diesel kommt es bei der Verbrennung von Erdgas zu praktisch keinem Rußpartikel- oder Feinstaubausstoß, was zur Luftreinhaltung im öffentlichen Raum beiträgt.

Da Erdgas von Natur aus einen niedrigen Kohlenstoffgehalt besitzt, entstehen bei der Verwendung als Kraftstoff auch nur niedrigere Mengen an Kohlendioxid (CO₂), im Vergleich zu Benzin und Dieselaggregaten liegt die Einsparung bei 10-20 %, je nach Art des Aggregats. Zur Einsparung von Treibhausgasemissionen könnte der Einsatz von Erdgas (speziell in Kombination mit Biogas) deshalb einen wertvollen Beitrag leisten. Außerdem fällt die Belastung durch Stickoxide (NO_x) beinahe völlig weg (Senkung um 95 %). Stickoxide sind mitverantwortlich für den sauren Regen und die Vergrößerung des Ozonlochs, außerdem stellen sie eine gesundheitliche Belastung für den Menschen dar. (Vgl. Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen, S.9)

Bei Biomethan liegt der Einsparungseffekt von Treibhausgasen sogar bei 100 %, man ist damit komplett klimaneutral unterwegs. Genau genommen ist Biogas derzeit sogar der umweltfreundlichste verfügbare Kraftstoff. Bei der Verbrennung wird wie erwähnt einerseits kein Kohlendioxid ausgestoßen und gegenüber Elektrofahrzeugen fällt die emissionsintensive Batterieproduktion gänzlich weg. (Vgl. Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen, S.9)

Angesichts der Tatsache, dass in Österreich etwa ein Viertel der Kohlendioxid-Belastung und knapp über 40 % der Stickoxid-Belastung durch den Verkehr verursacht werden, wird von Experten häufig auf die Notwendigkeit hingewiesen, diese Belastungen vor allem in städtischen Bereichen zu reduzieren. Erdgas und vor allem Biogas als Antriebsquelle könnte hier speziell im Bereich der öffentlichen Verkehrsmittel Abhilfe schaffen. (Vgl. Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen, S.7)

Ein weiterer vorteilhafter Effekt durch die Verwendung eines Erdgas- oder biogasbetriebenen Fahrzeugs liegt in der Tatsache, dass deren Einsatz keine Geruchsentwicklung bzw. nur eine geringe Geräuschbelastung verursacht. Im Gegensatz zu Diesel-Motoren wird ein Erdgasauto nämlich nur als halb so laut empfunden. Zuletzt ergibt sich auch für den Endkunden ein signifikanter wirtschaftlichen Vorteil durch reduzierte Betriebskosten im Alltag. 1kg erneuerbares Bio-Methangas in Form von CNG liefert dabei dieselbe Energiemenge wie 1,5 Liter Benzin oder 1,3 Liter Diesel. (Vgl. EVM Energieversorgung GmbH, 2023b)



**Abbildung 18: Beispiel einer Bio-CNG Tankstelle für PKWs und LKWs
(Vgl. Energieversorgung Alzenau GmbH, 2024)**

Einspeisung in das öffentliche Erdgasnetz

Eine weitere Möglichkeit der Energieversorgung ist die Einleitung des gereinigten Bio-Methangases in das öffentliche Gasnetz. Bevor dies geschieht, muss sichergestellt sein, dass die Rahmenbedingungen für die Einspeisung erfüllt sind. Für das österreichische Gasnetz sind diese Richtlinien im Österreichischen Gaswirtschaftsgesetz (GWG) geregelt. (Vgl. Güssing Energy Technologies GmbH, 2014)

Darin ist definiert, dass der Zugang für jeden österreichischen Biogasanlagenbetreiber grundsätzlich möglich sein muss. Damit Gas ohne Bedenken in das Erdgasnetz eingespeist werden kann, muss dieses aber gewissen Standards und Regularien erfüllen. Dabei geht es in der Regel um die Einhaltung von wichtigen Qualitätskriterien,

wie beispielsweise dem Methangehalt, der in Österreich bei mindestens 98 % liegen muss. (Vgl. Kompost & Biogas Verband, 2022)

Aber auch andere Standards sind erwähnenswert, wie beispielsweise der Schwefelwasserstoffgehalt, der Feuchtigkeitsgehalt oder der Wobbe-Index. Dieser Index-Wert charakterisiert das Erdgas, indem er eine Aussage darüber trifft, wieviel Energie pro Kubikmeter bei der Verbrennung des Gases abgegeben wird. Für einen Gasnetzbetreiber ist es wichtig, Gase mit ähnlichen Wobbe-Indizes zu verwenden, da es ansonsten zu Problemen bei Endkunden kommen könnte. Stark unterschiedliche Gase können dazu führen, dass Gasbrenner oder Heizkessel in Haushalten nicht gleichmäßig brennen, reduzierte Effizienzen aufweisen oder sogar Schäden dadurch davontragen. (Vgl. INFRACON Infrastruktur Service GmbH & Co. KG, 2022)

Im Jahre 2022 lag der österreichweite Gasverbrauch gemessen in Terawattstunden bei knapp über 88 TWh.

Derzeit liegt der Anteil an Biogas im Erdgasnetz bei 0,14 TWh, was nur einem sehr kleinen Beitrag an der Gesamtmenge entspricht. Um diese Quote zu steigern, wurde im Zuge der Vereinbarung der Rahmenbedingungen des Erneuerbare-Gase-Gesetz beschlossen, diesen Anteil bis 2030 auf mindestens 7,5 % Terawattstunden (TWh) zu steigern, was damit einem Anteil von knapp 10 % entsprechen würde. Um dieses hochgesteckte Ziel auch erreichen zu können, werden in Zukunft Sanktions-Maßnahmen für Versorger ergriffen, die diese Quote nicht erfüllen können. Eine zentrale Maßnahme davon sieht vor, dass Betreiber verpflichtet werden pro fehlende Kilowattstunde (kWh) von erneuerbarem Gas einen Ausgleichsbetrag von 20 Cent zahlen zu müssen. (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, 2024)

2.8 Nebenproduktverarbeitung

Die letzte Phase im Betrieb einer Biogasanlage wird durch die Verarbeitung der im Fermentationsprozess angefallenen Nebenstoffe abgeschlossen. Diese beinhalten einerseits das vom Methan abgeschiedene Kohlendioxid, aber auch die abgetrennten Reststoffe in fester und flüssiger Form. Das Hauptziel der Biogasproduktion besteht zwar primär in der Erzeugung von Energie, doch die beiden folgenden Anwendungen helfen dabei, die Wirtschaftlichkeit einer Produktionsanlage zusätzlich zu steigern.

Herstellung von flüssigem Kohlendioxid (CO₂)

Für das abgetrennte Kohlendioxid (CO₂) besteht keine weitere Möglichkeit zu Verwendung im Sinn einer Energieerzeugung oder -bereitstellung. Durch Unterschreitung eines „kritischen Punktes“, der bei einer Temperatur von etwa 31 Grad Celsius liegt, kann das Kohlendioxid von seinem ursprünglichen gasförmigen Aggregatzustand in seine flüssige Form umgewandelt werden. Voraussetzung dafür ist, dass dieser Prozess unter Druck stattfindet, in industriellen Anlagen werden in der Regel Drücke zwischen 50 und 100 bar eingesetzt. Anschließend besteht dann auch noch die Möglichkeit aus dem flüssigen CO₂ einen festen Zustand herzustellen, wenn der Druck

vom flüssigen Zustand zügig entspannt wird. Es entsteht dadurch eine gewisse Menge an festen Trockeneisschnee. (ASCO Kohlensäure AG, 2024)

Flüssiges Kohlendioxid hat viele verschiedene potenzielle Abnehmer, als Beispiele sind die Lebensmittelindustrie, Landwirtschaft, Industrie oder die Medizin zu nennen. (Rießner-Gase GmbH, 2024)

Herstellung von Düngemittel

Im Zuge der Separation werden die Gärreste durch mechanische Verfahren wie einer Schneckenpresse oder Siebe in deren feste und flüssige Phasen getrennt. Die flüssige Form besitzt dabei häufig einen höheren Anteil an Ammonium (NH_4^+), welches eine Stickstoffverbindung ist und sich besonders als Stickstoffdünger eignet. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2024a)

Nach dem Fermentationsprozess werden im Zuge der Feststoffabtrennung einige Mengen an Gärreste gesammelt, die viele unterschiedliche und wertvolle Nährstoffe enthalten, die das Pflanzenwachstum fördern können. Als wichtigste Beispiel sind Phosphor, Kalium, Stickstoff, Ammoniak zu nennen. Bei der Herstellung zu Düngemittel werden die Stoffe dabei auch öfters mit weiteren Mineralien zusätzliche angereichert, um somit die Effektivität der Mittel zu erhöhen. (ACR – Austrian Cooperative Research, 2022)

Zusätzlich ist es möglich, Gärreste in fester Form zunächst zu kompostieren, um dadurch die Nährstoffe in eine stabilere Form zu verwandeln, um von Pflanzen später leichter aufgenommen werden zu können. Als eine spezielle Form von veredelten Gärreststoffen wären Gärpellets zu nennen. Die bereits getrockneten Materialien werden zusätzlich kompaktiert und unter Druck durch Matrizen gepresst. Dadurch kann ein Dünger mit hoher Dichte und hohem mineralischen Anteil unter idealen Lagerbedingungen vermarktet werden. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2024a)

Der feste Reststoff erweist sich außerdem als sehr hilfreich beim Einsatz zur Schädlingsbekämpfung, was zu einem reduzierten Pestizideinsatz und einem schonenderen Umgang mit den Böden in der Landwirtschaft führt. (Vgl. Sunbeam GmbH, 2012, S. 30–31)

3 Methodische Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein komparativer, lebenszyklusbasierter Vergleich basierend auf einem vereinfachten „Cradle-to-Grave“-Ansatz durchgeführt. Dafür sollen in diesem Kapitel die Grundzüge einer Lebenszyklusanalyse und deren vier Hauptphasen vorgestellt werden. Es folgt eine Aufzählung der verschiedenen zur Wahl stehenden Systemgrenzen, die für eine solche Analyse definiert werden können. Im Weiteren wird auf die Modellierung dieser Arbeit im Sinne der erfolgten Umsetzung und Datenerfassung eingegangen. Abschließend werden die im Zuge der Bearbeitung mit der Umberto-Software angefertigten Modellketten im Detail beschrieben inklusive einer schematischen Darstellung der beiden Modellierungsketten.

3.1 Aufgabenstellung

Die beide zu analysierende Bauteile werden im Zerkleinerungsprozess von Biomasse in Biogasanlagen eingesetzt. Über einen Betrachtungszeitraum von einem Jahr wurden sowohl für die Original-Bauteile aus Hardox-Material als auch für die alternativen HVF-Bauteile aus Schwarzstahl mit Chrom-Karbid-Legierungen die Standzeit-Werte ermittelt. Das alternative HVF-Verschleißteil weist aufgrund seiner Zusammensetzung mit der speziellen Panzerschicht einen wesentlich geringeren Verschleiß auf und kann somit länger im Betrieb eingesetzt werden. Ziel dieser Abschlussarbeit ist die Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz in Form eines vereinfachten CO₂-Fußabdrucks dieser Verschleißteile. Zusätzlich soll auch ein komparativer Vergleich mit dem Original-Bauteil erstellt werden, um somit die ökologischen Unterschiede zwischen den beiden Bauteil-Varianten zu analysieren. Zur Durchführung der Analyse ist es notwendig eine geeignete Systemgrenze zu definieren. Außerdem sollte eine passende funktionelle Einheit gefunden werden, um eine Vergleichbarkeit zwischen den beiden Verschleißteilen zu schaffen.

3.2 Lebenszyklusanalyse (LCA)

Zur Beurteilung der Umweltauswirkungen der im vorherigen Kapitel beschriebenen Wandverkleidungen wurde eine Ökobilanz herangezogen. Diese Analysemethode, auch als Umweltbilanz bezeichnet, oder im Englischen als „Life Cycle Assessment“ (LCA), soll dabei helfen, die Auswirkungen auf die Umwelt während des gesamten Lebensweges eines Produktes, einer Dienstleistung oder eines Prozesses zu quantifizieren. Dabei beschränkt sich dieses Entscheidungsinstrument nicht ausschließlich auf die Analyse auf der Mikroebene, sondern wird in der jüngsten Vergangenheit auch immer mehr zur

Beurteilung auf der Makroebene verwendet. Als Beispiel für die Makroebene wäre die Analyse von Umweltpolitiken zu nennen. (Vgl. Frischknecht, S.18 f.)

Der Grund für dessen Entwicklung liegt darin begründet, dass man sich in den letzten Jahrzehnten zunehmend mit dem Thema Umweltschutz beschäftigt hat und die Notwendigkeit für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten oder Prozessen erkannt hat. Dabei versucht man zur Beurteilung den gesamten Lebenszyklus zu berücksichtigen, beginnend von der Rohstoffgewinnung, über das Herstellungsverfahren, anfallende Transportwege zum Endkunden und die Nutzungsphase bis zur finalen Entsorgung. In diesem Zusammenhang werden häufig die Systemgrenzen „Cradle-to-Grave“ einer Lebenszyklusanalyse genannt was der wörtlichen Übersetzung von der „Wiege bis zur Bahre“ entspricht. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.3)

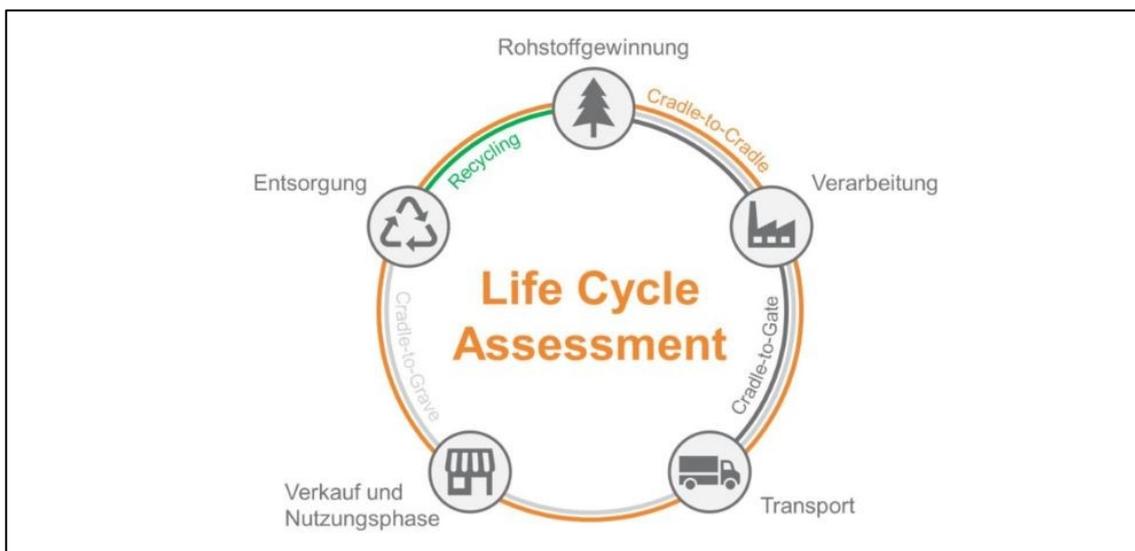


Abbildung 19: Lebenszyklusphasen einer LCA (Neue Materialien Bayreuth GmbH, 2020)

In der Vergangenheit hat die Marktwirtschaft die Umweltauswirkungen weitgehend nicht berücksichtigt, und Unternehmen wurden nicht verpflichtet, für das Ausmaß an potenziellen Umweltbelastungen, die mit ihren angebotenen Produkten oder Dienstleistungen einhergehen, entsprechend aufzukommen. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass in früheren Zeiten keine Verknüpfung zwischen den Preisen für den Rohstoffabbau oder bestimmten Herstellungsverfahren und dem Ausmaß an den damit einhergehenden Umweltfolgen gemacht wurde. Dies gilt auch für die Nutzer von Produkten, für die es keinen Unterschied machte, ob sie sich für das umweltschädliche oder das umweltfreundliche Produkt entschieden haben, da der Umweltfaktor keine Berücksichtigung in der preislichen Gestaltung fand.

Obwohl festgehalten werden muss, dass Ökobilanzen selbst keine finalen Entscheidungen liefern, fungieren sie dennoch als eine substanzielle Grundlage für eine spätere Beschlussfassung. Für das Beispiel eines Unternehmens, das einen Entschluss über die Investition von einem Produkt fassen muss, fließen nämlich neben den umweltrelevanten Aspekten auch technische, wirtschaftliche oder soziale Faktoren in

den Entscheidungsprozess ein. Somit sind Ergebnisse dieser Analysemethode als unterstützendes Mittel zu sehen, die ebensolche Investitionsüberlegungen entweder positiv befürworten oder aber auch negativ beeinflussen. Um einen möglichst positiven Effekt auf die Entscheidung zu erzielen, ist es deshalb wichtig den Bilanzinhalt mit der eigentlichen Problemstellung und dem Wertekompass des Entscheiders gut abzustimmen. Ökobilanzen sind immer auf quantitativen Modellen aufgebaut; dabei können sie Auskunft über potenzielle Umweltbelastungen geben, nicht jedoch über tatsächlich feststellbare Belastungen. Außerdem existiert mit ihrem Einsatz auch keine Kontrollmöglichkeit über das Überschreiten von gewissen Grenzwerten. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.15 f.)

Die ISO, die weltweit bekannteste Organisation für Normung mit Sitz in Genf (Schweiz) hat dazu die Lebenszyklusanalyse mit der ISO-Norm 14040 standardisiert. Gemäß dieser Richtlinie ist diese in insgesamt vier verschiedene Phasen zu unterteilen. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.11)

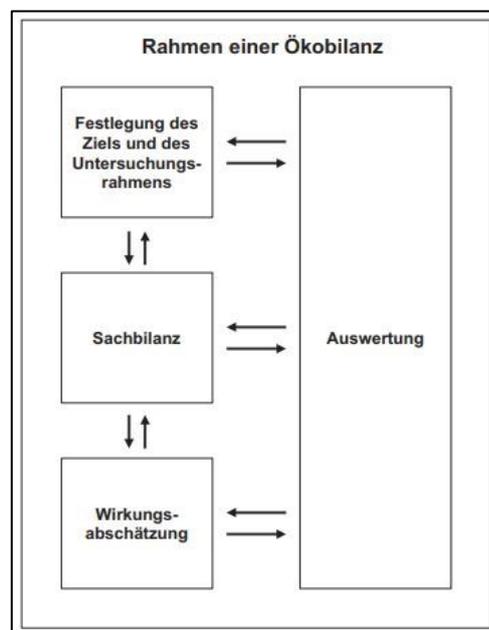


Abbildung 20: Bestandteile einer Ökobilanz gemäß ISO 2006a (Frischknecht, 2020, S.12)

3.2.1 Systemgrenzen

Für jede Ökobilanzierung muss auch eine Systemgrenze bestimmt werden, die für die Analyse herangezogen wird. Die Wahl der Systemgrenze hängt dabei vom Produkt bzw. Prozess selbst und dem Ziel der Analyse ab. Abbildung 16 zeigt die fünf wesentlichen Lebenszyklusphasen einer Ökobilanz mit den verschiedenen Möglichkeiten einer Systemgrenze. Es gibt dabei im Grunde genommen drei Unterscheidungen beim Betrachtungsumfang. Diese werden im Folgenden beschrieben, beginnend mit der umfassendsten Perspektive.

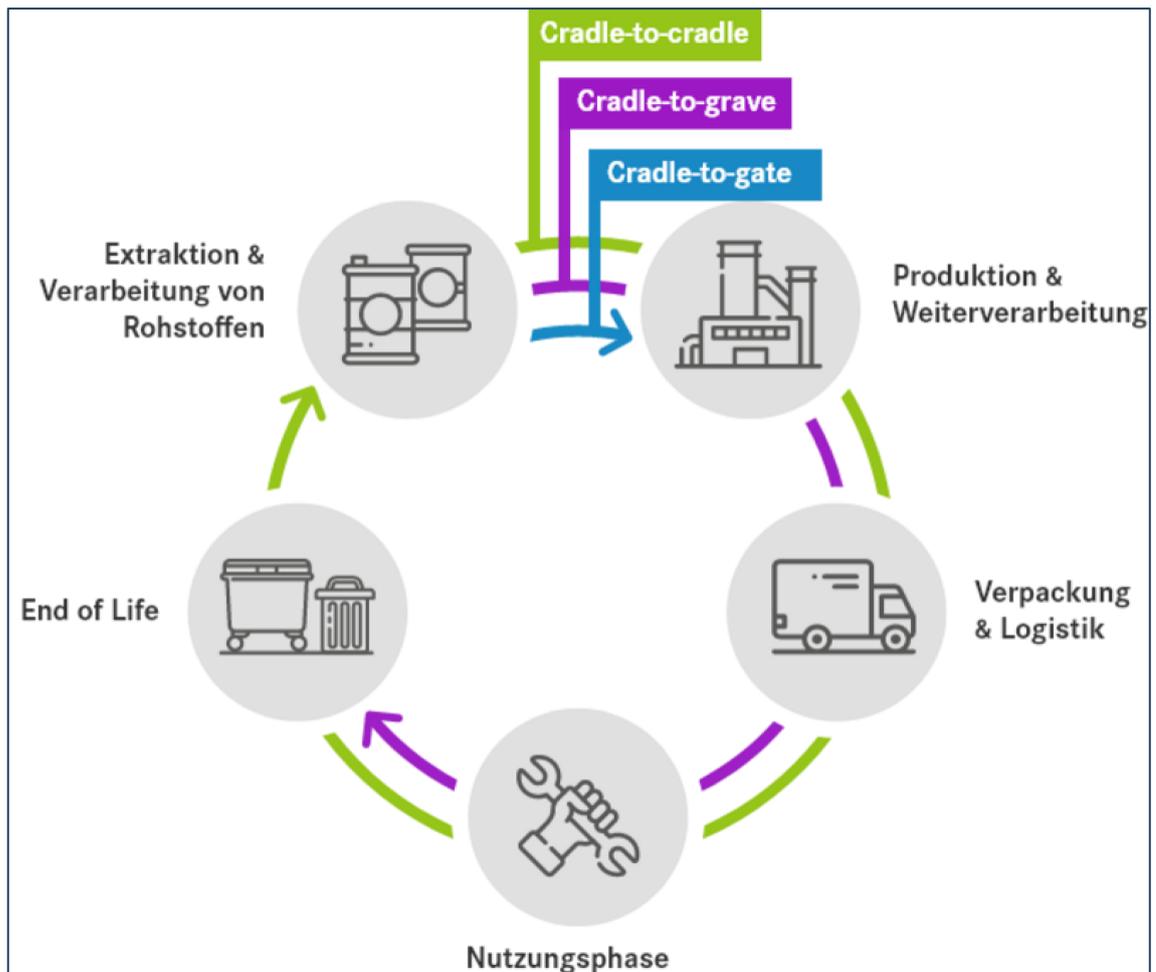


Abbildung 21: Systemgrenzen einer Ökobilanz (STAR COOPERATION GmbH, 2024)

Cradle-to-Cradle (von der Wiege bis zur Wiege)

In dieser Betrachtung wird der gesamte Lebenszyklus eines Produktes berücksichtigt, wobei darauf abgezielt wird, das Produkt für eine spätere Wiederverwendung wieder nutzbar zu machen. Das Entsorgungsstadium am Ende des Zyklus ist somit ein Recycling-Prozess. Durch eine kreislauforientierte Gestaltung wird somit versucht die Umweltauswirkungen von Produkten durch die Verwendung nachhaltiger Produktions- und Entsorgungspraktiken zu minimieren, um eine soziale Verantwortung bei der Entwicklung des Produkts miteinzubeziehen. (Vgl. Ecochain, 2023)

Cradle-to-Grave (von der Wiege bis zur Bahre)

Bei dieser weiteren Systemgrenze werden die Auswirkungen eines Produkts in jeder einzelnen Phase des Lebenszyklus ermittelt, von der Gewinnung der notwendigen Rohstoffe über die Herstellung inklusive aller notwendigen Hilfs- und Betriebsstoffe sowie jegliche Transportwege bis zur Nutzung des Produkts und der finalen Entsorgung. Sie hilft dabei einen kompletten Fußabdruck des Produkts von Anfang bis zum Ende zu ermitteln und die Gesamtbilanz davon zu verstehen. (Vgl. Ecochain, 2023)

Cradle-to-Gate (von der Wiege bis zum Werkstor)

Beim Cradle-to-Gate wird der Fußabdruck eines bestimmten Produkts nur bis zum Ausgang des Werksgeländes berücksichtigt, bevor es zum Verbraucher transportiert wird. Man erhält somit lediglich Daten über die ersten beiden Phasen innerhalb des Produktlebenszyklus, nämlich die Rohstoffgewinnung und den Herstellungsprozess (Verarbeitung). Dazu zählt dann auch der Transport der Rohstoffe bis zur Produktionsstätte, nicht jedoch der Transport des fertigen Produkts zum Endkunden. (Vgl. Ecochain, 2023)

Für den Fall, dass nur ein einziger Wertschöpfungsprozess von der gesamten Ökobilanz betrachtet wird, spricht man vom Gate-to-Gate. Deren Ergebnisse können gegebenenfalls später noch in ihrer jeweiligen Produktionskette zu einer vollständigen Cradle-to-Gate Bewertung verknüpft werden. (Vgl. Ecochain, 2023)

3.2.2 Zieldefinition & Bilanzrahmen

In einem ersten Schritt wird die soeben erwähnte Systemgrenze gewählt. Der lebenszyklusbasierte Vergleich der beiden unterschiedlichen Verschleiß-Bauteilen ist aufgebaut auf einem „Gate-to-Grave“-Ansatz (vom Werkstor bis zur Bahre). Da durch die Gespräche mit verschiedenen Vertretern aus der Industrie und der Zugriff auf die Ecoinvent-Datenbank eine Abschätzung der vorhergehenden Herstellungsprozesse vorgenommen wurde, erfolgte eine Erweiterung zu einem vereinfachten „Cradle-to-Grave“ Ansatz (von der Wiege bis zur Bahre). Dies ermöglicht eine aussagekräftige Abschätzung des ökologischen Fußabdrucks der betrachteten Produkte über deren gesamten Lebenszyklus hinweg.

Im ersten Schritt, der Zieldefinition, wird der Untersuchungsgegenstand festgelegt und dabei auch die funktionelle Einheit definiert. Da alle folgenden Phasen auf dem ersten Schritt aufbauen, ist eine präzise Definition des Untersuchungsrahmens entscheidend. Die erste Phase ist auch deshalb von großer Priorität, da hier entschieden wird, ob die ermittelten Ergebnisse für eine spätere Entscheidung herangezogen werden können oder nicht. Gemäß der ISO-Norm 14044, die die Lebenszyklusanalyse in ihren Details beschreibt, sollten dabei gewisse Themen unbedingt geklärt werden.

Es muss definiert sein, ob die Ökobilanz entweder für unternehmensinterne oder für allgemein öffentliche Zwecke verwendet werden wird. Dies spielt insofern eine Rolle, da man firmenintern möglicherweise auf wesentlich spezifischere Informationen angewiesen ist, um zum Beispiel eine bessere Wahl des Lieferanten treffen zu können. Wird die Bilanz jedoch von einem öffentlichen Amt ausgestellt, reichen in der Regel generische Informationen aus, wie z.B. Durchschnittswerte, um daraus Schlussfolgerungen ziehen zu können. Außerdem sollte geklärt werden, ob die erstellte Bilanz nur für Zwecke des Reporting eingesetzt werden soll oder um unterstützende Informationen für eine spätere Entscheidungsfindung zu erstellen. Bei einer reinen Dokumentation geht es darum die Umweltbelastung eines Produkts, Prozesses oder einer Produktionsanlage aufzuzeichnen, um die Auswirkungen auf die Umwelt und den Ressourcenverbrauch der letzten Jahre aufzuzeichnen bzw. zu vergleichen. Andererseits können Informationen herangezogen werden, um daraus Entscheidungen

im Sinne der Sinnhaftigkeit des Einsatzes von neuen Technologien, Anlagen oder Investitionen in neue Standorte abzuleiten. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.28)

Zudem sollte der geographische Bereich, in dem eine Ökobilanz Gültigkeit besitzt, definiert werden. Dabei kann jede LCA entweder nur für eine gewisse Region gelten, für ein bestimmtes Land, für einen ganzen Kontinent oder sogar einen globalen Bezug besitzen. Für die Erstellung einer Lebenszyklusanalyse sind oft mehrere Akteure beteiligt. Deshalb sollte reflektiert werden, ob die Beschaffung der für die Erstellung der Ökobilanz notwendigen Informationen allein über das eigene Unternehmen oder nur gemeinsam mit anderen Firmenpartnern zu bewerkstelligen ist. Bei Beteiligung externer Kooperationspartner, wie Lieferanten oder Partnerbetriebe, könnte die Beschaffung spezifischer Produktionsdaten zeitlich unangemessen oder gar nicht durchführbar sein. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.29)

Auf dem vorherigen Punkt aufbauend ist auch die Frage der Finanzierung zu klären. Die Erarbeitung und Finanzierung einer Ökobilanz durch mehrere Beteiligte führt oft zu erhöhtem Datenaufwand und breiterer Ergebnisbasis. Damit geht auch eine potenziell größere Reibungsfläche zwischen den verschiedenen Finanzierungspartnern einher, die in der Regel alle bestimmten Interessen verfolgen. Während offizielle Behörden nach dem Öffentlichkeitsgrundsatz alle Bilanzergebnisse in vollem Umfang an die Öffentlichkeit tragen möchten, sind Unternehmen oder aber auch Verbände je nach deren wirtschaftlichen Interessen zum Teil in dieser Hinsicht wesentlich selektiver. Zu guter Letzt ist eine sorgfältige Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes notwendig, um im späteren Verlauf unangenehme Überraschungen zu vermeiden. Dazu gehört eine exakt definierte Zielsetzung der Ökobilanz inklusive einer Beschreibung der soeben angeführten Rahmenbedingungen. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.29)

Im Rahmen der ersten Phase muss auch ein Bilanzrahmen für die Lebenszyklusanalyse definiert werden. Dazu gehört unter anderem auch eine Referenzgröße für das untersuchte Produkt- oder Prozesssystem, auf die man sich während der gesamten Lebensphase eines Produktes beziehen wird können. Dies wird auch als eine funktionelle Einheit bezeichnet und ist ein zentraler Bestandteil einer jeden Lebenszyklusanalyse. Da sie ausschlaggebend für den letztendlichen Aussagewert einer jeden Ökobilanz ist, sollte sie deshalb auch immer sorgsam gewählt werden. Falls man einen Vergleich verschiedener Transportmittel (Auto, Zug, Reisebus, Flugzeug, Schiff) heranziehen möchte, wäre eine geeignete funktionelle Einheit in jenem Fall der Personenkilometer. Wichtig dabei ist, dass die gewählte Einheit eine Feststellung über die notwendige Qualität eines bestimmten Produktes oder einer Dienstleistung enthält. Sie dient also als eine zentrale Bezugsgröße, auf die sowohl die Input- als auch die Outputgrößen normiert werden. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.30)

Für den Fall einer vergleichenden Ökobilanz ist darauf zu achten, dass die zuvor festgelegte funktionelle Einheit auch auf die Alternative anwendbar ist. Deshalb müssen solche Alternativen immer möglichst gewissenhaft ausgewählt werden, da mit jeder zusätzlichen Prozess- oder Produktvariante der Bearbeitungsaufwand auch entsprechend steigt. Sind alle dieser Punkte festgelegt, kann eine Unterteilung der verschiedenen Produktsysteme in ihre Einzelaktivitäten vorgenommen werden.

Ein Produkt lässt sich beispielsweise in folgende Phasen unterteilen: Rohstoffgewinnung, Herstellung, Nutzung und Entsorgung/Recycling. Da sich in einigen

Fällen eine große Anzahl von Prozessen aufsummieren, werden von der ISO-Norm 2006 Entscheidungskriterien vorgeschlagen, mit denen für Einzelaktivitäten mit nur geringer Relevanz für das Gesamtsystem eine Systemgrenze eingezogen werden kann. Dafür werden mithilfe von drei Kriterien (Energie, Masse, ggf. Umweltrelevanz) Inputgrößen nicht weiter für die Erstellung der Lebenszyklusanalyse berücksichtigt, die einen zuvor definierten Grenzwert nicht erfüllen. In der Praxis haben sich dabei zwei Abschneidekriterien für Inputgrößen als hilfreich herauskristallisiert. Substanzen mit einem Anteil von maximal 1 % an einem der drei Kriterien für einen einzelnen Prozessinput und maximal 5 % in Summe über alle nicht eingeschlossenen Prozessinputs können ignoriert werden. Diese Schwellenwerte müssen aber nicht für jede Untersuchung exakt in dieser Form eingehalten werden; es bleibt dem Anwender selbst überlassen eine möglichst geeignete Bestimmung festzulegen. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.32 f.)

Zum Bilanzrahmen einer Ökobilanz gehört auch die Festlegung des geographischen Geltungsbereichs. Dieser gibt Auskunft darüber, in welcher Region (Ortsgemeinde, -Bundesländer, Länder, Kontinente) die ermittelten Ergebnisse letztendlich Gültigkeit besitzen sollen. Dieser Geltungsbereich ist von der geographischen Systemgrenze zu unterscheiden, die sich in der heutigen Zeit meist auf den gesamten Globus bezieht. Diese meist globale Systemgrenze ist dadurch zu erklären, dass die Wertschöpfungskette eines alltäglichen Produkts heutzutage in der Regel oft Prozessschritte, insbesondere in der Rohstoffgewinnung beinhaltet, die auf der ganzen Welt stattfinden. Wenn also die Auswirkungen der Nutzung von Elektroautos in Österreich oder der Stromerzeugung durch Photovoltaikpaneele in der Europäischen Union untersucht werden sollen, ist diese Tatsache zu berücksichtigen. Der geographische Geltungsbereich ist für jede Ökobilanz immer individuell zu bestimmen. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.34 f.)

3.2.3 Sachbilanz

Im Zuge des zweiten Schrittes wird schließlich eine Gegenüberstellung von sowohl Input- als auch Output-Größen, die während des gesamten Lebenszyklus auftreten, getätigt. Dazu gehört eine Auflistung der Input-Größen, die zur Verwirklichung eines Produktes, Prozesses oder einer Dienstleistung notwendig sind. Diese umfassen neben den Materialflüssen wie Hilfsstoffen oder Halbfabrikaten auch die erforderlichen Energieflüsse. Die Ermittlung der Output-Größen dient dazu die Frage zu klären, welche Umweltbelastungen während der vollständigen Lebensphase anfallen, um das Ausmaß der Umweltbelastung zu ermitteln. Somit dient die Sachbilanz dazu eine Grundlage für die nachfolgende Wirkungsabschätzung zu schaffen, in der die Umweltwirkungen des Produkt- oder Prozesssystems erfasst werden. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz - En Argus, 2023)

In der Lebenszyklusanalyse wird ein 'Produktsystem' verwendet, das alle an der Herstellung eines Produkts oder der Durchführung eines Prozesses beteiligten Komponenten umfasst. Dieses System umfasst mehrere Aktivitäten, die zur Realisierung eines Produktes oder eines Prozesses notwendig sind und eine Verbindung zueinander besitzen. In der Sachbilanz erscheint nun jede einzelne Aktivität als eigener Prozess, für den dann die jeweiligen (zugehörigen) Material- und Energieflüsse ermittelt werden. Das Resultat einer Sachbilanz ist schließlich die Summe

aller Stoffflüsse, die in dieses Produktsystem ein- und ausfließen. Dabei besteht immer ein Bezug dieser Flüsse zur zuvor definierten Referenzgröße, der funktionellen Einheit. Je detaillierter eine Ökobilanz aufbereitet ist, umso datenintensiver ist diese in der Regel und deshalb verlangt dies nach einer geeigneten und professionellen Datenaufbereitung. Zwar können Überschlagsrechnungen für simple Produktsysteme mithilfe von gängiger Tabellenkalkulationssoftware (z.B. Microsoft Excel) ermittelt werden, für komplexere Anwendungsfälle stößt man mit dieser Methode jedoch schnell an seine Grenzen. Um in solchen Fällen immer einen guten Überblick zu behalten und auch flexibel bei etwaigen Änderungen während des Projektverlaufs zu bleiben, haben sich dafür spezielle Softwareanwendungen etabliert. Ein Beispiel, das auch für die Erstellung dieser Masterarbeit herangezogen wird, ist die Software Umberto des deutschen Anbieters iPoint Systems. Damit lassen sich Produktsysteme sowohl grafisch anschaulich visualisieren als auch berechnen bzw. bestehen mit ihrer Verwendung zahlreiche Möglichkeiten zur Analyse und Ergebnisdarstellung. In Verbindung mit einem integrierten Datenbanksystem von beispielsweise dem schweizerischen Anbieter Ecoinvent können Aktivitäten mit Emissionswerten oder Energieverbräuchen belegt werden. Somit können solche Software-Lösungen eine große Unterstützung bei der Erstellung einer Ökobilanz darstellen. Der Zugriff darauf ist mit einer kostenpflichtigen Lizenz möglich, die Kosten dafür variieren je nach individuellen Bedürfnissen und Anzahl der aktiven Nutzer.

Die finale Sachbilanz enthält eine detaillierte Gegenüberstellung aller vorhandenen Input- als auch Output-Größen und dient dann als Grundlage für den anschließenden Schritt im Rahmen einer Ökobilanz.

3.2.4 Wirkungsabschätzung

In der dritten Phase, der Wirkungsabschätzung, geht es darum, die in der Sachbilanz ermittelten Daten zur Unterstützung für eine spätere Entscheidung zu verdichten, indem entweder eine Priorisierung oder Gewichtung der vorhandenen Informationen vorgenommen wird. Grundsätzlich wird bereits im ersten Schritt der Zieldefinition dafür gesorgt, dass alle erfassten Informationen für den späteren Verlauf auch von Bedeutung sind und verarbeitet werden können. Zwar besteht die Wirkungsabschätzung nach ISO 14040 aus einer einzigen Phase, doch sie kann gemäß ISO 2006b noch detaillierter aufgeschlüsselt werden. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.11 ff.)

Dafür sollte zu Beginn eine Auswahl der jeweiligen Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und der dazu verwendeten Modellen getroffen werden. Würde man den Klimawandel als Beispiel heranziehen, dann wären die Treibhausgasemissionen die Wirkungskategorie. Da Treibhausgase, die von der Erdoberfläche abgestrahlte Sonnenwärme absorbieren und diese in der Atmosphäre festhalten, wird ein Entweichen in den Weltraum verunmöglicht. Die Folge ist ein dadurch bedingter beschleunigter Erwärmungsprozess auf der Erde. (Europäisches Parlament, 2023)

Zudem müsste man festlegen, welches Modell zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen eingesetzt werden soll. Sehr häufig wird in solchen Szenarien das Schadensmodell des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) verwendet. Dieses Institut, auch als Weltklimarat bekannt, hat dafür das globale

Erwärmungspotenzial, das Global Warming Potential (GWP), definiert, das dabei helfen soll die verschiedenen auftretenden Treibhausgase besser miteinander zu vergleichen. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.12)

In der Atmosphäre existieren neben dem Kohlendioxid (CO₂) mit einem Anteil von etwa 87 % auch noch andere Treibhausgase, wie Methan (CH₄, 6,5 %), Lachgas (N₂O, 4,6%) oder die fluorierten Treibhausgase mit rund 1,7 % Anteil, welche alle aufgrund ihrer verschiedenen Verweildauer in der Atmosphäre eine unterschiedliche Klimawirkung aufweisen. (Umweltbundesamt, 2023)

Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden deshalb diese Potenziale definiert, indem deren Auswirkung auf das Klima immer auf das bekannteste Treibhausgas, das Kohlendioxid, referenziert wird. Kohlendioxid wäre dann also auch der dazugehörige Wirkungsindikator. Damit einhergehend wird dann auch gleichzeitig die passende Einheit des Wirkungsindikators festgelegt, in diesem Fall das „kg CO₂-Äquivalent“. Damit kann dann eine Gewichtung der Umweltwirkung vorgenommen werden. Laut dem IPCC besitzt 1 Kilogramm fossiles Methan (CH₄) eine 30-fach höhere Treibhauswirkung als 1 Kilogramm Kohlendioxid (CO₂). Wenn also 1 kg fossiles Methan während der Lebensphase eines Produktes verbraucht wird, dann würde dies einem Treibhausgasausstoß von 30 kg CO₂-Äquivalenten entsprechen. Theoretisch wäre es auch möglich Mehrfachwirkungen solcher Stoffe anzugeben, da neben dem globalen Erwärmungspotenzial z.B. auch ein Ozonschichtabbau Potenzial (ODP) existiert. Neben dem globalen Erwärmungspotenzial (GWP) gibt es beispielsweise auch ein Potenzial zum Abbau der Ozonschicht (ODP). So hat beispielsweise ein Gramm Halongas (eine Verbindung, die sich von Methan und Ethan ableitet) nicht nur ein Treibhauspotenzial, das 6,29 kg CO₂-Äquivalent entspricht, sondern auch ein Potenzial, das der Ozonschicht schadet, gemessen in 10g R11-Äquivalent. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.12 f.)

Um die Datenqualität der ermittelten Werte zu überprüfen, kann die Zuverlässigkeit der Ergebnisse mithilfe mehrerer Methoden ermittelt werden. Eine Paretoanalyse ist beispielsweise hilfreich, die Prozesse zu identifizieren, die den stärksten Beitrag zum Ergebnis liefern, welche dann mit einer höheren Priorität behandelt werden können. Eine Sensitivitätsanalyse hingegen kann einen wichtigen Einblick darüber gewähren, wie sich die Wirkungsindikatorergebnisse verändern, wenn eine Abänderung der ursprünglichen Input-Daten vorgenommen wird. Dies kann bei Bedarf schlussendlich zu einer Korrektur der Sachbilanzdaten führen. (Vgl. Frischknecht, 2020, S. 117 f.)

Zusammenfassend soll in der folgenden Tabelle noch eine Übersicht von mehreren möglichen Wirkungskategorien aufgelistet werden, die in einer Wirkungsabschätzung berücksichtigt werden können.

Tabelle 1: Wirkungskategorien mit den zugehörigen Wirkungsindikatoren und Einheiten (Eigene Darstellung)

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Zugehörige Einheit
Globale Erwärmung / Klimawandel	Treibhausgasemissionen, Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	CO ₂ -Äquivalent (CO ₂ e)
Versauerung	Emissionen von Schwefeldioxid (SO ₂) und Stickoxiden (NO _x), pH-Wert in Gewässern	Tonnen (t) oder Kilogramm (kg) pro Jahr, dimensionslos [-]
Ozonschichtabbau	Ozonabbau-Potenzial (ODP)	CFC-11/R11 Äquivalent (CFC-11e/R11e)
Eutrophierung	Stickstoff- und Phosphoreinträge in Gewässer	Tonnen (t) oder Kilogramm (kg) pro Jahr, Prozent (%)
Umweltgifte	Persistenz in Umwelt (Halbwertszeit)	Jahre (J)
Ressourcenverbrauch	Wasserverbrauch	Kubikmeter (m ³) oder Liter (l) pro Jahr
Biodiversität	Artenvielfalt	Anzahl der Arten pro Flächeneinheit (km ²)
Wasserressourcen	Wasserqualität (z.B. Gehalt an Schwermetallen oder organischen Stoffen)	Mikrogramm pro Liter (µg/l)
Landnutzung	Flächenversiegelung	Prozent (%) oder Hektar (ha)
Gesundheit und Wohlbefinden	Luftschadstoffkonzentrationen bzw. Toxizität von Chemikalien	Mikrogramm pro Kubikmeter (µg/m ³) bzw. Milligramm pro Liter für chronische Toxizität (mg/L)

Gemäß der ISO-Richtlinie 14067 ist bei einer Lebenszyklusanalyse (LCA) für die Ermittlung eines gewöhnlichen CO₂-Fußabdrucks von Produkten (PCF, Product Carbon Footprint) lediglich die Wirkungskategorie Klimawandel relevant. (LRQA, 2024)

Deshalb wird für die Darstellung der Ergebnisse in Kapitel 4 der Wirkungsindikator Globales Erwärmungspotenzial (GWP) mit der zugehörigen Einheit CO₂-Äquivalente angegeben.

3.2.5 Auswertung

Der letzte Schritt in der Ökobilanz besteht darin, alle Prozessabschnitte kritisch zu beleuchten und die für das Endergebnis entscheidenden Parameter zu identifizieren. Dabei soll die Richtigkeit und Vollständigkeit der gesamten Analyse festgestellt werden. Sensitivitätsanalysen können dabei helfen, Unsicherheiten in den Ergebnissen zu ermitteln und zu quantifizieren. Man versucht durch Variation eines gewählten Parameters die Auswirkung auf das Endergebnis zu überprüfen. Die Analyse des gesamten Lebenszyklus soll schlussendlich dem Anwender dabei helfen, Antworten auf das zuvor formulierte Ziel zu erhalten. Weiterhin können so Potenziale energetischer oder ökologischer Natur identifiziert werden, und dadurch Optimierungen am bestehenden System formuliert werden. (Vgl. Frischknecht, 2020, S.106 f.)

3.3 Modellierung der Verschleißteile in Umberto

In dieser Arbeit werden sowohl eine HVF-Wandverkleidung aus Schwarzstahl mit Schweißungen aus Karbid-Legierungen als auch Verschleißteile aus Hardox-Material analysiert, daher handelt es sich um eine vergleichende Ökobilanz. Das Ziel besteht darin, einen ökologischen Vergleich der Liefer- und Wertschöpfungsketten durchzuführen und dabei mögliche Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Da die Lebenszyklusanalyse für unternehmensinterne Zwecke herangezogen werden soll, wurden nach Möglichkeit aktuelle Produktionsdaten für die Erstellung verwendet. Informationen wurden dabei auch unternehmensintern von Kooperationspartnern (Partnerbetriebe, Lieferanten) bezogen. Nicht bekannte Daten wurden über Durchschnittswerte oder bei Bedarf durch Literaturwerte abgebildet. Nebenrechnungen wurden mithilfe dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel erstellt.

3.3.1 Umsetzung

Die Umsetzung dieser Diplomarbeit wurde mithilfe der Software Umberto (Version 11) durchgeführt, die ursprünglich vom IFU-Hamburg (Institut für Umweltinformatik Hamburg) entwickelt wurde. (iPoint, 2024)

Diese half, die Modellketten der beiden Produkte zu erstellen und dafür eine Sachbilanz zu generieren. Für jede Phase innerhalb des Lebenszyklus der beiden Wandverkleidungen konnten somit die Umweltauswirkungen exakt dargestellt werden.

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zwischen den beiden Produkten zu ermöglichen, musste eine geeignete funktionelle Einheit gefunden werden. Bei einem Wartungsintervall in den Zerkleinerungseinheiten wird üblicherweise die gesamte seitliche Wandverkleidung, bestehend aus 4 Stücken, getauscht. Da sich eine Lieferung zum Endkunden aus üblicherweise einer Palette mit 5 Sätzen dieser Verkleidungen zusammensetzt, wurde schließlich die funktionelle Einheit als ein Produktionslos (Lieferlos) mit 5 Sätzen à 4 Stück festgelegt. Eine Lieferung an den Endkunden enthält somit mit einem Produktionslos insgesamt 20 Stück der jeweiligen Wandverkleidung. Alle in der Analyse erhobenen Daten wurden auf dieses Produktionslos hochgerechnet, das somit als Referenz für beide Modellketten dient.

Die Umsetzung für den Vergleich der beiden Verschleißteile basiert auf einem „Gate-to-Grave“-Ansatz. Da jedoch die vorgelagerten Produktionsprozesse abgeschätzt werden können, wird der Ansatz zu einem „Cradle-to-Grave“ Ansatz vereinfacht. als Systemgrenze der „Cradle-to-Grave“ Ansatz gewählt. Es werden alle Schritte von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung der abgenutzten Wandverkleidungen berücksichtigt. Als Abschneide-Kriterium für vernachlässigbare Substanzen wurde ein Wert von maximal 5 % für einen einzelnen Prozessinput definiert. Beispielsweise wurden die Prozessverluste von 5 % bei den Schweißarbeiten für die Chromkarbidschicht nicht weiter für die Analyse berücksichtigt. Grundsätzlich besitzt die gesamte Ökobilanz eine globale Systemgrenze, da die meisten Rohstoffe auch von mehreren Kontinenten bezogen werden. Der geographische Geltungsbereich dieser Ökobilanz kann jedoch mit dem zentraleuropäischen Raum bestimmt werden, da alle für die Produktion (Blechfertigung) relevanten Prozesse in diesem Bereich stattfinden.

3.3.2 Definition der Produktionsprozessketten

Alle Produktionsschritte der Untersuchung, für die der „Gate-to-Grave“-Ansatz gewählt worden ist, sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet. Es lässt sich erkennen, dass für die alternative Variante mit den Chrom-Karbidlegierung zusätzliche Aufbereitungsschritte anfallen (Fülldrahtfertigung, Rohblechfertigung).

Tabelle 2: Einteilung der Produktionsschritte im gewählten „Gate-to-Grave“-Ansatz (Eigene Darstellung)

Produktlebensphase	Hardox-Variante	HVF-Variante
Materialbeschaffung	Beschaffung Rohbleche	Beschaffung Rohbleche und Fülldrahtbestandteile
Blechfertigung	Rohblechaufbereitung Putzen & Lackieren Verpackung	Fülldrahtfertigung Rohblechfertigung Rohblechaufbereitung Putzen & Lackieren Verpackung
Auslieferung	Transport zum Maschinenersteller Transport zum Endkunden Einbau beim Endkunden	Transport zum Endkunden Einbau beim Endkunden
Nutzung (Use Phase)	Nutzung beim Endkunden Wartung und Reparatur während der Nutzung	
Entsorgung	Entsorgung der verschlissenen Teile (lokaler Schrotthändler)	

An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich bereits die erste Produktlebenszyklusphase der beiden Produkte unterscheidet, was in der unterschiedlichen Zusammensetzung der beiden Bleche begründet liegt. Das Hardox-Produkt besteht dabei aus einem vom schwedischen Stahlhersteller SSAB gefertigten speziellen Stahl, der insbesondere für

seine hohe Beständigkeit und Festigkeit gegenüber Abrieb und Verschleiß bekannt ist. Im Gegensatz dazu werden für die alternative HVF-Variante ein Schwarzstahl aus einem S235-Stahl eingesetzt, dem zur Verstärkung eine Panzerschicht aus Chrom-Karbid aufgetragen wird. Für die Herstellung des Rohbleches aus S235 sind für die Fülldrahtfertigung zusätzlich noch mehrere Fülldrahtbestandteile notwendig. In der Phase der Herstellung werden dadurch folgende zwei weitere Arbeitsschritte notwendig, eine (i) Fülldrahtfertigung und eine (ii) Rohblechfertigung. Für die Anbringung der speziellen Panzerschicht ist es notwendig aus einem Fülldrahtpulver und einer Fülldraht-Hülle den Fülldraht herzustellen. Damit wird der notwendige Schweißdraht angefertigt, mit dem die Panzerschicht mithilfe einem Portalschweißisch angefertigt werden kann.

Die folgende Rohblechaufbereitung umfasst für beide Produkte noch weitere einzelne Schritte. Diese umfassen (i) einen Zuschnitt, (ii) das Einbringen von Senklöchern zur späteren Befestigung in den Zerkleinerungsanlagen, (iii) das Entgraten und Richten der Bleche mithilfe einer Flex-Maschine und einer Hydraulikpresse, (iv) das Einrollen der Bleche mittels einer Rollbank und (v) ein Anbringen (Verschweißen) der Schlagleiste. Anschließend werden die Bleche noch mit einer Flex-Maschine geputzt, um restliche Schweißrückstände zu entfernen und per Sprühpistole mit Farbe lackiert. Die Bleche können nun für den Transport verpackt und dem Speditionsunternehmen zum Versand übergeben werden. Dabei unterscheidet sich die Verteilungsphase (Auslieferung) bei den beiden Produkten insofern, da für das Hardox-Produkt zwei Schritte notwendig sind. Im ersten Schritt wird das verpackte Verschleißblech vom Metallverarbeitungsunternehmen an den Hersteller der Zerkleinerungsanlagen gesendet und von dort an den Endkunden verkauft. Im Falle des zweiten Produkts (HVF) aus Schwarzstahl mit der Panzerschicht erfolgt der Versand der hergestellten Verschleißbleche direkt ab Werk zum Endkunden und wird von Mitarbeitern der Biogasanlage in die Zerkleinerungsanlagen eingebaut. Die Nutzung und Entsorgungsphase der beiden Verkleidungen erfolgen dann in derselben Reihenfolge. Die Wartungsintervalle und eventuelle Reparaturen werden vom Personal vor Ort durchgeführt, die für den Betrieb nicht mehr verwendbaren verschlissenen Wandverkleidungen werden dann bei einem lokalen Schrotthändler entsorgt.

3.3.3 Datenerfassung

Vor der Erstellung der jeweiligen Modellketten wurde in einem ersten Schritt für beide dieser Modellketten ein Mengengerüst aufgestellt, das eine detaillierte Aufschlüsselung der erforderlichen Komponenten enthält, sowie die dafür benötigten Rohstoffe. Dieses Mengengerüst enthält dabei Informationen bezüglich der spezifischen Komponenten und der dafür notwendigen Materialien sowie deren Abmessungen und Angaben zum Gewicht.

Parallel dazu wurde für die spätere Modellierung in Umberto eine Beschreibung der Prozesskette vorgefertigt, die den Herstellungsprozess Schritt für Schritt erfasst. Dabei wurde festgehalten, wie jeder einzelne Prozessschritt zustande kommt. Bei der Beschaffung von Rohstoffen wird somit die Lieferkette präzisiert, bei Produktionsschritten die für die Verarbeitung notwendigen Arbeitsmittel. Für jeden Schritt wurde die notwendige Energie (Elektrische Energie, Kraftstoff LKW) festgelegt,

besondere Details zu den Teilprozessen in einer separaten Kommentarspalte festgehalten. Mit allen Angaben betreffend Abmessungen, Mengengerüst und Energie konnte anschließend in einer gesonderten Berechnung der Energieverbrauch für ein gesamtes Produktionslos berechnet werden.

Um die Emissionswerte für die Rohmaterialien vor dem Herstellungsprozess der Wandverkleidung zu ermitteln, wurde sowohl auf eigene Berechnungen mithilfe der in Umberto verfügbaren Datenbank Ecoinvent zurückgegriffen als auch auf Informationen, die im Austausch mit Vertretern aus der Stahlindustrie entstanden sind. (Bernard, 2023; Hanghofer, 2023)

Mit bereits bekannten Literaturwerten konnten in diesen Gesprächen dann noch die letzten für die Analyse fehlenden Daten ermittelt werden. Alle Emissionsdaten wurden mit der Einheit $\text{kg CO}_2 / \text{kg Stahl}$ belegt, nämlich mit welchen Treibhausgasemissionen die Rohmaterialien in Form des Kohlenstoffdioxids in Kilogramm je Kilogramm Rohstahl vor der Produktion bereits behaftet waren. Auch die für die Produktionsstätte notwendigen Transporte der Rohmaterialien wurden mit einem passenden Emissionswert aus der Ecoinvent-Datenbank kalkuliert.

Nach und nach wurden mit der Software alle notwendigen Inputgrößen erfasst, indem diese im Konfigurationsmenü als Einträge festgelegt wurden. Für jeden Input muss dabei eine Klassifizierung (Rohstoff, Hilfsstoff, Betriebsstoff, Produkt) vorgenommen werden bzw. mit einer geeigneten Einheit belegt werden (z.B. Masse in Kilogramm für Rohstoffe). Fehlende Emissionsdaten zu Hilfsstoffen wie dem Lack wurden beim Hersteller angefragt. (Pederzoli, 2023)

Die Abbildungen dafür werden im Programm kreisförmig dargestellt, mit weißer Innenfläche und hellgrüner Umrandung. Dies gilt auch für die Outputgrößen (Abfallstoffe, z.B. Stahlschrott), welche mit roter Umrandung dargestellt sind. Alle Input- oder Outputgrößen werden dann mit den jeweiligen Prozessen verbunden.

Für die verschiedenen anfallenden Transportwege für die Anlieferung zur Produktionsstätte und für die Auslieferung zum Endkunden wurden in der Software globale Variablen für die Distanz der Anlieferung und der Auslieferung definiert.

Abschließend wurde noch eine Unterteilung in die verschiedenen Lebenszyklusphasen vorgenommen, begonnen mit der Materialbeschaffung, über die Herstellung des Schweißdrahtes, der Blechfertigung, Auslieferung, Nutzungsphase (Use Phase) und Entsorgung/Recycling.

Sobald alle Prozesse mit den richtigen Inputgrößen allokiert sind und alle notwendigen Emissionswerte aus der Ecoinvent-Datenbank den jeweiligen Inputgrößen zugewiesen waren, konnte eine aussagekräftige Berechnung mit der Software durchgeführt werden. Die Darstellung beider Modellketten erfolgt als Materialflussdiagramm und als CO_2 -Flussdiagramm. Das Materialflussdiagramm gibt dabei Auskunft über die im Prozess anfallenden Stoffflüsse. Für die Visualisierung wird in der Software eine spezielle Art von Flussdiagramm herangezogen, das sogenannte Sankey-Diagramm. Dabei werden alle Stoffmengen durch mengenproportionale Pfeile visualisiert, die Breite des Pfeils steht dabei maßstabsgerecht für die geflossene Menge. Durch diese Darstellungsform wird die Aufmerksamkeit schneller auf die wesentlichen Komponenten in einem System

gelenkt. Neben der Erleichterung für den Anwender/Betrachter können somit auch Übertragungsfehler schneller aufgedeckt werden.

3.3.4 Modellkette Hardox

Für die Herstellung der Wandverkleidung aus Hardox-Material müssen mehrere Schritte durchlaufen werden. Die vom schwedischen Stahlunternehmen SSAB gefertigten Hardox-Rohbleche werden zunächst von einem nahegelegenen Stahlhändler per LKW an ein Metallverarbeitungsunternehmen geliefert. Dort durchläuft es ein mehrstufiges Verfahren, beginnend mit einem exakten Zuschnitt der Bleche auf die richtige Formatgröße mit einer Plasmaschneideanlage. Um später die Verschleißbleche in die Zerkleinerungseinheiten mit Senkkopfschrauben einbauen zu können, werden Senklöcher in die Bleche eingebracht. Zur Beseitigung von eventuellen Unregelmäßigkeiten an den Schnittkanten werden von Mitarbeitern Flex-Elektrowerkzeuge eingesetzt, mithilfe einer Hydraulikpresse können vom Zuschnitt verzogene Bleche außerdem noch passend gerichtet werden. Da die Verschleißbleche für die Verwendung in den zylinderförmigen Zerkleinerungseinheiten jeweils zu 4 Stück eingebaut werden, müssen diese außerdem noch mit einer Blechbiegemaschine (Rollbank) in das passende Profil geformt werden. Im Anschluss werden dann die Schlagleisten, die bei der späteren Zermahlung der Substrate in den Biogasanlagen für eine noch höhere Effizienz sorgen sollen, mit einem Handschweißgerät auf die Bleche angeschweißt. Um eventuelle Schweißrückstände zu entfernen kann mit einer Flex noch nachgearbeitet (geputzt) werden. Mit einer Sprühpistole werden die nun fertigen Bleche je nach Kundenwunsch mit einer bestimmten Farbe lackiert. Zuletzt werden für ein Produktionslos (Lieferlos) Verschleißbleche zu je 20 Stück auf einer Einwegpalette mit Kanthölzern, Metallband und einer PE-Folie fertig gepackt. Die Wandverkleidungen sind nun fertiggestellt und bereit für den Transport zum Hersteller der Zerkleinerungsanlagen. Dort werden diese in das Ersatzteillager gelegt und anschließend an den Endkunden verkauft. Nach der Auslieferung an den Endkunden werden die Verkleidungen durch das Personal in die Zerkleinerungsanlagen eingebaut, und die Nutzungsphase der Wandverkleidungen beginnt. Sobald die Abnutzung der Wandverkleidungen durch Abrasion und Korrosion so weit vorangeschritten ist, dass sie durch neue Bleche getauscht werden müssen, kann die Entsorgung des angefallenen Stahlschrotts bei einem lokalen Schrotthändler erfolgen. Zwar kann der verbleibende Stahl weiter recycelt und gegen einen kleineren Betrag vergütet werden, in der Regel überschreiten aber die anfallenden Entsorgungskosten die Schrotterlöse. Zu den Materialien, die durch den Recyclingprozess wieder verwendbar gemacht werden, zählen neben den Schrottabfällen auch die verwendeten Paletten und der Abfall der PE-Folie von der Verpackung.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt in diesem Kapitel eine schematische Abbildung der verschiedenen Lebenszyklusphasen der beiden Wandverkleidungen. Die in Umberto detailliert ausgearbeiteten Modellketten sind im Anhang zu finden (Anhang C bzw. Anhang D).

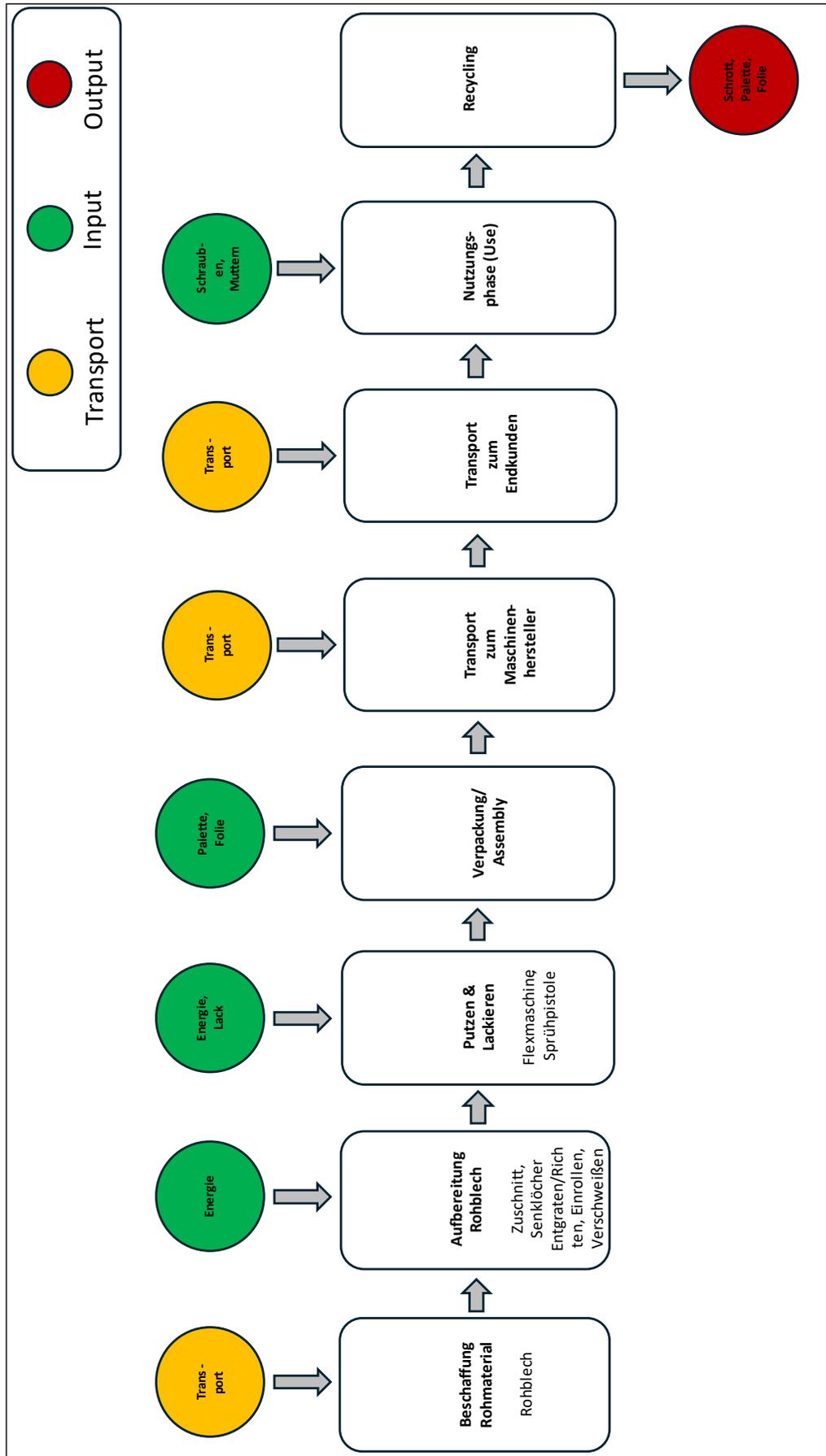


Abbildung 22: Modellkette kompakt – Variante Hardox (Eigene Darstellung)

3.3.5 Modellkette HVF

Im Gegensatz zur Hardox-Modellkette besteht die zweite Variante der Wandverkleidung nicht nur aus einem einzigen Bestandteil, sondern wird aus zwei Komponenten gefertigt. Der überwiegende Anteil ist ein Grundblech aus einem herkömmlichen Schwarzstahl. Damit wird ein Stahl in seiner natürlichsten Form bezeichnet, welcher ohne speziellen Verarbeitungsschritte oder Legierungszusätze hergestellt wurde. In einem Hochofen werden zunächst bei sehr hohen Temperaturen Eisenerz und beinahe reiner Kohlenstoff (Koks, dient gleichzeitig auch als Brennstoff) zu flüssigem Roheisen geschmolzen und dann mit Metallschrott in einem Konverter vermischt. Die Beimengung von einer großen Menge an Sauerstoff bewirkt, dass sich überschüssiger Kohlenstoff und Sauerstoff binden und somit aus der Schmelze beseitigt werden können. Je nach Bedarf können noch bestimmte Ferro-Legierungen (z.B. Nickel, Chrom oder Vanadium) beigemischt werden, um dadurch die mechanischen Eigenschaften des Stahls zu verändern. Danach wird der Stahl beim Gießen kontinuierlich bis zur Erstarrung abgekühlt. Durch Glätten in Walzwerken ist es schlussendlich möglich, den Stahl in die gewünschte Form zu bringen. Da jedoch bei einer Wandverkleidung aus ausschließlich reinem Schwarzstahl eine zu hohe Verschleißsituation vorliegen würde, versucht man mithilfe einer speziellen Panzerschicht ein langlebigeres Produkt herzustellen. Bei dieser Panzerung handelt es sich um eine Karbidlegierung, die wiederum aus einem Fülldrahtpulver mit mehreren Bestandteilen und einem Schwarzstahl-basierten Stahlband besteht und dabei nur dort auf das Verschleißblech aufgebracht wird, wo es tatsächlich notwendig ist. In einem ersten Schritt wird das Pulver gemeinsam mit dem Stahlband zu einem Fülldraht verarbeitet. Mithilfe eines Portalschweißtisches wird dieser Fülldraht dann anschließend auf das Grundblech aus Schwarzstahl aufgebracht und danach passgenau mittels einer Plasmaschneideanlage zugeschnitten. Auch hier wird mit einer Flex entgratet und per Hydraulikpresse das Blech gerichtet. Nach dem Einrollen auf der Rollbank in die passende Form wird auch wie bei der ersten Variante eine Schlagleiste angeschweißt. In diesem Fall wird zusätzlich noch per Handschweißgerät die Panzerung mit einer gewissen Menge des zuvor hergestellten Fülldrahtes angebracht. Dies soll sicherstellen, dass auch die Schlagleiste die gewünschte Verschleißfestigkeit im späteren Betrieb aufweist. Die verbliebenen Schweißrückstände werden per Flex entfernt, und die Verschleißbleche werden lackiert. Nach erfolgter Verpackung ist die Wandverkleidung abholbereit für den Transport zum Endkunden. Der angefallene Filterstaub beim Schweißvorgang ist verschwindend gering und wurde für die Erstellung dieses Modells aufgrund der zuvor genannten Abschneide-Kriterien nicht weiter berücksichtigt. Auch bei dieser Wandverkleidung fallen nach der Verwendung gewisse Mengen an Schrott an, die etwas geringer ausfallen als bei einem Hardox-Verschleißblech. Grund dafür ist die etwas dünnere Ausführung und das folglich etwas niedrigere Gesamtgewicht dieser Variante. Im Betrieb soll diese Variante durch die Panzerschicht dann sowohl den Abrasionskräften als auch den Korrosionsbedingungen beim Einsatz von feuchter Substratmasse besser entgegenwirken können und dem Betreiber zu einer verbesserten Wartungssituation verhelfen. Die folgende Abbildung zeigt schematisch die verschiedenen Lebenszyklusphasen der HVF-Ausführung. Im Vergleich zur Hardox-Variante ist hier zusätzlich noch die Herstellung des Panzerrohbleches angeführt, das sich aus dem S235 Rohblech und dem Fülldraht (Schweißdraht) zusammensetzt.

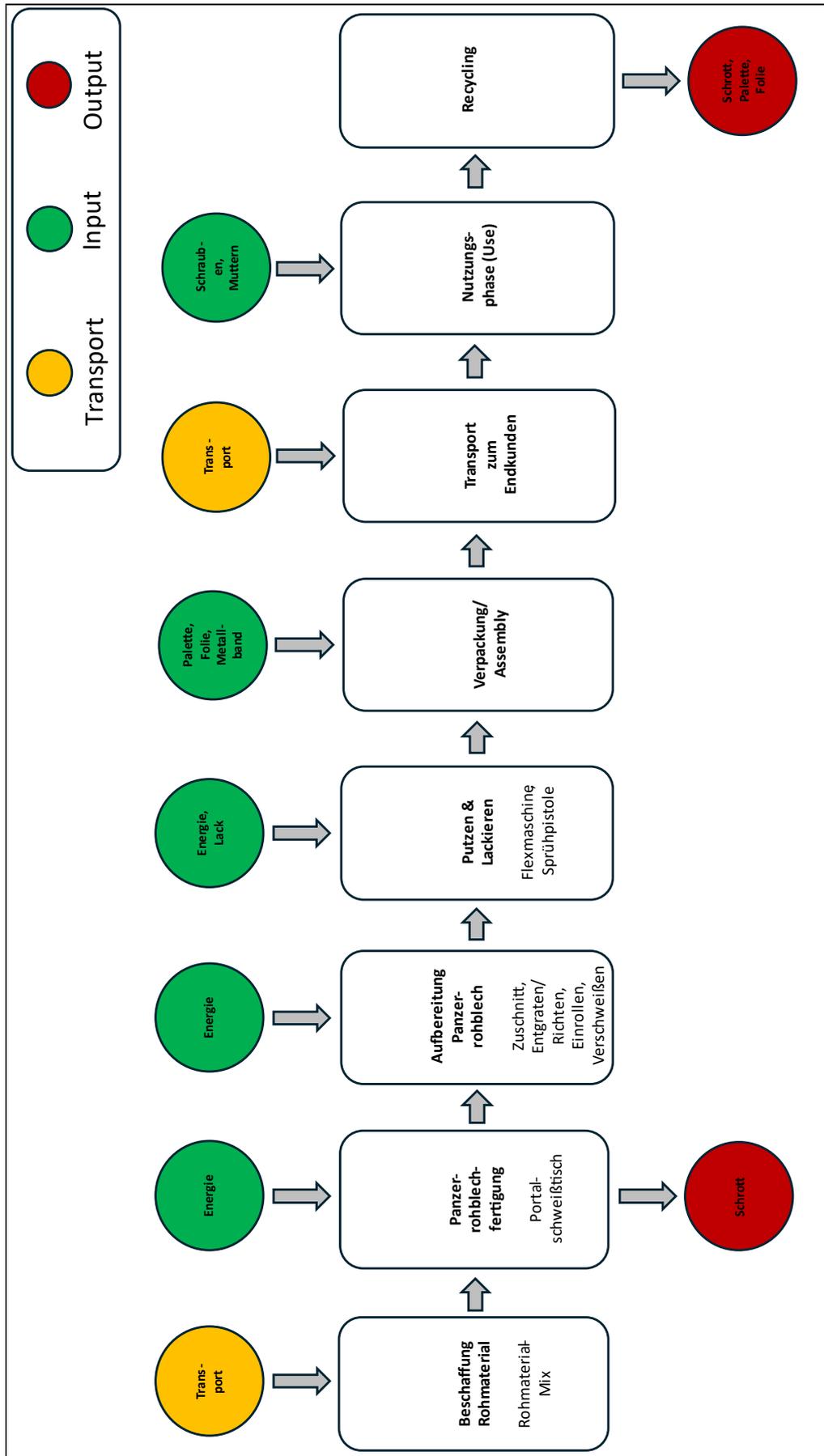


Abbildung 23: Modellkette kompakt – Variante HVF (Eigene Darstellung)

4 Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse umfassen ein Mengen- und Energiegerüst für beide Bleche, bei der die eingesetzten Material- und Energiemengen für ein Verschleißblech hochgerechnet sind. In der darauffolgenden Bilanzanalyse werden in einer Sachbilanz alle Input- und Outputgrößen, die im Zuge der gesamten Lebenszyklusphasen anfallen, für beide Verschleißteil-Varianten separat gesammelt aufgeschlüsselt. Überdies hinaus wird der berechnete CO₂-Fußabdruck sowohl für das Original-Bauteil aus Hardox-Material als auch für die HVF-Variante aus Schwarzstahl mit der Chrom-Karbidschicht gezeigt. Die Übersicht der ermittelten Emissionswerte wird dabei anteilig für die jeweiligen Lebenszyklusphasen aufgeschlüsselt. Es folgen Vergleiche, in welchen die Vorleistungen in Form der Beschaffung der Vorprodukte berücksichtigt werden, als auch ein Überblick, in der nur die Herstellung (Blechfertigung) im Detail betrachtet wird.

4.1 Daten und Annahmen

4.1.1 Annahmen

Für die Berechnungen mit der Umberto-Software wurden für beide Produkte gewisse Annahmen getätigt. Diese umfassen die Produktionsgröße (funktionelle Einheit = Definition eines Produktionsloses), ein Anteil an erneuerbaren Energien beziehungsweise Transportdistanzen für die Materialbeschaffung und den Versand zum Endkunden.

Produktionsgröße

Die Auslieferung der Wandverkleidungen erfolgt als Produktions- oder Lieferlose, wobei ein Produktionslos 5 Sätze an Wandverkleidungen entspricht und ein Satz Wandverkleidung wiederum 4 Stück der Verschleißbleche inklusive der angebrachten Schlagleiste enthält.

Tabelle 3: Definition der Produktionsgrößen und Komponenten (Eigene Annahmen)

Produktionsgrößen	Komponenten
1 Produktionslos oder Lieferlos	5 Sätze Wandverkleidung
1 Satz Wandverkleidung	4 Stück Wandverkleidung
1 Stück Wandverkleidung	1 Stück Grundblech plus 1 Stück Schlagleiste

Anteil erneuerbarer Energien

In der Produktlebensphase der Herstellung wird für beide Produkte in der Blechfertigung Photovoltaikstrom-Anteil von 10 % (Produktion am Standort) angenommen, sowie ein Netzbezugsanteil von 90 %.

Transportdistanzen

Bei Variante 1 sind in der Phase der Verteilung 2 Strecken zurückzulegen, der erste Transport findet vom Metallverarbeitungsunternehmen zum Hersteller der Zerkleinerungsanlagen statt, der zweite Transport ist die finale Zustellung zum Endkunden. Bei Variante 2 stellt die Verteilung den Transport von der Produktionsstätte der Blechfertigung direkt zum Endkunden dar. Dabei werden durch das Speditionsunternehmen mehrere Umladungen auf unterschiedliche LKWs durchgeführt, dies wurde in den Kalkulationen entsprechend nachfolgender Tabelle berücksichtigt.

Tabelle 4: Distanzen für Materialbeschaffung und Verteilung (Eigene Berechnungen/Annahmen)

Produktlebensphase	Variante 1 - Hardox	Variante 2 - HVF
Materialbeschaffung	140 km (mit LKW >32 Tonnen)	150 km (mit LKW >32 Tonnen)
Verteilung	<i>Mit LKW >32 Tonnen</i> 177 km (zur Endmontage) 382 km (zum Endkunden)	<i>Direkt zum Endkunden</i> 720 km (mit LKW >32 Tonnen) 85 km (mit LKW <7,5 Tonnen)

4.1.2 Hardox

Das Hardox-Produkt besteht aus einem Hardox 450-Stahl (10 mm Stärke) inklusive einer angeschweißten Schlagleiste, die eine feinere Zerkleinerung der Biomasse zusätzlich unterstützen soll.

Mengen- und Energiegerüst

In der Tabelle Nr. 4 werden für jeden einzelnen Produktionsschritt die eingesetzten Materialmengen und die durch die Entsorgung entstehenden Abfälle aufgelistet für ein Verschleißblech des Hardox-Produktes. Zusätzlich sind die dafür notwendigen Energiemengen angeführt.

Tabelle 5: Mengen- und Energiegerüst je Hardox-Verschleißblech (Eigene Berechnungen)

Produktionsschritt	Materialien: Inputs [kg]	Materialien: Outputs [kg]	Energie [kWh]
Beschaffung (je Grundblech inkl. Schlagleiste)	Hardox Stahl (Blech): 27,77 kg	-	-
Rohblechaufbereitung .. <i>Zuschnitt</i> .. <i>Entgraten/Richten</i> .. <i>Einrollen</i> .. <i>Verschweißen</i>	-	-	0,554 .. <i>davon</i> 0,361 .. <i>davon</i> 0,064 .. <i>davon</i> 0,064 .. <i>davon</i> 0,064
Putzen & Lackieren	Rostschutzlack: 0,0125 kg		0,0482
Verpackung (pro Produktionslos)	Einwegpalette: 1 Stück PE-Folie: 1 Stück		-
Nutzung	Schrauben, Beilagscheiben und Mutter: 8 Stück		-
Entsorgung (pro Produktionslos)	-	Schrott: 85 % Einwegpalette: 1 Stück PE-Folie: 1 Stück	-

4.1.3 HVF

Für die HVF-Variante wird ein Grundblech aus Schwarzstahl der Güteklasse S235 (6 mm Stärke) eingesetzt, das mit einer Panzerschicht (3 mm Stärke) verstärkt wird. Somit beträgt die Gesamtstärke des Bleches 9 mm.

Mengen- und Energiegerüst

In der Tabelle Nr. 5 werden für jeden einzelnen Produktionsschritt die eingesetzten Materialmengen und die durch die Entsorgung entstehenden Abfälle aufgelistet für ein Verschleißblech der HVF-Variante. Zusätzlich sind die dafür notwendigen Energiemengen angeführt.

Tabelle 6: Mengen- und Energiegerüst je HVF-Verschleißblech (Eigene Berechnungen)

Produktionsschritt	Materialien: Inputs [kg]	Materialien: Outputs [kg oder %]	Energie [kWh]
Beschaffung (je Grundblech)	Blech (S235): 13,40 kg Schweißdraht: 7,56 kg	-	-
Beschaffung (je Schlagleiste)	Blech (S235): 2,39 kg Schweißdraht: 0,87 kg	-	-
Fülldrahtfertigung	1 kg Schweißdraht: je 50 % Fülldrahthülle (S235) und 50 % Fülldrahtpulver		0,130
Rohblechfertigung	-	Schrott (Blech): 0,38 kg Schrott (Leist.): 0,04 kg	18,012
Rohblechaufbereitung .. <i>Zuschnitt</i> .. <i>Entgraten/Richten</i> .. <i>Einrollen</i> .. <i>Verschweißen</i>	-	-	0,275 .. <i>davon</i> <i>0,240</i> .. <i>davon</i> <i>0,012</i> .. <i>davon</i> <i>0,012</i> .. <i>davon</i> <i>0,012</i>
Putzen & Lackieren	Rostschutzlack: 0,0125 kg	-	0,024
Verpackung (pro Produktionslos)	Einwegpalette: 1 Stück PE-Folie: 1 Stück Metallband: 10 Meter	-	-
Nutzung	Schrauben, Beilagscheiben und Mutter: 8 Stück	-	-
Entsorgung (pro Produktionslos)		Schrott: 85 % Einwegpalette: 1 Stück PE-Folie: 1 Stück	-

4.2 Sachbilanzanalyse

Die Modellierung der Untersuchung wurde auf ein Produktionslos kalibriert, welches insgesamt 20 Verschleißblechen entspricht. Für den gewählten Betrachtungszeitraum von einem Jahr werden dafür alle anfallenden Material- und Energiemengen sowie die Emissionsbelastungen mit Umberto ermittelt und in den nachfolgenden Tabellen aufgelistet. Die Sachbilanzen wurden für jede Variante aufgeteilt in eine Übersicht der Input-Größen und Output-Größen mit der jeweiligen Mengenangabe und zugehörigen Stoff- oder Energieeinheit. Die Ergebnisse wurden auf die zweite Nachkommastelle gerundet.

4.2.1 Input-Bilanz

In den beiden nachfolgenden Tabellen erfolgt die mithilfe der Umberto-Software ermittelte Auflistung der anfallenden Inputgrößen. Die Inputs umfassen die Materialien, Hilfstoffe oder Betriebsstoffe, die für die Herstellung der Wandverkleidung erforderlich sind. Die Ergebnisse beziehen sich auf ein Produktionslos - dies ergibt gesamt 20 Stück der Wandverkleidung.

Variante 1 - Hardox

Tabelle Nr. 7 listet gesammelt alle bilanzierten Input-Größen entlang der berücksichtigten Lebenszyklusphase des Hardox-Produktes.

Tabelle 7: Input-Bilanz je Produktionslos – Variante Hardox (Eigene Darstellung)

Input	Menge	Einheit
Hardox, Rohblech	555,56	kg
Diesel, schwefelarm (RER, Marktgruppe für schwefelarmen Diesel)	6,68	kg
Rostschutzlack, wasserlöslich	0,25	kg
Strom, Niederspannung (SI, Markt für Strom, Niederspannung)	12,04	kWh
Schrauben, M16 x 60, D604, inklusive Beilagscheiben/Mutter	32,00	Stk.
PE-Folie	1,00	Stk.
Einwegpalette	1,00	Stk.
Straße (GLO, Markt für Straße)	0,38	Meter*Jahr
Straßeninstandhaltung (RER, Markt für Straßeninstandhaltung)	0,03	Meter*Jahr
Lkw, 40 metrische Tonnen (RER, Markt für Lkw, 40 metrische Tonnen)	3,36E-05	Metrische Tonnen
Wartung, Lkw 40 metrische Tonnen (GLO, Markt für Wartung, Lkw 40 metrische Tonnen)	3,36E-05	Metrische Tonnen

Variante 2 - HVF

Tabelle Nr. 8 listet gesammelt alle mit der Umberto-Software bilanzierten Input-Größen entlang der berücksichtigten Lebenszyklusphase für die zweite Variante der Wandverkleidung.

Tabelle 8: Input-Bilanz je Produktionslos – Variante HVF (Eigene Darstellung)

Input	Menge	Einheit
S235 Stahl	403,10	kg
Fülldrahtpulver	87,30	kg
Diesel, schwefelarm (RER, Marktgruppe für Diesel, schwefelarm)	12,98	kg
Rostschutzlack, wasserlöslich	0,25	kg
Elektrizität, Niederspannung (DE, Markt für Elektrizität, Niederspannung)	355,44	kWh
Elektrizität, Niederspannung (DE, Stromproduktion, Photovoltaik, 3kWp Installation auf Schrägdach, multi-Si, Panel, montiert)	39,50	kWh
Schrauben, M16 x 60, D604, inkl. Beilagscheiben/Mutter	32,00	Stk.
Einwegpalette	1,00	Stk.
PE-Folie	1,00	Stk.
Metallband	10,00	m
Straße (GLO, Markt für Straßen)	0,56	Meter*Jahr
Straßenwartung (RER, Markt für Straßenwartung)	0,10	Meter*Jahr
Lkw, 16 metrische Tonnen (RER, Markt für Lkw, 16 metrische Tonnen)	8,00E-05	Metrische Tonnen
Wartung, Lkw 16 metrische Tonnen (RER, Markt für Wartung, Lkw 16 metrische Tonnen)	8,00E-05	Metrische Tonnen
Lkw, 40 metrische Tonnen (RER, Markt für Lkw, 40 metrische Tonnen)	4,18E-05	Metrische Tonnen
Wartung, Lkw 40 metrische Tonnen (GLO, Markt für Wartung, Lkw 40 metrische Tonnen)	4,18E-05	Metrische Tonnen

4.2.2 Output-Bilanz

In den nachfolgenden Tabellen werden die mithilfe der Umberto-Software ermittelten Werte der anfallenden Outputgrößen aufgelistet. Die Outputs hingegen informieren über die bei der Produktion und dem Transport entstandenen Abfälle und Umweltbelastungen. Diese Größen treten im Laufe der zuvor definierten Lebenszyklen der Produkte auf. Aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit werden nur die relevantesten Werte in den folgenden Tabellen dargestellt. Eine detaillierte Übersicht mit allen ermittelten Werten befindet sich im Anhang (Anhang C).

Variante 1: Hardox

Tabelle 9 listet die relevantesten Output-Werte für den gesamten Lebenszyklus des Hardox-Produktes. Die vollständige Bilanz mit weiteren Emissionsbelastungen, die jedoch im Verhältnis in einem wesentlich geringeren Ausmaß auftreten, ist im Anhang C (Tabelle 17) zu finden.

Tabelle 9: Output-Bilanz je Produktionslos – Variante Hardox (Eigene Darstellung)

Output	Menge	Einheit
Schrottstahl (Europa ohne Schweiz, Markt für Schrottstahl)	471,75	kg
Kohlendioxid, fossil (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	20,02	kg
Abfall-Polyethylen (RER, Marktgruppe für Abfall-Polyethylen)	1,00	Stk
Reifenabriebemissionen, Lkw (GLO, Markt für Reifenabriebemissionen, Lkw)	0,06	kg
Kohlenmonoxid, fossil (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	0,02	kg
Stickoxide (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	0,01	kg
Bremsabriebemissionen, Lkw (GLO, Markt für Bremsabriebemissionen, Lkw)	0,01	kg
Wandverkleidung, 1 Produktionslos (= 5 Sätze à 4 Stück)	1,00	Stk.
Einwegpalette, Abfall	1,00	Stk.

Variante 2: HVF

In der folgenden Tabelle 10 sind die wichtigsten Output-Werte für die HVF-Ausführung dargestellt. Die detaillierte Bilanz dazu ist im Anhang D (Tabelle 18) zu finden.

Tabelle 10: Output-Bilanz je Produktionslos – Variante HVF (Eigene Darstellung)

Output	Menge	Einheit
Schrottstahl (Europa ohne Schweiz, Markt für Schrottstahl)	425,24	kg
Kohlendioxid, fossil (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	39,74	kg
Abfall-Polyethylen (RER, Marktgruppe für Abfall-Polyethylen)	1,00	Stk
Reifenabrieb-Emissionen, Lkw (GLO, Markt für Reifenabrieb-Emissionen, Lkw)	0,09	kg
Kohlenmonoxid, fossil (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,03	kg
Stickstoffoxide (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,02	kg
Bremsabrieb-Emissionen, Lkw (GLO, Markt für Bremsabrieb-Emissionen, Lkw)	0,01	kg
Straßenabrieb-Emissionen, Lkw (GLO, Markt für Straßenabrieb-Emissionen, Lkw)	0,01	kg
Wandverkleidung, 1 Produktionslos (=5 Sätze à 4 Stück)	1,00	Stk
Einwegpalette, Abfall	1,00	Stk

Bei beiden Auflistungen ist ersichtlich, dass der Großteil der entstandenen Output-Mengen auf den Stahlschrott zurückzuführen ist. Nachdem die Wandverkleidung vom Personal vor Ort aus der Zerkleinerungsanlage ausgebaut wird, um durch ein neuwertiges Verschleißteil ersetzt zu werden, wird der Stahlschrott gegen eine Entsorgungsgebühr einem lokalen Schrotthändler übergeben. Dabei erhält der Betreiber auch einen Schrotterlös, da der Stahlschrott später weitere Verwendung findet. Für die Emissionsbelastungen tragen die Kohlendioxid-Emissionen (CO₂) den größten Anteil der gesamten Belastungen. Diese sind im Wesentlichen auf den Transport zurückzuführen, außerdem entstehen sowohl Stickstoff- als auch Kohlenmonoxid-Belastungen, jedoch in einem wesentlich geringeren Ausmaß.

4.2.3 Analyse der Materialflüsse und Energiemengen

In weiterer Folge sollen zum besseren Verständnis zusätzlich eine Aufschlüsselung der Materialflüsse und der eingesetzten elektrischen Energiemengen erfolgen. Diese werden in Anlehnung der zuvor definierten Produktionsschritte (Tabelle 2: Materialbeschaffung – Blechfertigung – Auslieferung – Nutzung - Entsorgung) getätigt. Für die Analyse werden dabei nur jene Phasen betrachtet, in der die jeweiligen Ströme bzw. Mengeneinsätze stattfinden. Somit ist für den Materialstrom die erste Phase relevant, die Materialbeschaffung. Die detaillierte Betrachtung der Energiemengen konzentriert sich auf die zweite Phase, die Blechfertigung. Für beide Produkte erfolgt außerdem die Verwendung eines wasserlöslichen Rostschutzlackes sowie Schrauben zur Befestigung in den Zerkleinerungsgeräten für die Nutzungsphase. Aufgrund der geringen Menge werden diese hier nicht berücksichtigt.

Materialfluss Variante 1: Hardox

Gemäß der Input-Bilanz (Tabelle 7) werden für das Hardox-Produkt pro Produktionslos 555,56 kg Rohblech beschafft. Neben dem Hardox-Blech werden keine weiteren Rohstoff-Komponenten für die Blechfertigung verwendet. Das Material der gefertigten Hardox-Wandverkleidung besteht zu 100 % aus einem Hardox 450-Blech.

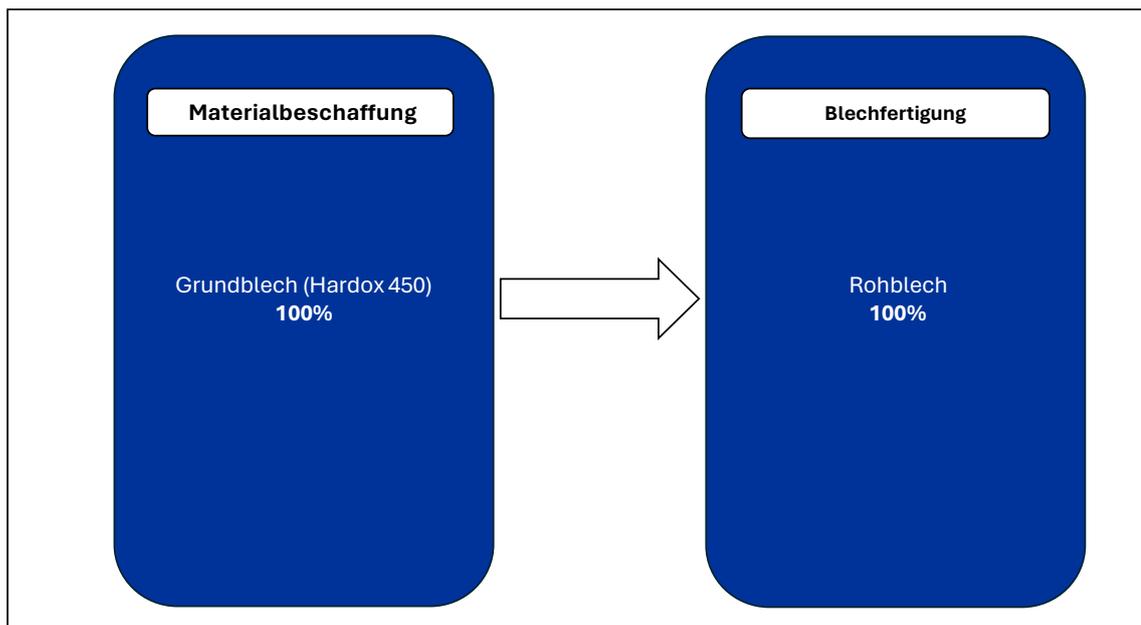


Abbildung 24: Materialfluss je Produktionslos Variante 1 – Hardox (Eigene Darstellung)

Energiemengen Variante 1: Hardox

Für das Hardox-Produkt fallen für die Erstellung eines Produktionsloses in der Blechfertigung insgesamt 12,04 kWh an elektrischer Energie an. Dabei wird mit 92 % der Großteil des Energieeinsatzes für die Rohblechaufbereitung verwendet, die den Zuschnitt, das Entgraten/Richten, das Einrollen und Verschweißen beinhaltet.

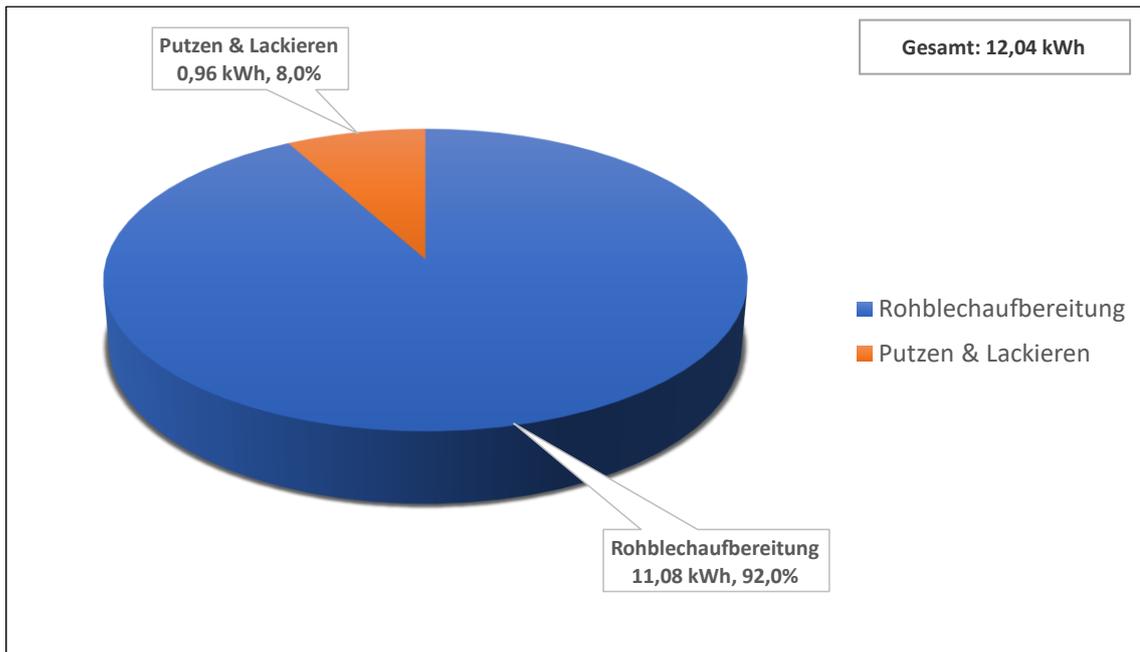


Abbildung 25: Elektrische Energiemengen je Produktionslos Variante 1 – Hardox (Eigene Darstellung)

Materialfluss Variante 2: HVF

Laut Tabelle 8 werden 490,4 kg Rohmaterialien für den Eingang in die Blechfertigung benötigt, um ein Produktionslos herzustellen. Die Beschaffung der Rohmaterialien setzt sich in diesem Fall aus insgesamt drei verschiedenen Komponenten zusammen, diese bestehen neben dem Grundblech aus einem S 235-Stahl auch aus den Bestandteilen zur Herstellung des Fülldrahtes (Fülldrahtpulver und Fülldrahthülle).

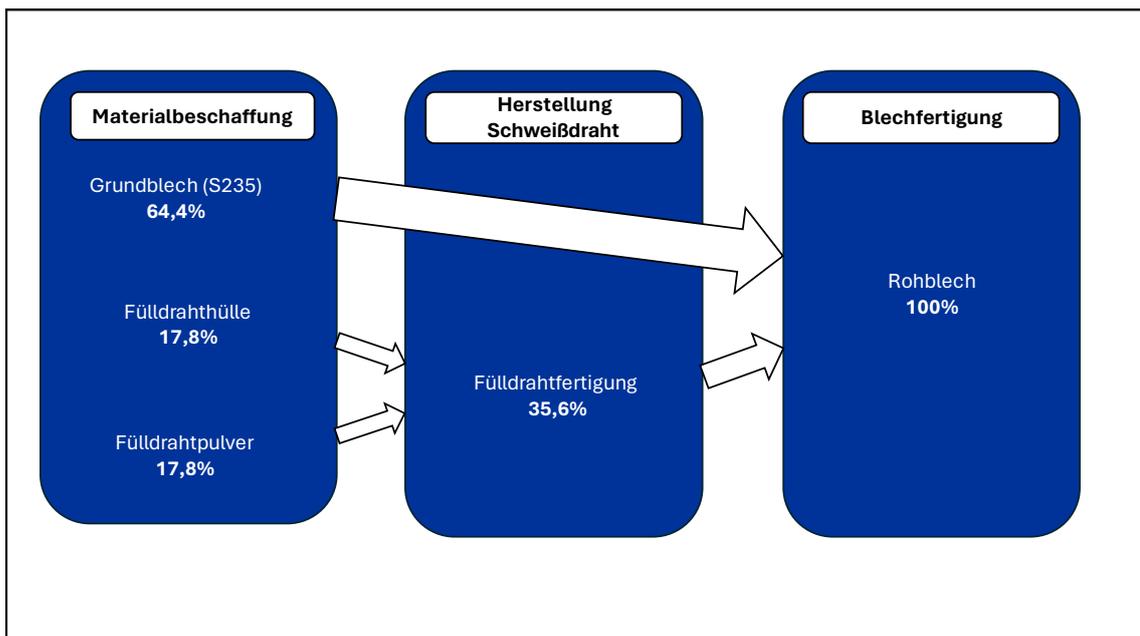


Abbildung 26: Materialfluss je Produktionslos Variante 2 – HVF (Eigene Darstellung)

Energiemengen Variante 2: HVF

Aufgrund der Fertigung der speziellen Panzerschicht ist die benötigte Energie für die zweite Variante in der Blechfertigung wesentlich höher. Diese beläuft sich auf insgesamt 394,94 kWh für 20 Stück Wandverkleidung (=1 Produktionslos). Dabei ist speziell der Einsatz des Portalschweißtisches mit einem prozentualen Anteil von knapp über 91 % besonders hervorzuheben. Im Gegensatz zum Hardox-Produkt fällt hier auch noch die Herstellung des Fülldrahtes an, die knapp 6 % benötigt.

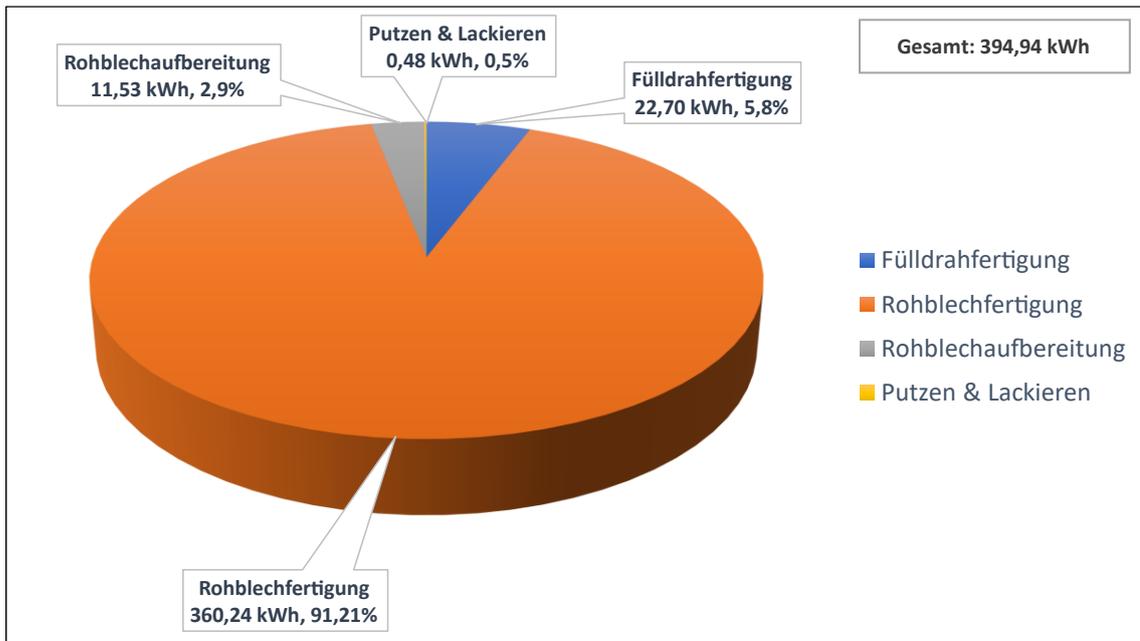


Abbildung 27: Elektrische Energiemengen je Produktionslos Variante 2 – HVF (Eigene Darstellung)

4.3 Wirkungsabschätzung

Für die zuvor definierte Wirkungskategorie Globale Erwärmung/Klimawandel mit dem Wirkungsindikator Globales Erwärmungspotenzial (GWP)/Treibhausgasemissionen wurden für beide Produkte CO₂-Bilanzen mit der passenden Einheit Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalent (kg CO₂-Eq) erstellt, die die relativen Emissionsbeiträge je Lebenszyklusphase ausgeben.

4.3.1 CO₂-Bilanzen

Für die Darstellung der CO₂-Bilanzen wurden zwei Konstellationen gewählt, die näher betrachtet werden. Die erste Darstellung beinhaltet sowohl den Fußabdruck, der die Vorleistungen wie die Beschaffung der Vorprodukte beinhaltet, als auch eine Darstellung, in der die Materialbeschaffung exkludiert ist. In der zweiten Darstellung werden die Vorleistungen ausgeschlossen, um einen Überblick über die restlichen Lebenszyklusphasen zu erhalten.

Mit Anschaffung

Im Folgenden wird die errechnete CO₂-Bilanz für ein Produktionslos von 20 Wandverkleidungen vorgestellt, die die Anschaffung der Rohmaterialien umfasst. Hier sind mit der Materialbeschaffung, Blechfertigung, Auslieferung, Nutzung sowie Entsorgung und dem Recycling alle Phasen des Lebenszyklus berücksichtigt. Für die Hardox-Variante resultiert der ökologische Fußabdruck gerundet in 1142 kg CO₂-Äquivalenten. Im Vergleich dazu weist die HVF-Ausführung mit Chrom-Karbidschicht einen Emissionswert von 2568 kg CO₂-Äquivalenten auf. Der größte Anteil der Treibhausgasemissionen entsteht in der Phase der Materialbeschaffung. Insgesamt liegt der Emissionswert der HVF-Variante somit um den Faktor 2,25 höher als bei der Hardox-Variante.

Variante 1: Hardox

Für das Hardox-Produkt bezieht sich die Materialbeschaffung lediglich auf das Hardox 450-Rohblech.

Tabelle 11: CO₂-Fußabdruck inklusive Vorleistungen je Produktionslos der Hardox-Wandverkleidung (Eigene Darstellung)

Lebenszyklusphase	Wert	Einheit	Anteil
Materialbeschaffung	1051,35	kg CO ₂ -Eq	92,09%
Blechfertigung	9,74	kg CO ₂ -Eq	0,85%
Auslieferung	28,17	kg CO ₂ -Eq	2,47%
Nutzungsphase	50,69	kg CO ₂ -Eq	4,44%
Entsorgung	1,65	kg CO ₂ -Eq	0,14%
Total	1141,60	kg CO₂-Eq	100,00%

Variante 2: HVF

Die Beschaffung der Materialien für die zweite Variante bezieht sich auf zwei Komponenten, einerseits auf das Grundblech, bestehend aus einem S235-Stahl und andererseits den Fülldrahtbestandteilen (Fülldrahtpulver und Fülldrahthülle).

Tabelle 12: CO₂-Fußdruck inklusive Vorleistungen je Produktionslos der HVF-Wandverkleidung (Eigene Darstellung)

Lebenszyklusphase	Wert	Einheit	Anteil
Materialbeschaffung	2289,40	kg CO ₂ -Eq	89,16%
Blechfertigung	161,64	kg CO ₂ -Eq	6,30%
Auslieferung	64,78	kg CO ₂ -Eq	2,52%
Nutzungsphase	50,69	kg CO ₂ -Eq	1,97%
Entsorgung	1,12	kg CO ₂ -Eq	0,04%
Total	2567,63	kg CO₂-Eq	100,00%

Zwei Hauptfaktoren tragen zu den höheren Emissionswerten bei der zweiten Variante bei, besonders in den Bereichen der Materialbeschaffung und der Blechfertigung. Für Variante 2 führt erstens der energieintensive Einsatz des Portalschweißbrenners bei der Herstellung der Chrom-Karbidschicht zu einem erhöhten Energieverbrauch. Dieser Prozess ist bei der Hardox-Variante nicht erforderlich. Zweitens verursacht das chromreiche Rohmaterial der HVF-Ausführung höhere Emissionen, da Chrom als eines der emissionsstärksten Erze weltweit gilt. Obwohl es zunächst nachteilig erscheinen mag, wiegt der Aspekt des höheren Chrom-Anteils insgesamt weniger schwer, da er sich äußerst positiv auf die Lebensdauer des Verschleißbleches auswirkt. Die Standzeiten der HVF-Variante sind nach Erhebungen in einer Biogasanlage über den Zeitraum von einem gesamten Jahr um den Faktor 2,86 verbessert. Wenn man diesen Faktor in Bezug auf die Emissionen setzt, ergibt sich für die HVF-Variante im Vergleich zur Hardox-Ausführung über ein Jahr betrachtet ein Emissionsvorteil von 27 %.

Ohne Anschaffung

Zusätzlich wurde noch eine CO₂-Bilanz erstellt, die die vorgelagerten CO₂-Emissionen in Form der Beschaffung der Rohbleche exkludiert, um einen besseren Überblick über die restlichen Lebenszyklusphasen zu erhalten. Dabei resultiert das Hardox-Produkt in einem Fußabdruck von 90,25 kg CO₂-Äquivalenten, während die zweite Variante auf 278,23 kg CO₂-Eq kommt. Für diesen Betrachtungsfall ergibt sich somit für die HVF-Ausführung ein Faktor-Unterschied von 3,08.

Variante 1: Hardox

Für das Hardox-Produkt werden keine energiereichen Produktionsschritte in der Blechfertigung vorgenommen, daher ergibt sich auch ein niedriger Emissionswert von lediglich 9,74 kg CO₂eq.

Tabelle 13: CO₂-Fußabdruck exklusive Vorleistungen je Produktionslos der Hardox-Wandverkleidung (Eigene Darstellung)

Hardox - 1 Produktionslos (= 5 Sätze à 4 Stück)			
Lebenszyklusphase	Wert	Einheit	Anteil
Blechfertigung	9,74	kg CO ₂ -Eq	10,79%
Auslieferung	28,17	kg CO ₂ -Eq	31,21%
Nutzungsphase	50,69	kg CO ₂ -Eq	56,17%
Entsorgung	1,65	kg CO ₂ -Eq	1,83%
Total	90,25	kg CO₂-Eq	100,00%

Variante 2: HVF

Verglichen mit Variante 2 ist der größte Unterschied der bereits besprochene Einsatz des Portalschweißisches, die zusätzlichen Emissionen in der Auslieferung ergeben sich aus insgesamt längeren Transportwegen für den Versand der gefertigten Wandverkleidungen zum Standort der Biogasanlage.

Tabelle 14: CO₂-Fußabdruck exklusive Vorleistungen je Produktionslos der HVF-Wandverkleidung (Eigene Darstellung)

HVF-Variante - 1 Produktionslos (= 5 Sätze à 4 Stück)			
Lebenszyklusphase	Wert	Einheit	Anteil
Blechfertigung	161,64	kg CO ₂ -Eq	58,12%
Auslieferung	64,78	kg CO ₂ -Eq	23,29%
Nutzungsphase	50,69	kg CO ₂ -Eq	18,19%
Entsorgung	1,12	kg CO ₂ -Eq	0,4%
Total	278,23	kg CO₂-Eq	100,00%

4.3.2 Ableitung CO₂-Box

Aufgrund der Sensitivität der Daten wurden für die Belastungen aus den Vorleistungen sogenannte CO₂-Boxen angefertigt. Der dabei errechnete Wert spiegelt dabei die Emissionsbelastung wider, mit der das Rohblech anschließend in die zweite Produktlebensphase einfließt. Die folgende CO₂-Box stellt somit den Emissionswert pro Kilogramm Rohmaterial dar, mit dem das jeweilige Vorprodukt in die Blechfertigung eingeht. Diese umschließt somit die Extraktion der Erze und die Verarbeitung zu den in der Blechfertigung eingesetzten Rohmaterialien. In diesem Zusammenhang wurden Informationen von Vertretern der Industrie berücksichtigt, um einen möglichst realitätsgetreuen Wert zu ermitteln. (Bernard, 2023; Kumar, 2023; Hanghofer, 2023)

Final ergab sich mittels weiterer Ecoinvent-Berechnungen für die Hardox-Variante ein Wert von 1,89 kg CO₂ / kg Material für die genannte CO₂-Eingangsbox. Im Gegensatz dazu wurde für die HVF-Variante mit Chromkarbidschicht ein Wert von 4,69 kg CO₂ / kg Stahl ermittelt. Die Berechnung dazu erfolgten in einer gesonderten Excel-Tabelle im Format kg CO₂ / kg Material.

Im Folgenden sind die Bestandteile der Boxen für beide Varianten aufgelistet.

Tabelle 15: CO₂-Boxen für beide Verschleißteil-Produkte (Eigene Darstellung)

Variante 1 – Hardox	Variante 2 – HVF
<u>Inklusive</u> Hardox Grundblech (S235)	<u>Inklusive</u> Grundblech (S235) Fülldrahtpulver Fülldrahthülle (S235) Energie Herstellung Schweißdraht Energie Handpanzerung Schlagleiste
1,89 kg CO₂-Eq / kg Material	4,69 kg CO₂-Eq / kg Material

Dabei zeigt sich, dass die Vorleistungen für die zweite Variante um den Faktor 2,48 höher belastet sind, bevor das Produkt in der Blechfertigung fertiggestellt wird um anschließend an den Kunden ausgeliefert zu werden.

4.3.3 Optimierungspotenziale

In weiterer Folge soll erörtert werden in welcher Lebenszyklusphase sich womöglich durch Anpassungen Emissionsreduktionen für Variante 2 realisieren lassen. Bei Betrachtung der CO₂-Bilanzen lassen sich theoretisch insgesamt drei Stellgrößen festmachen, an denen Veränderungen gemacht werden könnten.

Rohmaterialien

Basierend auf den vollständigen CO₂-Bilanzen (mit Anschaffung; siehe Tabelle 11 und 12) ist ersichtlich, dass die Materialbeschaffung in beiden Fällen mit etwa 90 % den Hauptanteil an den gesamten Emissionsbelastungen darstellt.

Konkret gäbe es zwei Möglichkeiten der Anpassung. Tabelle 11 und 12 sowie der CO₂-Box Vergleich zeigen den deutlichen Unterschied in den Werten zwischen den Materialbeschaffungen der beiden Produkte. Dies ist insofern interessant, da insgesamt pro Produktionslos ähnliche Stahlmengen in der Blechfertigung verwendet werden und ein signifikanter Teil des Rohmaterials für Variante 2 (siehe Abbildung 25) aus einem S235 Stahl besteht. Dieser ist mit einem Wert von 1,7 kg CO₂-Eq / kg Rohstahl behaftet und liegt somit sogar etwas unter dem des Hardox-Stahls (1,88 kg CO₂-Eq / kg Rohstahl). Dies liegt hauptsächlich daran, dass ein S235 Stahl ein unlegierter Baustahl ist und keine spezielle Wärmebehandlung wie beim Hardox-Stahl notwendig ist. Somit lässt sich festhalten, dass ein genauerer Blick auf das Fülldrahtpulver sinnvoll erscheint, da dies die Komponente im Rohmaterial-Mix (bestehend aus Grundblech, Fülldrahthülle und Fülldrahtpulver) ist, die nicht aus einem S-Baustahl besteht und für die erheblich höheren Emissionsbelastungen verantwortlich ist.

Zusätzlich wäre es überlegenswert für den Teil des Rohmaterial-Mixes, der aus Baustahl besteht (Grundblech, Fülldrahthülle) ein anderes Fertigungsverfahren in Erwägung zu ziehen. Eine umweltfreundliche Option, die zu den konventionellen Hochöfen immer häufiger in Zukunft eingesetzt werden wird, ist der Elektrolichtbogenofen. Dabei wird statt Kohle oder Koks als Hauptbrennstoff elektrische Energie zur Erzeugung von Wärme verwendet. Mit dieser Methode ließen sich die Komponenten aus dem S-Baustahl mit wesentlich geringeren Emissionen realisieren.

Energiebedarf

Bei Betrachtung der Auflistungen exklusive der Vorleistungen (Tabelle 13 und 14) ist der markante Unterschied in der Blechfertigung zwischen dem Hardox-Produkt (9,74 kg CO₂-eq) und der HVF-Variante (161,64 kg CO₂-Eq) sofort ersichtlich. Die höheren Emissionen der Variante 2 (HVF) lassen sich durch den Einsatz des energieintensiven Portalschweißstisch erklären, der essenziell für den Schweißprozess zur Anbringung der Panzerschicht ist. Da am Produktionsstandort der Blechfertigung bereits ein Teil der elektrischen Energie durch den Einsatz einer Photovoltaik-Anlage zur Verfügung gestellt wird, wäre eine Erhöhung dieses Anteils überlegenswert.

Transport

Gemäß den Auflistungen exklusive der Vorleistungen (Tabelle 13 und 14) lässt sich erkennen, dass auch die Auslieferung einen nicht unbedeutenden Anteil an den Gesamtmenge besitzt. Zwar fällt dieser bezogen auf die Gesamtbelastung relativ gesehen eher gering aus, doch wurde im Zuge dieser Arbeit erwogen auch an dieser Stellgröße Adaptionen vorzunehmen. Eine mögliche Überlegung dafür eine Reduktion der Umweltbelastungen zu erzielen wäre ein Umstieg des Versandweges auf einen reinen Zug-Transport. Unter der Voraussetzung, dass die elektrische Energie dafür aus gänzlich erneuerbaren Quellen stammt, könnten die Emissionen für die Anschaffungs-

und Auslieferungstransporte eingespart werden. Da jedoch jegliche Standorte (Produktionsstandorte Blechfertigung für beide Varianten, Standort des Endkunden) für einen unkomplizierten Versand per Zug aus geographischen Gründen nicht in Frage kommen, wird eine detailliertere Analyse für den Transport an dieser Stelle nicht weiter in Erwägung gezogen.

4.4 Szenarienanalysen

Aus den Überlegungen im vorigen Abschnitt über die Sinnhaftigkeit von möglichen Optimierungen können somit zwei konkrete Potentiale festgelegt werden, die hier in weiterer Folge als Ergänzung zur Wirkungsabschätzung anhand verschiedener Szenarien betrachtet werden sollen. Beide dieser Adaptionsmöglichkeiten beziehen sich auf Variante 2 (HVF).

Als Erstes ergibt sich ein Potential im ökologischen Kontext. Dies bedeutet den Rohmaterial-Mix näher zu beleuchten und dabei die Zusammensetzung des emissionsreicheren Fülldrahtpulvers zu variieren und dabei die Veränderung auf den CO₂-Box Eingangswert (Tabelle 15) zu untersuchen. Außerdem können unter Annahme eines anderen Fertigungsverfahrens für aus dem S-Baustahl bestehenden Komponenten die Auswirkungen möglicher Emissionseinsparungen auf die CO₂-Box untersucht werden.

In weiterer Folge kann ebenso der Energiebedarf in der Blechfertigung näher untersucht werden, da sich durch eine Erweiterung der Photovoltaik-Kapazitäten eine Reduktion der Schadstoffemissionen realisieren lässt.

4.4.1 Variation CO₂-Box Variante 2 – HVF

Für die Potentialabschätzung im ökologischen Kontext wird nun für die zweite Variante eine Variation der CO₂-Box vorgenommen. Dafür werden zwei Szenarien näher betrachtet.

Szenario #1: Variation der Legierungsbestandteile des Fülldrahtpulvers

Aufgrund der Sensitivität der Daten wurde für die derzeit verwendete Pulvermischung in der Fülldrahtfertigung ein Basiswert von 100 % für einen der Legierungsbestandteile festgelegt. Dieser Wert wurde dann in 7,5%-Schritten mit 37,5%-Schranken versehen und dabei sowohl nach unten als auch nach oben variiert. Es zeigt sich, dass mit einer Reduktion des Basiswert auf 62,50 % (= 3,63 kg CO₂eq / kg Stahl) das Ergebnis mit knapp über 92 % noch deutlich über der CO₂-Eingangsbox des Hardox-Produktes (= 1,89 kg CO₂eq / kg Stahl) liegen würde. Trotzdem würde man damit im Vergleich zum Basiswert eine Reduktion von 22,60% (absolut: 1,06 kg CO₂eq / kg Stahl) für die CO₂-Eingangsbox erreichen.

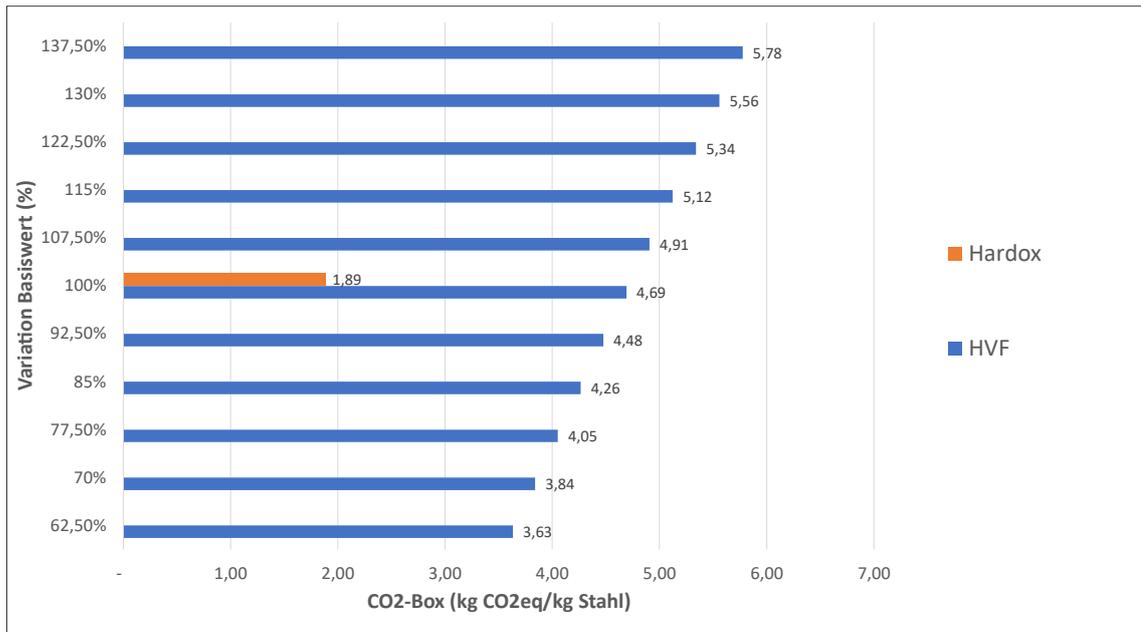


Abbildung 28: Variation Fülldrahtpulver Variante 2 – HVF (Eigene Darstellung)

Eine Änderung der Legierungszusammensetzung hätte folglich auch eine Auswirkung auf die Langlebigkeit der Panzerschicht. Eine Reduktion des Chrom-Anteils würde in einer weicheren Panzerschicht resultieren, die einen höheren Verschleiß aufweist. Durch Beimischung anderer Karbidbildner, die einen geringeren CO₂-Fußabdruck als das emissionsreiche Chrom aufweisen, könnte aber ein niedrigerer Wert für die CO₂-Eingangsbox erreicht werden, bei ähnlich positiven Verschleißergebnissen. Die Auswirkungen durch Veränderung der Fülldrahtbestandteile und folglich der Panzerschicht auf die Verschleißfestigkeit des Bleches insgesamt müsste daher in Versuchsreihen noch ausführlicher getestet werden.

Szenario #2: Variation der Legierungsbestandteile des Fülldrahtpulvers inklusive Umstellung der Stahlproduktion auf eine Elektrolichtbogenofen-Fertigung

Als Erweiterung von Szenario 1 wird im Folgenden nicht nur eine Änderung der Legierungsbestandteile des Fülldrahtpulvers vorgenommen, sondern auch eine Produktion des S235-Stahls mittels eines Elektrolichtbogenofen-Verfahrens angenommen. Dabei werden das aus S235-Stahl bestehende Grundblech und die Fülldrahthülle mit einem Gesamtgewicht von 403,4 kg für die Berechnungen verwendet. Diese auch als Lichtbogenofenschmelzen bezeichnete Produktionsmethode von Stahl gilt als besonders umweltfreundlich, da es gänzlich durch elektrische Energie betrieben wird. Der ökologische Fußabdruck ist dabei wesentlich niedriger, dieser beträgt bei dem im Land des blechfertigenden Unternehmens üblichen Strommix rund 0,4 kg CO₂eq / kg Stahl. (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2024)

Abbildung 26 zeigt eindrücklich, dass sich damit im Base-Case (Basiswert Fülldrahtpulver ohne Variation und keiner Veränderung der Panzerschicht = 4,69 kg CO₂ / kg Stahl) die CO₂-Box auf einen Wert von 3,62 kg CO₂eq / kg Stahl reduzieren lässt. Dies wäre verglichen mit dem Base-Case in Abbildung 25 ein Einsparungspotential von

22,8 %. In diesem Fall würde man im Vergleich zur CO₂-Box des Hardox-Produktes (Vergleichswert 1,89 kg CO₂eq / kg Stahl) um 91,5 % höher liegen.

Für den Fall, dass man die Stahlproduktion mittels Elektrolichtbogenofen nun mit einer Senkung des Legierungsbestandteiles auf einen Basiswert von 62,50 % kombiniert werden würde, ergibt sich ein Endwert für die CO₂-Box von 2,56 kg CO₂eq / kg Stahl und eine mögliche Reduktion zum Base-Case von sogar 45,4%. Damit liegt der Wert dann nur mehr um 0,67 kg CO₂eq / kg Stahl (35,4 %) über dem Wert der Hardox-Box.

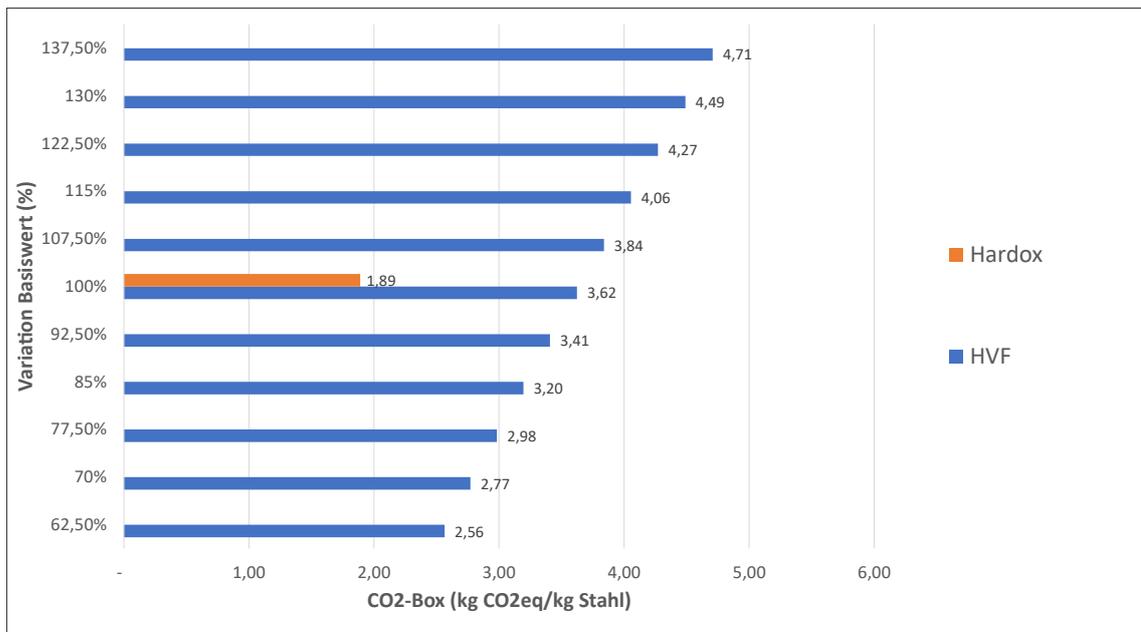


Abbildung 29: Variation Fülldrahtpulver inklusive Umstellung auf Elektrolichtbogenofen-Verfahren (Eigene Darstellung)

4.4.2 Energetische Potentiale Variante 2 - HVF

Angesichts des nicht unerheblichen Anteils an Emissionen in der Blechfertigung für die Herstellung des Schweißdrahtes, primär durch den Energieeinsatz bedingt, erfolgte eine Analyse der Effekte durch Erweiterung der existierenden Photovoltaikanlage. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit deckt diese Anlage 10 % des Energiebedarfs im Produktionsbetrieb der Blechfertigung ab (10 % Photovoltaik-Strom, 90 % öffentliches Netz). Es werden dabei zwei Szenarien betrachtet, sowohl eine mit als auch eine ohne Anschaffung. Bei der Überlegung einer Ausweitung der Photovoltaik-Kapazitäten ist festzuhalten, dass für eine solche fluktuierende erneuerbare Energiequelle ein Netzanschluss unverzichtbar bleibt, um die Versorgungssicherheit jederzeit weiterhin gewährleisten zu können, selbst wenn keine Energie durch die Photovoltaikanlage produziert wird.

Szenario #3: Energiebedarf Blechfertigung Variante 2 (mit Materialbeschaffung)

Im Weiteren soll eine Untersuchung für die Energiebereitstellung von Variante 2 (HVF) durch Variation des Photovoltaik-Anteils erfolgen, einerseits inklusive der Anschaffung und andererseits einmal exklusive der Materialbeschaffung.

Die am Produktionsstandort der Blechfertigung eingesetzte Photovoltaikanlage steuert aktuell einen Anteil von 10 % zur gesamt verbrauchten Energie bei und hat einen CO₂-Fußabdruck von 2567,53 kg CO₂eq. Bei einer Erweiterung der Kapazität der Photovoltaik auf 50% beläuft sich dieser Fußabdruck auf 2513,27 kg CO₂eq, was einer Reduktion von knapp über 2 % bezogen auf alle Lebensphasen entsprechen würde. Bei einer kompletten Umstellung auf Photovoltaik sinkt dieser Abdruck um etwa 5 % auf 2445,32 kg CO₂eq.

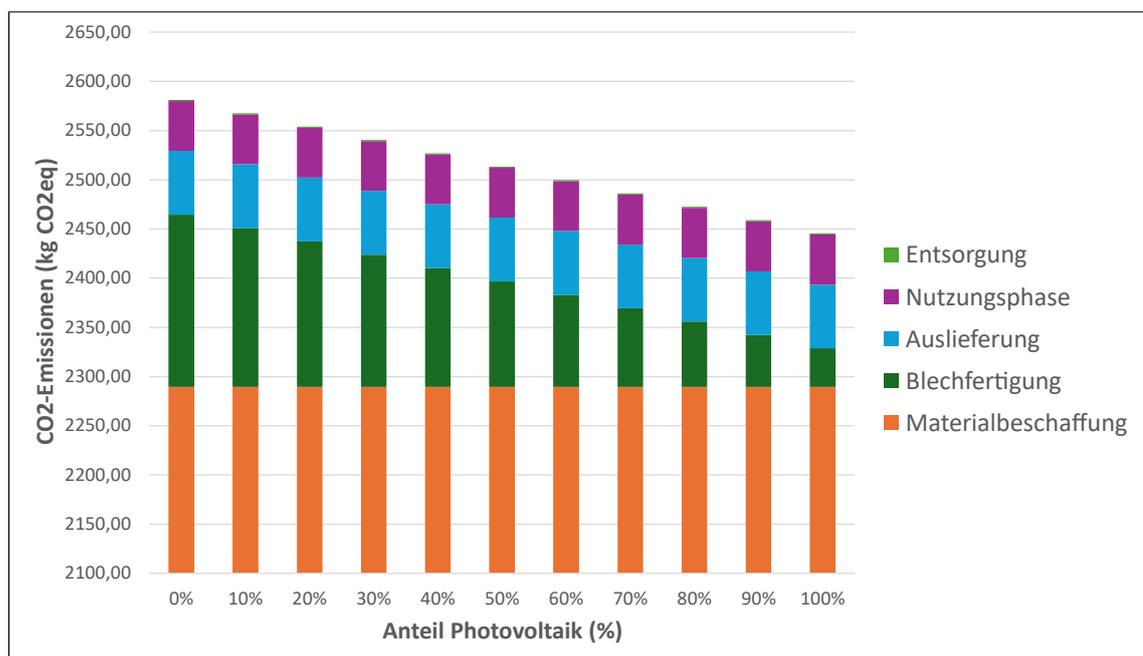


Abbildung 30: Variation Photovoltaik-Anteil – mit Materialbeschaffung (Eigene Darstellung)

Szenario #4: Energiebedarf Blechfertigung Variante 2 (ohne Materialbeschaffung)

In einer weiteren Szenariobetrachtung wird dieselbe Variation erneut vorgenommen, jedoch dabei die Materialbeschaffung exkludiert. Ein kompletter Umstieg der Stromversorgung auf eine Photovoltaikanlage würde demnach von derzeit 161,64 kg CO₂eq den Emissionswert auf 39,33 kg CO₂eq reduzieren. Auf die Emissionsbelastung innerhalb der Blechfertigung wäre dies in diesem konkreten Betrachtungsfall ein Einsparungspotential von etwas über 75 %. Bezogen auf die gesamt anfallenden Emissionen der hier angeführten Lebenszyklusphasen (Blechfertigung, Auslieferung, Nutzungsphase, Entsorgung) ergibt sich eine absolute Senkung von 278,23 kg CO₂eq auf 155,92 kg CO₂ eq (Reduktion um 44 %).

Wenn eine Erweiterung der Photovoltaik-Kapazität auf lediglich 50% in Betracht gezogen wird, würde der CO₂-Fußabdruck in der Blechfertigung von 161,64 kg CO₂eq um knapp über 33% auf einen Wert von 107,28 kg CO₂eq sinken. Dies entspräche einer Reduktion von 20% in Bezug auf die hier betrachteten Lebenszyklusphasen, von 278,23 kg CO₂eq auf 223,87 kg CO₂eq.

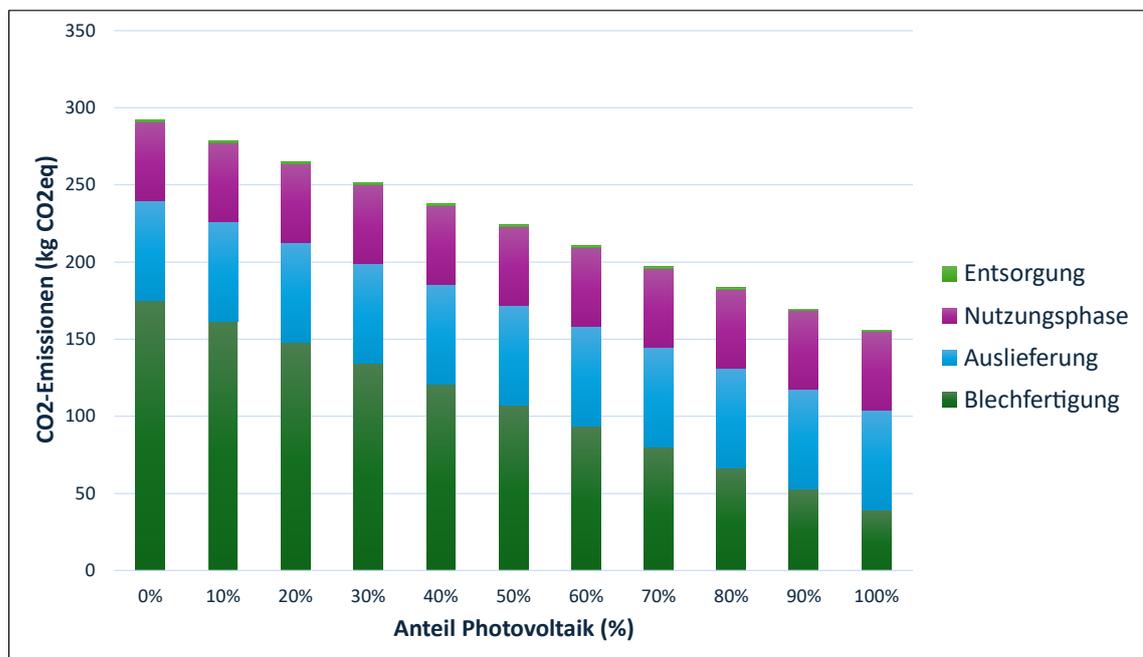


Abbildung 31: Variation Photovoltaik-Anteil – ohne Materialbeschaffung (Eigene Darstellung)

Langfristig betrachtet ist ein Ausbau der Photovoltaikanlage sinnvoll, auch angesichts möglicher Fördermittel, die eine solche Investition finanziell attraktiv machen könnten. Eine vollständige Umstellung auf Photovoltaik-Strom erscheint aber unrealistisch, da die Dachflächen des Produktionsstandortes der Blechfertigung begrenzt sind und die Anzahl der Sonnenstunden im mitteleuropäischen Raum, besonders in den Wintermonaten, ein limitierender Faktor sind. Außerdem stellt sich die Frage, inwieweit eine Erweiterung der Photovoltaik die Spitzenlasten des energieintensiven Portalschweißes mitabdecken kann. Somit scheint die wahrscheinlich effektivste Maßnahme eine Erweiterung der Photovoltaik-Module zu sein, die sich technisch auf dem Betriebsgelände realisieren

lässt und durch potenzielle Förderungen auch finanziell interessant sein könnte. Über das Jahr hinweg würde dies einerseits zu einer beträchtlichen Reduktion der Emissionen in der Blechfertigung führen und andererseits zu Betriebskosteneinsparungen führen. Speziell in Zeiten von hohen Energiepreisen wäre die Kostenüberlegung hier ein weiteres mögliches Argument.

4.5 Vereinfachte Darstellung

Aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Daten wurde mithilfe des Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel noch eine kompakte Darstellung in Form eines Mini-Tools erstellt. Dabei wurden die soeben erwähnten drei wichtigsten Stellgrößen (Rohmaterialien, Energiebedarf, Transport) als Eingangsparameter definiert. Ziel dieses Tools ist es, den CO₂-Fußabdruck anhand dieser Eingangsdaten rasch abschätzen zu können. Die Daten wurden dabei auf ein Produktionslos à 20 Stück der Wandverkleidung kalibriert. Für die Rohmaterialien und den Energiebedarf erfolgte gegebenenfalls noch eine kurze Aufschlüsselung in die wichtigsten Komponenten bzw. Produktionsschritte (siehe 4.2.3 Analyse Materialflüsse und Energiemengen).

Für den Transport wurden die anfallenden Emissionsbelastungen sowohl für den Transport der Anschaffung als auch den Transport der Auslieferung dargestellt (pro Produktionslos).

Die gesamte CO₂-Bilanz ist dabei für beide Produkte aufgeschlüsselt in die jeweiligen Produktlebensphasen inklusive des Gesamtwertes. Für alle drei Eingangsparameter wurden anschließend CO₂-Faktoren pro geeigneter Mengeneinheit ermittelt. Für die Rohmaterialien ergibt sich somit kg CO₂eq / kg Material, für den Energiebedarf kg CO₂-eq / kWh und für den Transport kg CO₂-Eq / 100 km. Somit kann nicht nur der gesamte Abdruck abgeschätzt werden, sondern es ergibt sich auch die Möglichkeit, beispielsweise Veränderungen im Bereich der Rohmaterialien rasch einordnen zu können. Falls die Mischung des Fülldrahtpulvers geändert werden sollte, könnte mit dem dafür passenden CO₂-Faktor der neue gesamte Fußabdruck für ein Produktionslos errechnet werden. Dasselbe gilt auch für die beiden aus dem S-Baustahl bestehenden Komponenten, falls eine Umstellung der Fertigung auf ein Elektrolichtbogenofen-Verfahren erwogen wird.

Außerdem kann der Anteil des Strom-Mixes verändert werden, um somit die Emissionseinsparungen durch einen Ausbau der Photovoltaik-Kapazitäten abschätzen zu können. Dafür wurden CO₂-Faktoren sowohl für die Photovoltaik als auch für das öffentliche Stromnetz hinterlegt, mit dem die Emissionen in der Blechfertigung berechnet werden können.

Die Emissionswerte der letzten beiden Produktlebensphasen wurden als konstant angenommen, hierbei handelt es sich für die Nutzungsphase um den Einsatz von Schrauben und für die Entsorgung um den Stahlschrott und die restlichen Abfälle.

4.6 Vergleich der Ergebnisse

Abschließend erfolgt eine Auflistung der zentralen Resultate zwischen den beiden Wandverkleidungen. Dazu werden hier auch noch die ermittelten Standzeiten der Wandverkleidungen am Standort der Biogasanlage aufgelistet. Die Endergebnisse der vorherigen Tabellen sind in dieser Übersicht auf die zweite Nachkommastelle gerundet dargestellt.

Tabelle 16: Vergleich der Ergebnisse je Produktionslose zwischen Variante 1 – Hardox und Variante 2 - HVF (Eigene Darstellung)

	HVF-Variante	Hardox-Variante	Faktor
Standzeiten (h)	1.260,00	440,00	2,86
Gewechselte Produktionslose (p.a.)	1,16	3,32	0,35
CO ₂ -Box (kg CO ₂ eq / kg Rohmaterial)	4,69	1,89	2,48
CO ₂ -Abdruck inklusive Vorleistungen (kg CO ₂ eq)	2.568,00	1.142,00	2,25
CO ₂ -Abdruck (kg CO ₂ eq p.a.)	2.976,00	3.789,00	0,79
CO ₂ -Abdruck exklusive Vorleistungen (kg CO ₂ eq)	278,00	90,00	3,09
CO ₂ -Emissionsersparnis (% p.a.) vs. Hardox-Variante	21,46%	-	-
Betriebskostensersparnis (% p.a.) vs. Hardox-Variante	54,73%		

Obwohl der CO₂-Fußabdruck inklusive der Vorleistungen für die HVF-Variante aus Schwarzstahl mit Chrom-Karbid zunächst nachteilig erscheinen mag, wiegt der Aspekt des höheren Chrom-Anteils insgesamt weniger schwer, da er sich äußerst positiv auf die Lebensdauer des Verschleißbleches auswirkt und somit deutlich weniger Wechselintervalle benötigt. Die Standzeiten der HVF-Variante sind nach Erhebungen in einer Biogasanlage über den Zeitraum von einem gesamten Jahr um den Faktor 2,86 verbessert. Somit lässt sich für den Berechnungszeitraum von einem Jahr eine CO₂-Emissionsersparnis von 21,46 % ableiten, berechnet als $((3789 - 2976) / 3789) * 100$. Außerdem ergibt sich für Nutzung über den Betrachtungszeitraum von einem Jahr ein Betriebskostenvorteil der HVF-Wandverkleidung gegenüber der Hardox-Ausführung von 54,73%. In diesen Kostenvergleich wurden neben den Anschaffungskosten für die Bauteile auch die Kosten für die Logistik und Entsorgung sowie die Erlöse für den anfallenden Stahlschrott berücksichtigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die erfolgreiche Transformation zu einem klimafreundlicheren Energiemix kann die Biogasproduktion in der Zukunft einen bedeutenden Beitrag leisten. Deren Verwendung bietet Anlagenbetreiber attraktive Verwendungsmöglichkeiten, und die zunehmende Beliebtheit in Europa lässt sich anhand von Produktionsdaten der vergangenen Jahre erkennen. Für einen wirtschaftlichen Betrieb ist eine erprobte Technik unerlässlich, die die Betriebskosten niedrig und den Wartungsaufwand in einem angemessenen Rahmen hält. Die HVF-Wandverkleidung aus Schwarzstahl mit einer Panzerschicht aus Chromkarbid wurde entwickelt, um integral Kosten zu sparen und außerdem Biogasproduzenten durch eine höhere Verschleißfestigkeit zu einem verbesserten Betriebsablauf zu verhelfen.

Die im Zuge der Lebenszyklusanalyse in dieser Arbeit durchgeführte Wirkungsabschätzung ergab für die neuartige Wandverkleidung der HVF-Variante im Vergleich zur Hardox-Variante pro funktioneller Einheit einen um 125% höheren ökologischen Fußabdruck (absolut: 1426 kg CO₂-Eq). Die wesentlichen Unterschiede lassen sich dabei hauptsächlich in den Bereichen der Materialbeschaffung aufgrund der Zusammensetzung der Panzerschicht und der Blechfertigung aufgrund des Einsatzes des Portalschweißtes festmachen. Da die Hardox-Variante im Vergleich über den Betrachtungszeitraum von einem Jahr beinahe dreimal so häufig gewechselt werden muss, ergibt sich jedoch für die HVF-Variante eine CO₂-Emissionsersparnis von rund 21,46%.

Die als Erweiterung zu dieser Abschätzung durchgeführten Szenarienanalysen ergaben, dass die Emissionsbelastungen für die HVF-Ausführung durch gewisse Maßnahmen im Bereich der Rohmaterialien und der Energiebereitstellung in der Blechfertigung weiter reduzieren werden könnten. Durch Änderung der Fülldrahtbestandteile wäre bezogen auf die CO₂-Box innerhalb der definierten Schranken theoretisch eine Senkung der Emissionsbelastung von bis zu 22,60% (absolut: 1,06 kg CO₂-Eq / kg Material) möglich. Da etwaige Änderungen die Verschleißbeständigkeit der Wandverkleidung beeinflussen würden, müssten diese in der Praxis auf ihre Lebensdauer noch getestet werden. Für Anlagenbetreiber einer Biogasanlage werden hier die erreichten Standzeiten und die damit verbundenen Betriebskosten realistischerweise im Vordergrund stehen. Zusätzlich wäre eine Umstellung der Stahlproduktion für die weiteren Rohmaterialien im Sinne einer Elektrolichtbogen-Fertigung nach Möglichkeit überlegenswert, um noch weitere Emissions-Einsparungen generieren zu können.

Eine weitere Möglichkeit der Optimierung würde noch im Bereich der Blechfertigung liegen, in der ein weiterer Ausbau auf zusätzliche Photovoltaik-Kapazität eine Überlegung wert wäre. Zwar erscheint eine vollständige Umstellung auf reinen

Photovoltaik-Strom aufgrund der begrenzten Dachflächen, der durchschnittlichen Anzahl an Sonnenstunden am Standort der Blechfertigung und dem energieintensiven Einsatz des Portalschweißstisches nicht unbedingt zielführend zu sein. Jedoch könnte ein weiterer Ausbau, soweit technisch umsetzbar, eine sinnvolle Investition darstellen. Über das gesamte Produktionsvolumen gemeinsam mit der Herstellung anderer Produkte könnten somit erhebliche Mengen an Emissionen eingespart werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die neuartige HVF-Wandverkleidung der Hardox-Variante hinsichtlich erforderlicher Materialmengen, jährlich gebundener Emissionen und Wartungsaufwand im Vorteil ist. Außerdem ergeben sich über den Betrachtungszeitraum von einem Jahr Betriebskosteneinsparungen von 54,73% im Vergleich zur Hardox-Variante. Eine Umstellung auf dieses innovative Panzerblech erscheint somit für jede Biogasanlage mit der dafür passenden Zerkleinerungstechnik eine sinnvolle Maßnahme zu sein. Insgesamt lässt sich basierend auf den heutigen Daten und der geopolitischen Situation Europas für die Biogasproduktion eine steigende Nachfrage für die zukünftigen Jahre ableiten. Spezifisch für den Standort Österreich ist, insbesondere durch Beschluss des Erneuerbare-Ausbau-Gesetz (EAG), das unter anderem auch die Rahmenbedingungen für den Ausbau der Kapazitäten im Bereich der Biogasbranche regelt, ein großes Wachstumspotenzial durch zukünftige Neubauten und Erweiterungen von bestehenden Anlagen zu erkennen.

Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- ACR – Austrian Cooperative Research (2022), „Wertvoller Dünger und Humus aus Biogas“, verfügbar unter <https://www.acr.ac.at/science-story/get-wertvoller-duenger-und-humus-aus-biogas/> (Zugriff am 20. Februar 2024).
- AGCS Gas Clearing and Settlement AG (2024), „Rechtsgrundlagen“, verfügbar unter <https://www.biomethanregister.at/de/regelwerk/rechtsgrundlagen> (Zugriff am 20. Februar 2024).
- Agentur für Erneuerbare Energien (2024), „Umsetzung der RED III darf energiepolitisch wichtige Rolle der Biogasbranche nicht leichtfertig auf Spiel setzen. Branchenmeldung“, verfügbar unter <https://www.unendlich-viel-energie.de/presse/branchenmeldungen/umsetzung-der-red-iii-darf-energiepolitisch-wichtige-rolle-der-biogasbranche-nicht-leichtfertig-auf-spiel-setzen> (Zugriff am 24. März 2024).
- ASCO Kohlensäure AG (2024), „Allgemeine Informationen über CO₂“, verfügbar unter <https://www.ascoco2.com/co2-produktion-und-co2-rueckgewinnung/allgemeine-informationen-ueber-co2> (Zugriff am 17. Februar 2024).
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2023), „Verwertung von Körnermaisstroh für die Biogaserzeugung“, Forschungs- und Innovationsprojekt, verfügbar unter <https://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/076707/> (Zugriff am 16. Oktober 2023).
- BHS Sonthofen, „Produktflyer - Biogrinder RBG. Optimierte Gasausbeute durch effiziente zerfaserte Substrate“, S. 1–6.
- BIOG (2019), „Einbringtechnik • BioFeeder | BioG • Solutions for green energy“, verfügbar unter <https://biog-biogas.com/einbringtechnik/> (Zugriff am 10. Dezember 2023).
- BIOG GmbH (2019), „Aufbereitungstechnik Biogasanlagen | BioG • Solutions for green energy“, verfügbar unter <https://biog-biogas.com/aufbereitungstechnik/> (Zugriff am 3. März 2024).
- BIOG GmbH (2023), „BioG Infokanal“, verfügbar unter <https://biog-biogas.com/unternehmen/> (Zugriff am 6. November 2023).
- Biogest®, „Power Ring. Technical Data Sheet“.
- „Biogrinder - effiziente, wirtschaftliche Substrataufbereitung“ (2023), verfügbar unter <https://www.bhs-sonthofen.de/recyclingtechnik/maschinen/zerkleinerer-biomasse/biogrinder> (Zugriff am 22. Oktober 2023).
- Bright Biomethane, „Biogasaufbereitung Systeme“, Erfahrenster Anbieter von Membran-Biogasaufbereitungssystemen, S. 1–3.
- Bright Biomethane (2023), „Biogasaufbereitung“, verfügbar unter <https://www.bright-renewables.com/de/> (Zugriff am 29. Dezember 2023).

- Bright Renewables (2022), „CO₂-Verflüssigung & Verflüssigung“, verfügbar unter <https://www.bright-renewables.com/de/co2-wiedergewinnung/> (Zugriff am 29. Oktober 2023).
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2021), „Informationsblatt CO₂-Faktoren. Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft - Zuschuss“, verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (Zugriff am 15. Januar 2024).
- Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft (2022), „TG Biogasanlagen. Technische Grundlagen für die Beurteilung von Biogasanlagen“.
- Bundesministerium für Finanzen (2024a), „Beschluss des Nationalrates: Erneuerbare-Wärme-Gesetz“, verfügbar unter <https://www.oesterreich.gv.at/Gesetzliche-Neuerungen/Beschluss-des-Nationalrates/Erneuerbare-Waerme-Gesetz-EWG.html> (Zugriff am 2. März 2024).
- Bundesministerium für Finanzen (2024b), „Transparenzportal - EAG-Marktprämie Anlagen auf Basis von Biogas“, verfügbar unter <https://transparenzportal.gv.at/tdb/tp/leistung/1059682.html> (Zugriff am 18. März 2024).
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2021), „Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz“, verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/2021/20210317_eag.html (Zugriff am 26. Februar 2024).
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2024a), „Leitfaden über die Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse“, verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/energiewende/erneuerbare/nachhaltigkeitskriterien.html (Zugriff am 20. Februar 2024).
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2024b), „Erneuerbare-Wärme-Gesetz (EWG)“, verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/energiewende/waermestrategie/ewg.html (Zugriff am 25. Februar 2024).
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2024c), „Erneuerbares-Gas-Gesetz im Ministerrat beschlossen“, verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/2024/0221_biogas.html (Zugriff am 8. März 2024).
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2024d), „Erneuerbares-Gas-Gesetz im Ministerrat beschlossen“, verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/2024/0221_biogas.html (Zugriff am 16. März 2024).
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2024e), „RED III - Renewable Energy Directive“, verfügbar unter <https://energie.gv.at/glossary/red-iii> (Zugriff am 24. März 2024).

- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (2024), „Biogas aus Österreich: Erneuerbare-Gase-Gesetz geht in Begutachtung“, verfügbar unter <https://info.bml.gv.at/themen/wald/wald-und-klima/erneuerbare-gase-gesetz-in-begutachtung.html> (Zugriff am 20. Februar 2024).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz - En Argus (2023), „Sachbilanz“, verfügbar unter https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d10960-2/*/*Sachbilanz.html?op=Wiki.getwiki (Zugriff am 28. November 2023).
- Burgstaler, J. Dr. agr. (2023), „Modul 2: Grundlagen der Biogasproduktion“ (Zugriff am 18. November 2023).
- CNG-Mobility (2023), „Fast 20 Prozent mehr Biogas in Europa“, verfügbar unter <https://www.cng-mobility.ch/beitrag/fast-20-prozent-mehr-biogas-in-europa/> (Zugriff am 25. Oktober 2023).
- DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2023), „Odorierung von Erdgas“, verfügbar unter <https://www.dvgw.de/themen/gas/gase-und-gasbeschaffenheit/odorierung> (Zugriff am 23. November 2023).
- EBA - European Biogas Association, „Short-mid-and-long-term-strategies-to-speed-up-biomethane-deployment-in-Europe“.
- Ecochain (2023), „Cradle-to-cradle: What is it & how does it work in LCA?“, verfügbar unter <https://ecochain.com/blog/cradle-to-cradle-in-lca/> (Zugriff am 3. Dezember 2023).
- ecoinvent (2020), „ecoinvent Database (v 3.9)“, verfügbar unter <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/> (Zugriff am 15. Januar 2024).
- Energieversorgung Alzenau GmbH (2024), „Erdgas tanken in Alzenau“, verfügbar unter <https://www.eva-alzenau.de/service/erdgas-als-kraftstoff/erdgastankstelle.html> (Zugriff am 17. Februar 2024).
- Europäisches Parlament (2009), „RICHTLINIE 2009/30/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009. zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG“, verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0030&from=EN> (Zugriff am 20. Februar 2024).
- Europäisches Parlament (2020), „DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2020/2085 DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2020/2085 DER KOMMISSION vom 14. Dezember 2020. zur Änderung und Berichtigung der Durchführungsverordnung (EU) 2018/2066 über die Überwachung von und die Berichterstattung über Treibhausgasemissionen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates“, verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32020R2085&from=EN> (Zugriff am 20. Februar 2024).
- Europäisches Parlament (2023), „Klimawandel: Treibhausgase, die globale Erwärmung verursachen“, verfügbar unter

- <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20230316STO77629/klimawandel-treibhausgase-die-globale-erwarming-verursachen> (Zugriff am 30. November 2023).
- Europäisches Parlament (2024), „Directive - EU - 2023/2413 - EN - EUR-Lex“, verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L2413> (Zugriff am 24. März 2024).
- European Biogas Association (2023a), „EBA Statistical Report 2023“.
- European Biogas Association (2023b), „EBA Statistical Report 2023 - Launch Webinar“, verfügbar unter <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/> (Zugriff am 30. Januar 2023).
- European Commission (2024), „Renewable energy directive“, verfügbar unter https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en (Zugriff am 19. Februar 2024).
- EVM Energieversorgung GmbH (2023a), „Biogasanlage | EVM Bioenergie | Margarethen am Moos“, verfügbar unter <https://www.evm-bioenergie.at/> (Zugriff am 18. Oktober 2023).
- EVM Energieversorgung GmbH (2023b), „Presse & Mediencorner“, verfügbar unter <https://www.evm-bioenergie.at/presse> (Zugriff am 1. November 2023).
- EVM Energieversorgung GmbH (2023c), „Biomethan Blockheizkraftwerk (BHKW)“, verfügbar unter <https://www.evm-bioenergie.at/bhkw> (Zugriff am 24. November 2023).
- EVM Energieversorgung GmbH (2023d), „Biogasanlage | Evm Bioenergie | Margarethen am Moos“, verfügbar unter <https://www.evm-bioenergie.at/> (Zugriff am 30. Dezember 2023).
- Evonik, „SEPURAN® Green. Membrantechnologie zur effizienten Aufbereitung von Biogas“, S. 1–16.
- f:data GmbH (2024), „DIN EN 10025“, verfügbar unter <https://www.baunormenlexikon.de/norm/din-en-10025-2/a3204450-2e04-45d6-a857-82566cb9eda1> (Zugriff am 20. Februar 2024).
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2024a), „Gärprodukte-Aufbereitung“, verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/biogas-nutzung/gaerrestverwertung> (Zugriff am 17. Februar 2024).
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2024b), „Faustzahlen“, verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen> (Zugriff am 30. März 2024).
- Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen, „CNG- Fahren mit Erdgas“.
- Fehrenbach, T. (2019), „Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor bis 2030. Kurzstudie zu den Potenzialen an Kraftstoffen auf Basis von Anbaubiomasse sowie biogenen Abfällen und Reststoffen“.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (2024), „Ökobilanzierung“, verfügbar unter <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/ganzheitliche-bilanzierung/methoden-ganzheitliche-bilanzierung/oekobilanzierung.html> (Zugriff am 15. Februar 2024).

- Frischknecht, R. (2020), *Lehrbuch der Ökobilanzierung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Global Carbon Budget (2023), „Fossil CO2 emissions at record high in 2023“, verfügbar unter <https://globalcarbonbudget.org/fossil-co2-emissions-at-record-high-in-2023/> (Zugriff am 15. Dezember 2023).
- Güssing Energy Technologies GmbH (2014), „Biogas Netzeinspeisung: Einspeisung in das öffentliche Gasnetz“, verfügbar unter <https://www.biogas-netzeinspeisung.at/rechtliche-planung/einspeisung-in-das-oeffentliche-gasnetz/index.html> (Zugriff am 20. Februar 2024).
- INFRACON Infrastruktur Service GmbH & Co. KG (2022), „DVGW-AB G 260 Gasbeschaffenheit Stand 2021: Was ist neu? - Infracon Service“, verfügbar unter <https://infracon-service.de/blog/gasbeschaffenheit-g260/> (Zugriff am 17. Februar 2024).
- iPoint (2024), „Ökoeffizienz Software Umberto (Version 11) | iPoint-systems“, verfügbar unter <https://www.ifu.com/de/umberto/> (Zugriff am 15. Januar 2024).
- Knauber Gas GmbH & Co. KG (2023), „Bio-LNG - ein komplett regenerativ erzeugter Brennstoff“, verfügbar unter <https://www.knauber-Ing.de/was-ist-Ing/Ing-klimaneutral/biogas-zu-Ing.html> (Zugriff am 22. November 2023).
- Kompost & Biogas Verband (2022), „Kompost-Biogas | Biomethan in Österreich“, verfügbar unter <https://www.kompost-biogas.info/biogas/biomethan/biomethan-in-oesterreich/> (Zugriff am 17. Februar 2024).
- Landwirtschaftskammer Österreich (2011), „Silagebereitung von A bis Z. Grundlagen - Siliersysteme - Kenngrößen“.
- LRQA (2024), „ISO 14067 Produkt Carbon Footprint Verifizierung | LRQA Deutschland“, verfügbar unter <https://www.lrqa.com/de-at/iso-14067-carbon-footprint-produktion/> (Zugriff am 15. Februar 2024).
- Maierhofer, H., Rauth, S. Dr. und Strobl, M., „Biomethan als Kraftstoff und Treibhausgas (THG)zertifizierung“, *Bayern Biiogas Forum*.
- Neue Materialien Bayreuth GmbH (2020), „Von Anfang an nachhaltig: NMB bezieht Bewertung der Umweltwirkungen in Material- und Prozessentwicklungen ein - Neue Materialien Bayreuth GmbH“, verfügbar unter <https://www.nmbgmbh.de/%E6%9C%AA%E5%88%86%E7%B1%BB/von-anfang-an-nachhaltig-nmb-bezieht-bewertung-der-umweltwirkungen-in-material-und-prozessentwicklungen-ein/> (Zugriff am 15. Dezember 2023).
- Parlament Österreich, *Regierungsvorlage - Bundesgesetz über die Einführung einer Versorgerverpflichtung für Gas aus erneuerbaren Quellen (Erneuerbares-Gas-Gesetz – EGG)*.
- Renegon GmbH (2021), „Wie funktioniert eine Biogasanlage?“, *RENERGON BIOGAS*, 20 April, verfügbar unter <https://www.renegon-biogas.com/wie-funktioniert-eine-biogasanlage/> (Zugriff am 25. Februar 2024).
- Renegon GmbH (2024), „Biogasanlagen. Startseite“, verfügbar unter <https://www.renegon-biogas.com/> (Zugriff am 30. März 2024).

- Rießner-Gase GmbH (2024), „Kohlendioxid flüssig“, verfügbar unter <https://riessner.de/de/unsere-loesung/gase/kohlendioxid-fluessig> (Zugriff am 17. Februar 2024).
- RIS - Rechtsinformationssystem des Bundes, „Bundesgesetz zum Ausstieg aus der fossil betriebenen Wärmebereitstellung (ErneuerbareWärme–Gesetz - EWG)“, Entwurf.
- RIS - Rechtsinformationssystem des Bundes (2024a), „RIS - Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 20.02.2024“, verfügbar unter https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetze_snummer=20011619 (Zugriff am 20. Februar 2024).
- RIS - Rechtsinformationssystem des Bundes (2024b), „RIS - Gaswirtschaftsgesetz 2011 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 20.02.2024“, verfügbar unter https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetze_snummer=20007523 (Zugriff am 20. Februar 2024).
- Schiffer, F. (2023), „Biogasnutzung“, verfügbar unter <http://www.mifratris.de/biogasnutzung.php> (Zugriff am 18. November 2023).
- Siloxa Engineering AG (2023), „Anlagen zur Gastrocknung“, verfügbar unter <https://www.siloxa.com/gastrocknung> (Zugriff am 17. November 2023).
- SSAB, „Hardox 450 Data Sheet“.
- SSAB (2023), „Hardox®450“, verfügbar unter <https://www.ssab.com/de-de/marken-und-produkte/hardox/produktprogramm/450> (Zugriff am 28. November 2023).
- STAR COOPERATION GmbH (2024), „Ökobilanz & LCA Expertise für Deine Produkte | STAR COOPERATION“, verfügbar unter <https://www.star-cooperation.com/de/expertenfelder/nachhaltigkeitsberatung/oekobilanzierung/> (Zugriff am 15. Februar 2024).
- STRABAG Umwelttechnik GmbH, „Trockenvergärung“.
- Sunbeam GmbH (2008), „Multitalent Biogas. Neue Chancen für Landwirtschaft, Industrie und Umwelt“, Nr. 2.
- Sunbeam GmbH (2012), „Multitalent Biogas. Neue Chancen für Landwirtschaft, Industrie und Umwelt“, Nr. 3.
- SWU Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm GmbH (2023), „Blockheizkraftwerk Bradleystraße in Neu-Ulm wieder in Betrieb“, verfügbar unter <https://www.swu.de/privatkunden/unternehmen/presse/pressemitteilung/blockheizkraftwerk-bradleystrasse-in-neu-ulm-wieder-in-betrieb> (Zugriff am 17. November 2023).
- Tschandl, M. (2011), *Integriertes Umweltcontrolling: Von der Stoffstromanalyse zum Bewertungs- und Informationssystem*, 2nd ed.
- Umweltbundesamt (2023), „Die Treibhausgase“, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> (Zugriff am 30. November 2023).

- VGN Digital GmbH (2024), „Biogas: Energiewende ohne Tausch der Gasheizung“, verfügbar unter <https://www.trend.at/invest/biogas#biogas-heizung-grune-alternative> (Zugriff am 25. März 2024).
- VirtualExpo Group (2024), „Portalschweißmaschine, Portal-Schweißsystem - alle Hersteller aus dem Bereich der Industrie“, verfügbar unter <https://www.directindustry.de/industrie-hersteller/portalschweissmaschine-146625.html> (Zugriff am 20. Februar 2024).
- Wien Energie (2023), „Biogas für Österreich » Wie funktioniert die Biogasanlage? | Wien Energie“, verfügbar unter <https://www.wienenergie.at/ueber-uns/unternehmen/energie-klimaschutz/energieerzeugung/erdgas-und-biogas/> (Zugriff am 2. Oktober 2023).
- Zukunft Grünes Gas (2023), „2021 war Rekordjahr für Biomethan-Produktion“, verfügbar unter <https://www.gruenes-gas.at/news/2021-war-rekordjahr-fuer-biomethan-produktion/> (Zugriff am 19. Februar 2024).

Weitere Referenzen

Bernard, C. Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. (2023), Eisen und Stahlmetallurgie, Information bezüglich Verfahrensrouten für die Herstellung von Durostat und Hardox-Bleichen, E-Mail, 25.08.2023

Hanghofer, A. Dipl.-Ing. (2023), Voest Alpine Grobblech GmbH, Auskunft Durostat-Produkt, Gespräch, 22.09.2023

Kolbitsch, M. Ing. (2023), Lindner Recyclingtech GmbH, Gespräch, 21.09.2023 und 06.10.2023

Kumar, M. Ing. (2023), SSAB AB, Gespräch, 05.09.2023

Pederzoli, A. Ing., Adler Werk Lackfabrik, Informationen zu Lacken und CO₂-Wert, E-Mail, 21.09.2023

Plautz M. (2023), FilliStahl Stahlgroßhandelsgesellschaft m.B.H., Gespräch, 27.09.2023

Anhang A: Umberto Modellierungskette – Variante 1

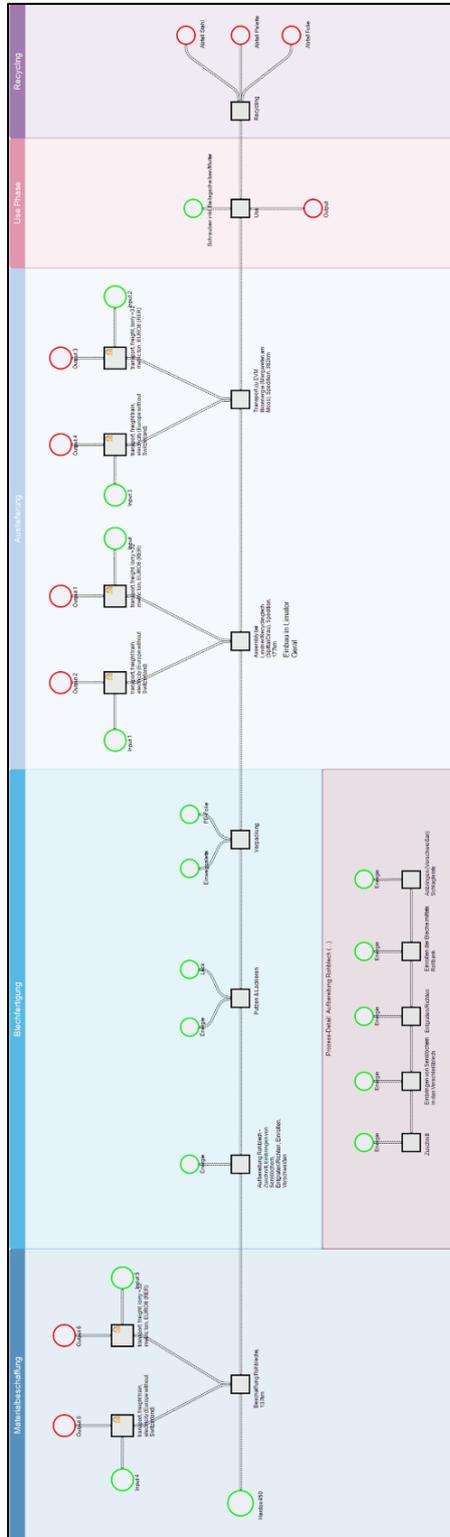


Abbildung 32: Modellkette detailliert – Variante Hardox (iPoint, 2024)

Anhang C: Vollständige Output-Bilanz - Variante 1

Tabelle 17: Output-Bilanz detailliert - Variante Hardox (Umberto)

Output	Menge	Einheit
Schrottstahl (Europa ohne Schweiz, Markt für Schrottstahl)	471,75	kg
Kohlendioxid, fossil (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	20,021045	kg
Abfall-Polyethylen (RER, Marktgruppe für Abfall-Polyethylen)	1	Stk
Reifenabriebemissionen, Lkw (GLO, Markt für Reifenabriebemissionen, Lkw)	0,05262035	kg
Kohlenmonoxid, fossil (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	0,01824386	kg
Stickoxide (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	0,00914921	kg
Bremsabriebemissionen, Lkw (GLO, Markt für Bremsabriebemissionen, Lkw)	0,00531103	kg
Straßenabriebemissionen, Lkw (GLO, Markt für Straßenabriebemissionen, Lkw)	0,00457284	kg
Distickstoffmonoxid (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	0,00109052	kg
NMVOOC, nichtmethan-flüchtige organische Verbindungen (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	0,00046401	kg
Schwefeldioxid (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	0,00010883	kg
Feinstaub, < 2,5 µm (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	8,2563E-05	kg
Ammoniak (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	6,5414E-05	kg
Formaldehyd (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	4,7983E-05	kg
Acetaldehyd (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	2,6105E-05	kg
Methan, fossil (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	1,4047E-05	kg
Zink II (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	1,1609E-05	kg
Acrolein (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	1,0111E-05	kg
Benzaldehyd (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	7,8258E-06	kg
m-Xylen (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	5,598E-06	kg
Styrol (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	3,1989E-06	kg

Fortsetzung Tabelle 17: Output-Bilanz detailliert - Variante Hardox (Umberto)

o-Xylen (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	2,2849E-06	kg
Heptan (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	1,7137E-06	kg
Butan (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	8,5684E-07	kg
Propan (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	5,7123E-07	kg
PAH, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	5,2232E-07	kg
Benzol (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	3,9986E-07	kg
Blei II (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	3,4799E-07	kg
Pentan (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	3,4274E-07	kg
Chrom III (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	2,0038E-07	kg
Ethan (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	1,7137E-07	kg
Kupferion (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	1,416E-07	kg
Nickel II (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	5,8778E-08	kg
Cadmium II (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	5,811E-08	kg
Toluol (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	5,7123E-08	kg
Quecksilber II (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	3,54E-08	kg
Arsenion (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	6,6793E-10	kg
Selen IV (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	6,6793E-10	kg
Chrom VI (Emissionen in die Luft, nicht spezifiziert)	4,0076E-10	kg
Wandverkleidung, 1 Produktionslos (= 5 Sätze à 4 Stück)	1	Stk.
Einwegpalette, Abfall	1	Stk.

Anhang D: Vollständige Output-Bilanz - Variante 2

Tabelle 18: Output-Bilanz detailliert - Variante HVF (Umberto)

Output	Menge	Einheit
Schrottstahl (Europa ohne Schweiz, Markt für Schrottstahl)	425,24	kg
Kohlendioxid, fossil (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	39,73520475	kg
Abfall-Polyethylen (RER, Marktgruppe für Abfall-Polyethylen)	1	Stk
Reifenabrieb-Emissionen, Lkw (GLO, Markt für Reifenabrieb-Emissionen, Lkw)	0,082968002	kg
Kohlenmonoxid, fossil (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,03427786	kg
Stickstoffoxide (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,016798743	kg
Bremsabrieb-Emissionen, Lkw (GLO, Markt für Bremsabrieb-Emissionen, Lkw)	0,008374052	kg
Straßenabrieb-Emissionen, Lkw (GLO, Markt für Straßenabrieb-Emissionen, Lkw)	0,007210131	kg
Distickstoffmonoxid (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,002039212	kg
NMVOG, Nicht-Methan-Volatil-Organische-Verbindungen (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,000865624	kg
Ammoniak (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,000211129	kg
Schwefeldioxid (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,000209956	kg
Feinstaub, < 2,5 µm (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,000160545	kg
Formaldehyd (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	8,95143E-05	kg
Acetaldehyd (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,0000487	kg
Methan, fossil (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	2,62044E-05	kg
Zink II (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	2,25584E-05	kg
Acrolein (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,88619E-05	kg
Benzaldehyd (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,45994E-05	kg

Fortsetzung Tabelle 18: Output-Bilanz detailliert - Variante HVF (Umberto)

m-Xylol (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,04433E-05	kg
Styrol (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	5,96762E-06	kg
o-Xylol (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	4,26258E-06	kg
Heptan (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	3,19694E-06	kg
Butan (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,59847E-06	kg
Propan (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,06565E-06	kg
PAK, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	0,000001015	kg
Benzol (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	7,45952E-07	kg
Blei II (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	6,76232E-07	kg
Pentan (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	6,39388E-07	kg
Chrom III (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	3,89385E-07	kg
Ethan (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	3,19694E-07	kg
Kupferion (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	2,75166E-07	kg
Nickel II (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,1422E-07	kg
Cadmium II (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,12922E-07	kg
Toluol (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,06565E-07	kg
Quecksilber II (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	6,87914E-08	kg
Arsenion (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,29795E-09	kg
Selen IV (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	1,29795E-09	kg
Chrom VI (Emissionen in die Luft, unspezifiziert)	7,78771E-10	kg
Wandverkleidung, 1 Produktionslos (=5 Sätze à 4 Stück)	1	Stk
Einwegpalette, Abfall	1	Stk