

# **Lebenszyklusanalyse der Strom- und Wärmeerzeugung einer Holzvergasungsanlage inklusive Nahwärmenetz**

Am Beispiel des Schwebefestbettvergasers des Energiewerk Ilg,  
Dornbirn

Masterarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Master of Science in Engineering**

Fachhochschule Vorarlberg  
Energietechnik und Energiewirtschaft

Betreut von  
DI Babette Hebenstreit

Vorgelegt von  
Elena Käßler, B.Sc.

Dornbirn, 28. August 2017

## Kurzreferat

Die Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie führt zum Ausstoß von Emissionen und dem Verbrauch von Ressourcen sowie fossilen Energieträgern und ist folglich mit negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt verbunden. Die Höhe dieser Umweltwirkungen hängt nicht nur vom Einsatz des Energieträgers ab, sondern auch von der Technologie der Strom- und Wärmeherzeugung. In der vorliegenden Arbeit werden Umweltwirkungen einer Holzvergasungsanlage in Österreich (Dornbirn) untersucht, welche die spezielle Technologie der Schwebefestbettvergasung darstellt. Dabei wird für die Erstellung einer Ökobilanz die ISO Norm 14040/44 angewandt, nach welcher der gesamte Lebenszyklus der Anlage, von der Konstruktion über den Betrieb bis hin zum Abriss aller benötigten Anlagenkomponenten, betrachtet wird. Im Gegensatz zu den meisten Ökobilanzen industrieller KWK-Anlagen ist auch der Bau und Betrieb des Nahwärmenetzes in den Systemgrenzen enthalten, sowie die gesamte Kette der Brennstoffbereitstellung. Zur Quantifizierung der Energie- und Stoffströme werden detaillierte Sachbilanzen erstellt, welche In- und Outputgrößen darstellen. Zur Modellierung der Ökobilanz werden die Daten in der Software SimaPro ausgewertet. Der Nutzen der untersuchten Anlage ist eine Kilowattstunde Energie in Form von Wärme und Strom. Es werden sieben Wirkungskategorien betrachtet: Klimaänderung, Versauerung, Eutrophierung, Bildung von Photooxidantien, Feinstaub, Metall-Verbrauch und Erschöpfung fossiler Ressourcen. Die Kategorie Klimaänderung, welche sich in CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen ausdrückt, demonstriert eine Besonderheit der untersuchten Anlage: Unter Berücksichtigung der zusätzlich im Vergasungsprozess anfallenden Holzkohle, weist die untersuchte Anlage mit -36,8 g CO<sub>2</sub>-Äqu./kWh eine negative CO<sub>2</sub>-Bilanz auf. Hintergrund dabei ist, dass die Holzkohle nicht weiter verbrannt wird und damit als CO<sub>2</sub>-Senke wirkt. Ohne Berücksichtigung der Holzkohle emittiert die untersuchte Anlage 28,1 g CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen pro kWh. Dabei hat die Betriebsphase mit 47 % Anteil die größten Auswirkungen der Kategorie Klimaänderung. Hier fällt vor allem der energieintensive Umschlag der Hackschnitzel ins Gewicht. Mit nur 4,4 % der CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen verursacht der Bau des Nahwärmenetzes nur geringe Umweltwirkungen, was u.a. auch auf dessen lange Nutzungszeit von 40 Jahren zurückzuführen ist. Eine Variation der Inputs wird in verschiedenen Sensitivitätsanalysen abgebildet. Dabei kann u.a. festgestellt werden, dass die untersuchte Anlage in einem europäischen Durchschnitts-Szenario bis zu 156 % höhere Umweltwirkungen der Kategorie Klimaänderung verursachen würde. Dies zeigt den bereits effizienten und umweltschonenden Betrieb der untersuchten Anlage in Dornbirn.

## Abstract

The generation of electrical and thermal energy leads to emission of hazardous substances as well as to the consumption of resources and fossil fuels and is therefore associated with negative effects on human beings and the environment. The level of these environmental impacts depends not only on the energy sources, but also on the technology of electricity and heat generation. The present study investigates the environmental impacts of a wood gasification plant in Dornbirn, Austria, which is operated as a special type of fixed bed gasification. The ISO standard 14040/44 is used to draw up the life cycle assessment which considers the entire lifecycle of the plant, from the construction through the operation to the demolition of all required plant components. In contrast to most of the published life cycle assessments of industrial cogeneration plants, the construction and operation of the local heating network is included in the system boundaries as well as the entire supply chain of the wood. To quantify the energy and material flows, detailed data is prepared to give all In- and Outputs. For the modeling of the life cycle assessment, the data is evaluated in the SimaPro software. The functional unit of the plant is one kilowatt hour of energy as heat and electricity. Seven relevant categories are analyzed: Climate change, terrestrial acidification, marine eutrophication, photochemical oxidant formation, particulate matter formation, metal depletion and fossil depletion. The category climate change is expressed in terms of CO<sub>2</sub>-equivalent emissions and demonstrates a special feature of the plant: taking into account the additional biochar produced during the gasification process, the plant has a negative carbon footprint of -36.8 g CO<sub>2</sub> eq/kWh. The reason therefore is that the biochar is not further burnt and thus acts as a CO<sub>2</sub> sink. Excluding the biochar, the plant emits 28.1 g of CO<sub>2</sub> equ. emissions per kWh. A share of 47 % of the greenhouse gas emissions is caused by the operation phase and has the greatest impact of the category climate change. The energy-intensive turnover of wood chips is the main driver in that category and holds a share of 27 % of the total emissions. With 4.4 % of CO<sub>2</sub> equ. emissions, the construction of the local heating network causes only minor environmental impacts. Its long lifetime of 40 years is one reason for the low impacts. A variation of the inputs is shown in different sensitivity analyzes. A comparison of the investigated site determines that the plant would cause up to 156 % higher environmental impacts in the category climate change in a European average scenario. This shows the already efficient and environmentally friendly operation of the examined plant in Dornbirn.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>X</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen – Methode der Ökobilanzierung</b>	<b>3</b>
<b>3. Erstellung der Ökobilanz der untersuchten Anlage</b>	<b>8</b>
3.1 Anlagenbeschreibung	8
3.2 Bisherige Ökobilanzen zu Vergasungsverfahren	14
3.3 Angewandte Methodik	17
3.4 Sachbilanzdaten – Sammlung und Aufbereitung	19
3.4.1 Konstruktion	20
3.4.1.1 Bau Hauptgebäude	21
3.4.1.2 Bau Lagerhalle	24
3.4.1.3 Bau Vergaser	26
3.4.1.4 Bau BHKW	28
3.4.1.5 Bau Nahwärmenetz	30
3.4.1.6 Zusammenführung Konstruktion	34
3.4.2 Brennstoffbereitstellung	35
3.4.3 Betrieb der Vergasungsanlage	41
3.4.4 Zusammenführung der Phasen	47
<b>4. Potentielle Umweltwirkungen der untersuchten Anlage</b>	<b>48</b>
4.1 Methode der Wirkungsabschätzung	48
4.2 Wirkungsabschätzung der untersuchten Anlage	50
4.2.1 Konstruktion	50
4.2.2 Brennstoffbereitstellung	52
4.2.3 Betrieb der Vergasungsanlage	54
4.2.4 Zusammenfassung der gesamten Vergasungsanlage	57
4.2.5 Kumulierter Energieaufwand (KEA), nicht-erneuerbar	59

4.3	Sensitivitätsanalysen	60
4.4	Einordnung und Vergleich mit bisherigen Arbeiten	69
4.5	Identifikation signifikanter Parameter	73
4.6	Einschränkungen	74
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>76</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>
	<b>Anhang</b>	<b>82</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>0</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorarlberg 2014 - Inländische Erzeugung von Erneuerbaren Energien.....	1
Abbildung 2: Wirkungskategorien, -Indikatoren und Zuordnung zu Wirkungsendpunkten..	5
Abbildung 3: Schema Energieerzeugungsanlagen des Energiewerk Ilg, Stand 2016 .....	8
Abbildung 4: Aufteilung, der ins Netz eingespeisten Wärmemengen der Anlagen am Standort Hatlerdorf im Jahr 2015.....	9
Abbildung 5: Ablauf des Vergasungsprozesses der untersuchten Anlage von SynCraft..	10
Abbildung 6: Energiefluss-Diagramm der untersuchten Anlage in der Betriebsphase im Jahr 2016 .....	12
Abbildung 7: Überblick der Systemgrenzen und funktionellen Einheiten der untersuchten Anlage inklusive Konstruktion, Betrieb und Abriss .....	18
Abbildung 8: Methodik Datensammlung – Allgemeiner Ablauf.....	19
Abbildung 9: Aufstellungsplan Gebäude für Gesamtanlage am Standort Hatlerdorf (SynCraft 2016) .....	21
Abbildung 10: Bau Lagerhalle – Archivfoto.....	24
Abbildung 11 Aufbau isoplus-Einzelrohr, diskontinuierliche Fertigung - Mediumrohr nahtlos.....	31
Abbildung 12: Übersicht Prozesse Brennstoffbereitstellung, relevante In- und Outputs...	36
Abbildung 13: Übersicht Prozesse Betrieb der Anlage, relevante In- und Outputs.....	41
Abbildung 14: Zusammenführung Konstruktion, Brennstoffbereitstellung und Betrieb - Eingaben in SimaPro.....	47
Abbildung 15: Wirkungsabschätzung Konstruktion: Prozentuelle Anteile Anlagenkomponenten bezogen auf ein Jahr.....	50
Abbildung 16: Wirkungsabschätzung Brennstoffbereitstellung: Prozentuelle Anteile der Ernteprozesse pro 1 kg HS W40 .....	53
Abbildung 17: Wirkungsabschätzung Betrieb, ohne CO <sub>2</sub> -Bindung: Prozentuelle Anteile der Betriebsprozesse pro kWh <sub>fE</sub> .....	54
Abbildung 18: Wirkungsabschätzung Betrieb, mit CO <sub>2</sub> -Bindung: Prozentuelle Anteile der Betriebsprozesse pro kWh <sub>fE</sub> .....	55
Abbildung 19: Wirkungsabschätzung gesamte Anlage, ohne CO <sub>2</sub> -Bindung: Prozentuelle Anteile der Hauptprozesse pro kWh <sub>fE</sub> .....	57
Abbildung 20: Wirkungsabschätzung gesamte Anlage, mit CO <sub>2</sub> -Bindung: Prozentuelle Anteile der Hauptprozesse pro kWh <sub>fE</sub> .....	58

Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand: Prozentuelle Anteile Phasen Betrieb, Brennstoffbereitstellung und Konstruktion .....	59
Abbildung 22: Sensitivitätsanalysen: Gegenüberstellung der CO <sub>2</sub> -Äquivalent Emissionen der Kategorie Klimaänderung .....	61
Abbildung 23: Vergleich der Wirkungsabschätzungsmethoden ReCiPe und ILCD 2011, Berechnung der CO <sub>2</sub> -Äqu. Emissionen bei Einsatz von Biogas und Erdgas .....	64
Abbildung 24: Idealisierter Zusammenhang zwischen CO- und C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> -Emissionen (a Kaminofen geschlossen, b Stückholzkessel, c Unterschubfeuerung).....	67
Abbildung 25: CO <sub>2</sub> -Äquivalent Emissionen in g/kWh ohne Berücksichtigung Nahwärmenetz - Vergleich ausgewählter Wärmeerzeugungsanlagen .....	70
Abbildung 26: CO <sub>2</sub> -Äquivalent Emissionen in g/kWh mit Berücksichtigung Nahwärmenetz – Vergleich ausgewählter Nahwärmesysteme .....	72
Abbildung 27: Anhang Wirkungsabschätzung Konstruktion: Prozentuelle Anteile Anlagenkomponenten ohne Berücksichtigung Nutzungszeit.....	82
Abbildung 28: Anhang Wirkungsabschätzung Hauptgebäude: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse .....	83
Abbildung 29: Anhang Wirkungsabschätzung Lagerhalle: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse .....	84
Abbildung 30: Anhang Wirkungsabschätzung Vergaser: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse .....	85
Abbildung 31: Anhang Wirkungsabschätzung BHKW: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse .....	86
Abbildung 32: Anhang Wirkungsabschätzung Nahwärmenetz: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse .....	88

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung LCA Datenbanken.....	6
Tabelle 2: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau Hauptgebäude .....	22
Tabelle 3: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau Lagerhalle.....	25
Tabelle 4: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau Vergaser.....	27
Tabelle 5: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau BHKW.....	28
Tabelle 6: Leitungslängen Netz entsprechend der Nennweiten in DN, Stand 2016 .....	30
Tabelle 7: Übersicht aller Materialien für Bau und Instandhaltung Nahwärmenetz, PUR- Schaum, PEHD-Mantel und Stahlrohr, Angaben gesamt und pro Meter ...	32
Tabelle 8: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau Nahwärmenetz für 1 m Netzlänge inkl. Wartungsarbeiten .....	32
Tabelle 9: Sachbilanzdaten Konstruktion - Zusammenführung anhand Nutzungszeiten..	34
Tabelle 10: Zusammenfassung Heizwert, Volumen, Masse, Energieinhalt in Abhängigkeit vom Wassergehalt, 2016.....	35
Tabelle 11: Sachbilanzdaten Betrieb - Brennstoffbereitstellung.....	37
Tabelle 12: Betrieb - Ernteverfahren Stammdaten, Einsatzzeit und Spritverbrauch .....	39
Tabelle 13: Betrieb - Hackerprozess, Stammdaten, Einsatzzeit und Spritverbrauch des Referenzverfahrens (RZ) und der untersuchten Anlage (AT).....	40
Tabelle 14: Betrieb - Anwendung Faktoren für Mehraufwand der untersuchten Anlage...	40
Tabelle 15: Sachbilanzdaten Betrieb – Betriebsmittel und Emissionen pro kWh <sub>FE</sub> .....	42
Tabelle 16: Betrieb - Stammdaten Auf- und Abladen Hackschnitzel am Lagerplatz.....	43
Tabelle 17: Emissionen in die Luft, Konzentration in mg/Nm <sup>3</sup> und mg/kWh, Messung durch MCI 2017.....	44
Tabelle 18: Verbrennungsgleichung Holz - Massen und Stoffmengen.....	45
Tabelle 19: Betrieb - Daten Holzkohle und Asche für Ermittlung Kohlenstoffdioxid- Bindung, 2016 .....	46
Tabelle 20: Auswahl europäischer Methoden der Wirkungsabschätzung in SimaPro .....	48
Tabelle 21: ReCiPe Midpoint (h) – Auszug schädlicher Substanzen, Wirkungskategorien und Einheiten .....	49
Tabelle 22: Wirkungsabschätzung Konstruktion: Absolutwerte Anlagenkomponenten bezogen auf ein Jahr .....	50
Tabelle 23: Wirkungsabschätzung Konstruktion: Änderungen der Auswirkungen bei unberücksichtigter Nutzungszeit.....	51



Tabelle 24: Wirkungsabschätzung Brennstoffbereitstellung: Absolutwerte der Ernteprozesse für 1 kg HS W40 .....	53
Tabelle 25: Wirkungsabschätzung Betrieb: Absolutwerte der Betriebsprozesse mit und ohne CO <sub>2</sub> -Bindung.....	55
Tabelle 26: Wirkungsabschätzung gesamte Anlage mit und ohne CO <sub>2</sub> -Bindung: Absolutwerte der Hauptprozesse pro kWh <sub>FE</sub> .....	58
Tabelle 27: Sensitivitätsanalysen: Abweichungen zum Basisszenario 1 .....	62
Tabelle 28: Vergleich Midpoint-Wirkungsabschätzungsmethoden ReCiPe mit IMPACT 2002+ und ILCD 2011 .....	63
Tabelle 29: Variation der Netzverluste mit 5 % und 15 %, Vergleich mit Basisszenario 1	65
Tabelle 30: Hinzufügen Abriss und Rückbau des Nahwärmenetzes, Vergleich mit Basisszenario .....	66
Tabelle 31: Emissionen ins Wasser: Ammonium, Nitrat, Sulfat.....	68
Tabelle 32: Anhang Wirkungsabschätzung Konstruktion: Absolutwerte Anlagenkomponenten ohne Berücksichtigung Nutzungszeit.....	82
Tabelle 33: Anhang Wirkungsabschätzung Hauptgebäude: Absolutwerte der Unterprozesse .....	83
Tabelle 34: Anhang Wirkungsabschätzung Lagerhalle: Absolutwerte der Unterprozesse	84
Tabelle 35: Anhang Wirkungsabschätzung Vergaser: Absolutwerte der Unterprozesse..	85
Tabelle 36: Anhang Wirkungsabschätzung BHKW: Absolutwerte der Unterprozesse.....	86
Tabelle 37: Anhang Wirkungsabschätzung Nahwärmenetz: Absolutwerte der Unterprozesse .....	88
Tabelle 38: Anhang Sensitivitätsanalysen: Absolutwerte EU-Standardszenario .....	89
Tabelle 39: Anhang Sensitivitätsanalysen: Gesamtdarstellung aller Wirkungskategorien in der ReCiPe Midpoint (h) Methode .....	89
Tabelle 40: Anhang Sensitivitätsanalysen: Gesamtdarstellung aller Wirkungskategorien in der IMPACT 2002+ Methode .....	89
Tabelle 41: Anhang Sensitivitätsanalysen: Gesamtdarstellung aller Wirkungskategorien in der ILCD 2011 Methode .....	90
Tabelle 42: Anhang Sensitivitätsanalysen: Absolutwerte der Gesamtanlage inklusive Abriss und Entsorgung Nahwärmenetz.....	90
Tabelle 43: Anhang Literaturvergleich: Absolutwerte der Gesamtanlage ohne Netzbau und Netzverluste bezogen auf Basisszenario 1 (ohne CO <sub>2</sub> -Bindung) .....	91
Tabelle 44: Anhang Literaturvergleich: Absolutwerte der Gesamtanlage ohne Netzbau und Netzverluste bezogen auf Basisszenario 2 (mit CO <sub>2</sub> -Bindung) .....	91

## Abkürzungsverzeichnis

Äqu.	Äquivalent
BHKW	Blockheizkraftwerk
BM-Kessel	Biomassekessel
DB	Datenbank
EE	Erneuerbare Energien
fE	Funktionelle Einheit
fm	Festmeter
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
H <sub>o</sub>	Brennwert
H <sub>u</sub>	Heizwert
HW	Heizwerk
HS	Hackschnitzel
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KUP	Kurzumtriebsplantage
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Lebenszyklusanalyse (von engl. Life cycle assessment)
MCI	Management Center Innsbruck
MJ	Mega Joule
OeMAG	Abwicklungsstelle für Ökostrom Österreich
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PD	Primärdaten
PEHD	Polyethylen hoher Dichte (Hartplastik)
PUR	Polyurethane (Dämmschaum)
PV	Photovoltaik
RGK	Rauchgaskondensation
SD	Sekundärdaten
SNG	Synthetic Natural Gas
srm	Schüttraummeter
THG	Treibhausgasemissionen
tkm	Tonnenkilometer
TM	Trockenmasse
VOC	Flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen (Volatile organic compounds)
W	Wassergehalt

# 1. Einleitung

Energie aus Biomasse ist in Österreich die bedeutendste erneuerbare Energiequelle und deckte im Jahr 2013 57,7 % des Bruttoinlandsverbrauchs aus erneuerbaren Energien. Dabei spielt vor allem die Nutzung von Hackschnitzeln (HS) und Sägenebenprodukte zur Wärmeerzeugung in Heizkraftwerken und Fernwärmanlagen eine große Rolle (Österreichischer Biomasse-Verband 2015). Im Wärme-, Strom- sowie Verkehrssektor ist das Potential der Biomassennutzung groß. Durch vielseitige Einsatzmöglichkeiten als fester, gasförmiger oder flüssiger Brennstoff wird die Biomasse auch zukünftig eine wichtige Rolle in der Deckung der Energienachfrage spielen (Kaltschmitt et al. 2016). Auch im Hinblick auf die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen und weltweiter Klimaschutzbestrebungen spielen biogene Energieträger eine große Rolle. Die österreichische Energiepolitik erklärt die Abhängigkeit von Rohstoffimporten, die Verknappung und Preissteigerung fossiler Energieträger sowie die Senkung schädlicher Emissionen zu einem zentralen Thema. Um den gesetzten Zielen begegnen zu können, müssen weltweit ein Drittel der Ölreserven, die Hälfte der Gasreserven und über 80 % der Kohlereserven ungenutzt bleiben (Klima- und Energiefonds 2015).

Das Land Vorarlberg hat 2009 einen Fahrplan für eine zukunftsfähige Energieversorgung entwickelt - die sogenannte Energieautonomie 2050. Das Ziel, den Energieverbrauch bis 2050 bilanziell vollständig aus Erneuerbaren Energien (EE) zu decken, bedarf nicht nur einem starken Zuwachs der EE oder Einsparungen beim Endenergieverbrauch. Es gilt ebenso hocheffiziente und gleichzeitig nachhaltige Anlagen und Technologien für die Erzeugung von Strom, Wärme und Kraftstoffen auszubauen und zu entwickeln. Dabei bietet in Österreich, speziell in Vorarlberg, geografisch bedingt nicht nur die Wasserkraft hohe Potentiale. Vorarlberg deckte im Jahr 2014 über ein Drittel (36 %) der EE aus Biomasse (Brennholz, biogene Brenn- und Treibstoffe und Fernwärme aus Heizwerken (HW) und Kraftwärmekopplungsanlagen (KWK)) (Statistik Austria 2014).

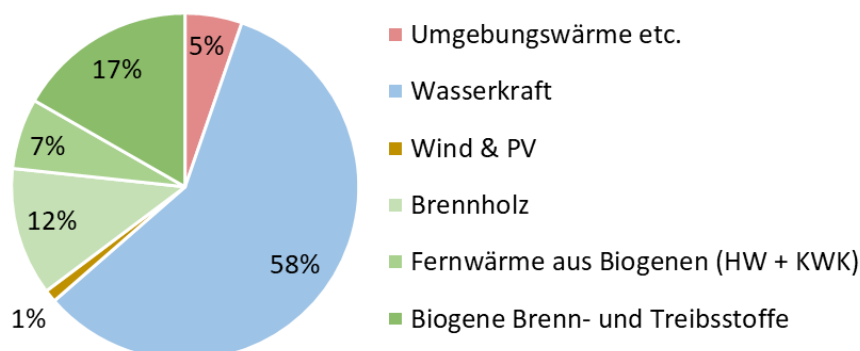


Abbildung 1: Vorarlberg 2014 - Inländische Erzeugung von Erneuerbaren Energien

Quelle: Eigene Darstellung nach (Statistik Austria 2014)

Trotz des hohen Biomasse-Anteils an den EE wird das Biomasse-Potential in Österreich nicht voll ausgeschöpft. So verbleibt ein stetig wachsender Anteil an Totholz ungenutzt in den Wäldern Österreichs, welches dort natürlichen Abbauprozessen ausgesetzt wird, anstatt in Heiz(kraft)werken verbrannt zu werden. Der Totholzanteil hat sich seit der Inventurperiode 1992/96 fast verdoppelt, was die Problematik der Waldüberalterung aufgrund mangelnder Bewirtschaftung belegt (Prem 2015).

In dieser Arbeit wird die nachhaltige Waldbewirtschaftung, die Erzeugung von Strom und Wärme aus Holz sowie die Verteilung der Wärme über ein Nahwärmenetz im Hinblick auf ökologische Aspekte betrachtet. Neben der im Allgemeinen bekannteren Analyse von Treibhausgasen, welche in Form von CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Äqu.) Emissionen die Klimaänderung beeinflussen, werden weitere Auswirkungen auf die Umwelt betrachtet. Darunter fallen beispielsweise die Eutrophierung von Gewässern durch überhöhte Stickstoffemissionen oder das Freisetzen von Feinstaub bei der thermo-chemischen Umsetzung von Brennstoffen.

Bei der untersuchten Anlage handelt es sich um eine Holzvergasungsanlage zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung des Energiewerk Ilg in Dornbirn. Die Anlage ist seit 2015 Teil eines größeren Anlagenparks, bestehend aus Biomasseheizwerken und KWK-Anlagen. Die Wärme wird über ein selbst betriebenes Nahwärmenetz an die Endverbraucher verteilt. Neben den beiden Outputs Strom und Wärme liefert die Holzvergasungsanlage einen Zusatznutzen in Form von Holzkohle (unverbrannter Kohlenstoff). Diese kann als Bodendünger sowie als Tierfutterergänzung weiterverwendet werden. Da die Holzkohle nicht weiter verbrannt wird, kann der gebundene Kohlenstoffanteil als sogenannte CO<sub>2</sub>-Senke betrachtet werden. Unter diesem Aspekt erscheint die untersuchte Anlage aus ökologischer Sicht besonders interessant.

Die Arbeit gliedert sich in einen kurzen Grundlagenteil, welcher die angewandte Methode der Ökobilanzierung sowie eine Beschreibung der untersuchten Anlage ausführt. Daraufhin wird eine Sachbilanz erstellt, welche alle Prozesse in In- und Outputgrößen aufschlüsselt. Diese werden in der Wirkungsabschätzung ausgewertet, um die Komponenten oder Prozesse mit den größten Auswirkungen in Erfahrung zu bringen. Anhand verschiedener Sensitivitätsanalysen wird die Anlage in einzelnen Aspekten variiert, um Unsicherheiten zu untersuchen oder Vergleiche der Anlage zu ermöglichen. Weiterhin erfolgt eine Einordnung der untersuchten Anlage in bestehende Literaturergebnisse.

## 2. Grundlagen – Methode der Ökobilanzierung

Eine Ökobilanz dient dazu, die relevanten Umweltwirkungen eines Produkts während seines Lebenswegs systematisch zu untersuchen und zu bewerten.

Nun drängen sich die Fragen auf, welches die *relevanten* Umweltauswirkungen sind und was der *Lebensweg* im Detail umfasst? Tatsächlich kann eine Lebenszyklusanalyse (LCA) je nach Definition des Lebenswegs sowie nach Umfang der (nicht) berücksichtigten Umweltwirkungen völlig unterschiedliche Ergebnisse hervorrufen. Dies führt dazu, dass zwei LCA, die nicht exakt der gleichen Methode und Vorgehensweise entsprechen, zwar miteinander verglichen werden können, eine kritische Hinterfragung der Vergleichbarkeit jedoch unbedingt nötig ist.

An dieser Stelle wird die Vorgehensweise nach der international genormten EN ISO 14040 und EN ISO 14044 Methodik beschrieben (ISO 2006), da diese die Basis für die eigens erstellte Ökobilanz ist. Bei dieser Methodik wird der gesamte Lebensweg “von der Wiege bis zur Bahre” betrachtet. Dies schließt die Rohstoffgewinnung und -erzeugung, die Energieerzeugung, Materialherstellung und Anwendung bis hin zur Abfallentsorgung und Beseitigung der Anlagen mit ein (vgl. Kaltschmitt und Streicher 2009).

Um die Ökobilanz laut EN ISO 14040/14044 methodentreu zu erstellen, werden nachfolgend beschriebene Schritte durchlaufen:

Die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens dient der ersten Einordnung der Bilanzierung. Was wird untersucht, warum und für wen wird die LCA durchgeführt und ist sie als vergleichende Aussage vorgesehen? Weiterhin muss der Rahmen der Untersuchung eindeutig beschrieben werden. Um den Aufwand der Bilanzierung zu begrenzen, müssen hierfür sinnvolle Systemgrenzen festgelegt werden. Diese führen dazu, dass weniger relevante vor- und nachgelagerte Prozesse unberücksichtigt bleiben (vgl. Kaltschmitt und Streicher 2009). Weiterhin wird die funktionelle Einheit (fE) definiert, welche den eigentlichen Nutzen des analysierten Systems darstellt und eine Ökobilanz vergleichbar macht. Haben zwei Systeme einen vergleichbaren oder den gleichen Nutzen ist eine Gegenüberstellung beider sinnvoll. Bei einer Analyse von Getränkeverpackungen kann die funktionelle Einheit bspw. 1000 Liter Flüssigkeit sein, die einen Vergleich verschiedener Herstellungsverfahren ermöglicht (Klöpffer und Grahl 2009).

Die Sachbilanz ist eine Stoff- und Energieanalyse aller In- und Outputgrößen, die in einen Lebenszyklus einfließen. Um alle relevanten In- und Outputs zu identifizieren, hilft eine Prozesskettenanalyse, welche den Lebenszyklus in seinem gesamten Umfeld innerhalb der anfangs definierten Systemgrenzen darstellt. Jedem Prozessschritt können so bspw.

Einsatzstoffe und Emissionen zugeordnet werden. Ein wichtiger Bestandteil der Sachbilanz ist der Umgang mit Neben- und Koppelprodukten, die während der Herstellung des eigentlichen Produktes entstehen. Die Aufteilung der entstandenen Umweltwirkungen auf das eigentliche Produkt sowie die anfallenden Nebenprodukte wird Allokation genannt. Diese kann nach Masse, Energie oder Geldwert eines Produktes erfolgen. Weitere Möglichkeiten sind die Allokation nach Molmasse oder Brennwert (vgl. Klöpffer und Grahl 2009). Die Thematik der Allokation ist ein bekanntes Problemfeld jeder Ökobilanz. Die ISO 14040/44 empfiehlt Allokation zu vermeiden, indem bspw. Systemgrenzen erweitert werden und das Koppelprodukt in seiner Gesamtheit in die Untersuchung miteinfließt.

Die Wirkungsabschätzung stellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Daten der Sachbilanz und den potentiellen Umweltwirkungen dar. Die In- und Outputgrößen werden dabei auf ihre Umweltwirkungen untersucht. So entstehen bspw. bei der Verbrennung von Gas Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxid, welche Output-bezogenen Wirkungskategorien zugeordnet werden. Die Auswirkungen des freiwerdenden Kohlenmonoxids durch unvollständige Verbrennung bspw., wirken sich auf die Treibhausgas-Belastung (Klimaänderung), den Feinstaubanteil sowie die Bildung von Photooxidantien (Sommersmog) aus. Die sogenannte Midpoint-Methode der Ökobilanzierung stellt die Auswirkungen eines Produktes auf verschiedene Wirkungskategorien dar. Dabei wirkt meist ein Sachbilanzergebnis (Emission) auf mehrere Wirkungskategorien. Die Sachbilanzergebnisse können zusätzlich auf die drei sog. Wirkungsendpunkte (auch Schutzbereiche genannt) übertragen werden. Diese Methode ist die Endpoint-Methode. Die Midpoint- und Endpoint-Methode stellen die Auswirkungen der Sachbilanzergebnisse im Hinblick auf unterschiedliche Kategorien oder Bereiche dar. Dabei beziehen sich beide Methoden auf Wirkungsindikatoren, welche als Umrechnung der Sachbilanzergebnisse zu deren Schadenspotentiale verstanden werden kann. *Abbildung 2* stellt die Zusammenhänge der Sachbilanzdaten, deren Zuordnung zu Wirkungskategorien und Indikatoren auf der Midpoint- und Endpoint-Ebene dar. Dabei ist anzumerken, dass die Auswahl der untersuchten Wirkungskategorien und Endpunkte nicht vorgeschrieben ist und eine eigene sinnvolle Auswahl getroffen werden sollte.

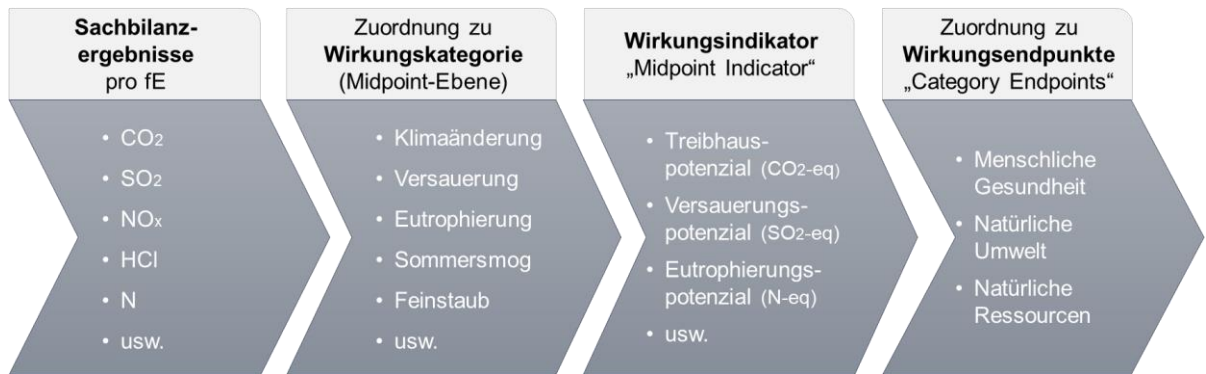


Abbildung 2: Wirkungskategorien, -Indikatoren und Zuordnung zu Wirkungsendpunkten

Quelle: Eigene Darstellung nach (Biemann 2015; Klöpffer und Grahl 2009)

Die entscheidende Komponente jeder LCA ist die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse. So kann beispielsweise der für die Klimaänderung schadhafteste Teilprozess identifiziert werden oder generell Prozesse mit kritischen Auswirkungen erkannt werden. Prinzipiell kann zwischen einem internen Prozess-Vergleich und der Gegenüberstellung zweier untersuchter Anlagen der gleichen funktionellen Einheit unterschieden werden. Letzteres stellt eine vergleichende Aussage dar, mit welcher eine Empfehlung verschiedener Varianten mit dem gleichen Nutzen (fE) getroffen werden kann.

Laut ISO 14044 werden die Arbeitsschritte der Auswertung in folgende Unterpunkte gegliedert:

- Identifizierung der signifikanten Parameter,
- Beurteilung,
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen

Nachdem die signifikanten Parameter herausgearbeitet wurden, kann eine Beurteilung dieser stattfinden. Hintergrund dabei ist, die Zuverlässigkeit der Ökobilanz sowie das Vertrauen in die signifikanten Parameter zu stärken (Klöpffer und Grahl 2009). Es muss die Anwendung folgender drei Beurteilungs-Methoden erwogen werden: Vollständigkeitsprüfung, Sensitivitätsprüfung und Konsistenzprüfung.

Die Datenverfügbarkeit und Vollständigkeit ist ein kritisches Thema in der Erstellung einer Ökobilanz. In vielen Studien wird auf die schlechte Datenlage hingewiesen, die vor allem bei vergleichenden Aussagen zu fehlerhaften Ergebnissen führen kann. Die Vollständigkeit der Daten stellt einen Bezug zwischen Sachbilanz und Wirkungsabschätzung dar. Fehlen entscheidende Daten eines Prozesses schlagen sich diese folglich nicht in der

Wirkungsabschätzung nieder. Eine Überprüfung der Prozesse auf deren Inputs, Outputs sowie Nebenprodukte, ist daher entscheidend.

Die Stabilität der Ergebnisse kann mit Sensitivitätsanalysen überprüft werden. Dabei bestehen verschiedene Möglichkeiten, wie bspw. das Adaptieren der Systemgrenzen, Verwendung einer anderen Methode der Wirkungsabschätzung oder die Anpassung der Recycling-Abschnitte (anstatt Wiederverwertung bestimmter Stoffe können diese verbrannt oder final deponiert werden). Es ist ebenfalls sinnvoll, einzelne Prozesse zu variieren, indem Inputs der Sachbilanz ausgetauscht werden. Damit können Vergleichsmöglichkeiten innerhalb derselben Methode und mit der gleichen Vorgehensweise generiert werden und eine bessere Einschätzung der erstellten Ökobilanz geschaffen werden.

Sind Unsicherheiten der eingegebenen Daten spezifiziert und quantifiziert, können diese in Simulationsprogrammen mittels Monte-Carlo Analyse auf deren Konsistenz überprüft werden. Diese Prüfung ist vor allem bei vergleichenden Aussagen interessant, da auf Basis eingegebener Vertrauensintervalle statistisch signifikante Unterschiede deutlich werden (Frischknecht 2013).

Die Berechnung der Sachbilanzergebnisse und Zuordnung zu Wirkungskategorien sollte in jedem Fall über eine Modellierungssoftware abgebildet werden. Diese berücksichtigt entsprechende Zuordnungen und Gewichtungen von In- und Outputs sowie Emissionen und kann u.a. bereits erstellte Vergleichsprozesse aus Datenbanken (DB) bereitstellen. Weiterhin dient sie dazu, einzelne Prozesse zu einem komplexen Gesamtkonstrukt zu verbinden und so eine LCA über die gewünschte Lebenszeit und innerhalb der gesetzten Systemgrenzen zu bilanzieren. In der nachfolgenden *Tabelle 1* werden relevante Datenbanken sowie Modellierungssoftware dargestellt und diese anhand von drei Kriterien kurz gegenübergestellt. Dabei gilt es festzuhalten, welche Daten frei oder über kostenpflichtige Lizenzen verfügbar sind, wie umfangreich und weitreichend die Daten zur Verfügung stehen und ob zusätzlich zu einer DB auch eine Modellierungssoftware bereitgestellt wird.

*Tabelle 1: Gegenüberstellung LCA Datenbanken*

<b>Anbieter</b>	<b>Zugang</b>	<b>Datenverfügbarkeit</b>	<b>Modellierungssoftware</b>
<b>Ecoinvent</b>	Lizenz	Eigene DB	Nein
<b>SimaPro</b>	Lizenz	Ecoinvent; Agri-footprint; ELCD und weitere	Ja



<b>GEMIS</b>	Kostenlos	Eigene DB	Ja
<b>ProBas</b>	Kostenlos	Daten aus Gemis	Nein
<b>ELCD</b>	Kostenlos	Eigene DB	Nein
<b>BioEnergieDat</b>	Kostenlos, teilweise Lizenz	Ecoinvent; GaBi BioEnergieDat, ProBas, NREL, ELCD, NEEDS complete	Ja: openLCA

Das schweizerische Datensystem *ecoinvent* ist weltweit führend in der Bereitstellung von Datensätzen von Sachbilanzen zu Energie, Materialien, Abfallprodukten, landwirtschaftlichen Prozessen, Transporte uvm. (Ecoinvent 2013). Kaltschmitt und Streicher 2009 bspw. verwenden ecoinvent für ihre bereits beschriebene vergleichende LCA. SimaPro ist eine Software, die Daten aus ecoinvent und weiterer Datenbanken verwendet. Die Nutzung von SimaPro ist weitverbreitet und ermöglicht eine flexible Erstellung von Ökobilanzen, in welchen bspw. sehr einfach die Methode der Wirkungsabschätzung geändert und damit Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden können. SimaPro enthält eine Vielzahl bereits erstellter Prozesse aus ecoinvent, welche im Falle fehlender Daten adaptiert werden können.

*ProBas* und *GEMIS* basieren auf dem gleichen Datenstamm. Dabei ist ProBas in seiner Übersichtlichkeit und im Umgang mit den Daten zwar verständlicher als GEMIS, jedoch bietet dieses System keine Möglichkeit der Modellierung von Daten. Mit GEMIS können die gleichen Daten wie in ProBas mithilfe eines Modellierungsprogramms zusammengestellt werden, hierbei ist jedoch zu bemerken, dass die Software in ihrer Übersichtlichkeit stark eingeschränkt ist.

Die *BioEnergieDat*-DB inklusive der Modellierungssoftware openLCA ist aus Gründen der Anwenderfreundlichkeit und Modellierungsmöglichkeit eine gute Alternative zu GEMIS. Die openLCA Software ist gut dokumentiert, viele Fallbeispiele erleichtern die Einarbeitung in das System.

Für die untersuchte Anlage wird SimaPro als Modellierungssoftware verwendet womit u.a. der umfassende Datenstamm von ecoinvent genutzt werden kann und selbst komplexe Variationen der Eingabeparameter einfach durchgeführt werden können.

### 3. Erstellung der Ökobilanz der untersuchten Anlage

#### 3.1 Anlagenbeschreibung

Das Energiewerk Ilg in Dornbirn erzeugt an insgesamt fünf Standorten Wärme für Abnehmer in Dornbirn sowie Strom, der in das öffentliche Netz eingespeist wird. Die Wärme wird größtenteils in Biomassekesseln (BM-Kessel), zur Spitzenlastabdeckung zusätzlich in Öl- und Gaskesseln erzeugt. Strom wird über einen seit 2015 installierten Holzvergaser erzeugt, dessen Produktgas in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) verbrannt wird. Wärme und Strom können somit gekoppelt erzeugt werden. Derzeit in Planung ist ein zweites BHKW, welches im Jahr 2017 am Standort Hatlerdorf zur Stromerzeugung aus Biogas ergänzt wird. Einen vereinfachten Überblick stellt die nachfolgende *Abbildung 3* dar, die die fünf Standorte des Energiewerk Ilg mit den jeweiligen Energieerzeugungsanlagen abbildet. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die gelb hinterlegten Anlagen untersucht sowie das Nahwärmenetz. Weitere untersuchte Anlagenkomponenten, wie Gebäudeteile oder Betriebsprozesse, sind in diesem Überblick nicht dargestellt.

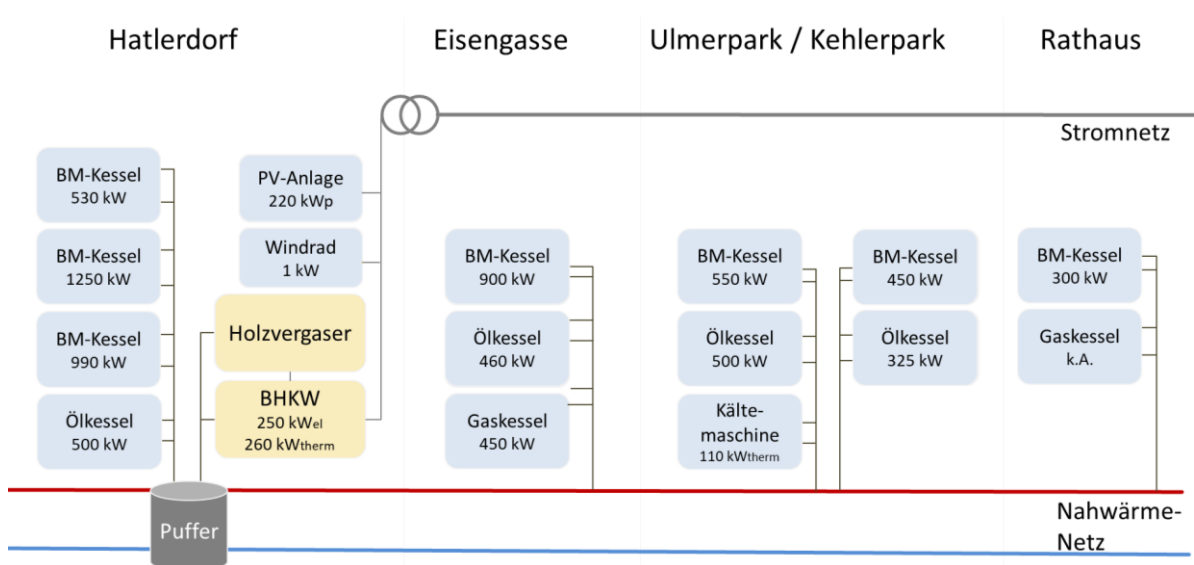


Abbildung 3: Schema Energieerzeugungsanlagen des Energiewerk Ilg, Stand 2016

Im Folgenden werden die Wärmeermengungen der einzelnen Anlagen des Standorts Hatlerdorf gegenübergestellt, da diese alle in das Nahwärmenetz einspeisen. Eine Aufteilung der Wärmemengen ist entscheidend für die spätere Anrechnung des Nahwärmenetzes auf die untersuchte Anlage. Die Errichtung und der Betrieb des Nahwärmenetzes wird der untersuchten Anlage prozentuell zur erzeugten Wärmemenge zugeschrieben. *Abbildung 4* verdeutlicht die prozentuelle Verteilung. 21,5 % werden der

untersuchten Anlage zugeordnet, was einer eingespeisten Wärmemenge von 2.274 MWh im Jahr 2015 entspricht.

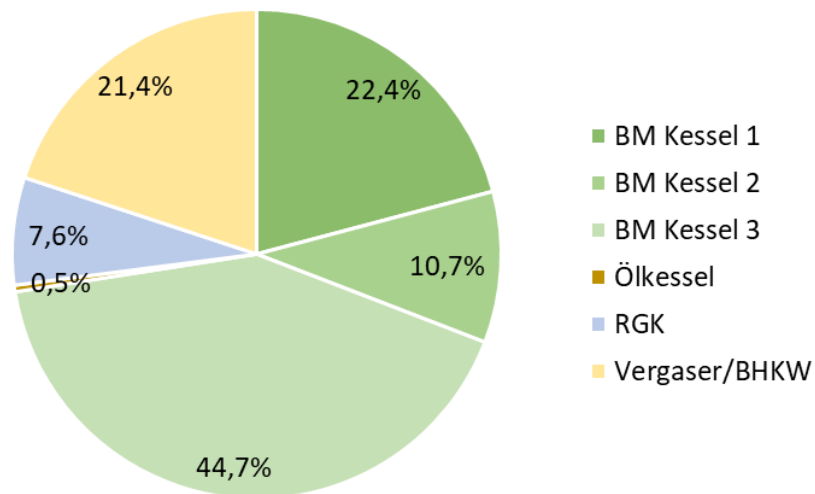


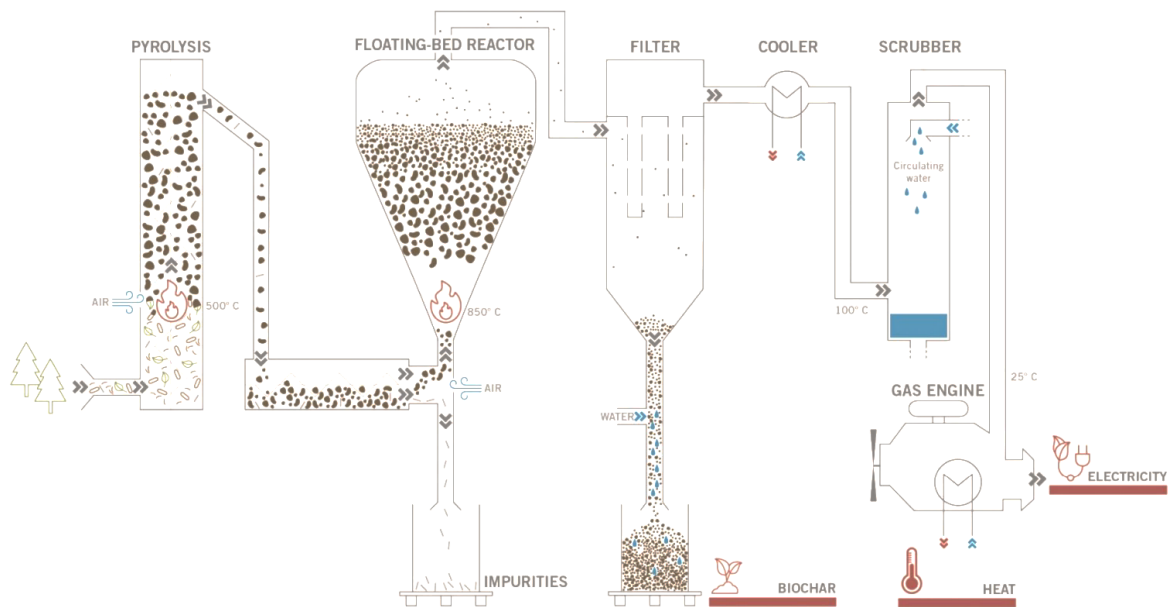
Abbildung 4: Aufteilung, der ins Netz eingespeisten Wärmemengen der Anlagen am Standort Hatlerdorf im Jahr 2015

Die vier weiteren Standorte (Eisengasse, Ulmerpark, Kehlerpark, Rathaus) sind in der Bilanzierung des Nahwärmenetzes nicht berücksichtigt, da diese an ein anderes Nahwärmenetz angeschlossen sind.

Nachfolgend wird die Funktionsweise der untersuchten Vergasungsanlage beschrieben, die Hauptprozesse in der Betriebsphase umrissen sowie eine energetische Bilanzierung der Anlage während des Betriebs dargestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass alle Daten auf das Jahr 2016 bezogen sind.

Bei der untersuchten Anlage handelt es sich um einen sog. Schwebefestbettvergaser der Firma SynCraft aus Tirol sowie um ein Gas BHKW des deutschen Unternehmens 2G. Die Anlage weist eine elektrische Leistung von 250 kWel auf (Stand Juli 2017) (2G Energy AG 2016). Vor dem Einbau eines leistungsstärkeren BHKW Ende des Jahres 2016 wurde mit einem kleineren BHKW mit einer Leistung von 180 kWel gefahren. Die durchschnittliche Leistungsabgabe über das Jahr 2016 ergibt damit 190 kWel. Die untersuchte Anlage weist 7.986 Betriebsstunden im Jahr 2016 auf. Bei dem eingesetzten Holzvergaser handelt es sich grundsätzlich um einen Gleichstrom-Festbettvergaser, der allerdings entgegen der Schwerkraft betrieben wird (Kreutner 2014). Bei der Gleichstrom-Betriebsweise entspricht die Strömungsrichtung des Brennstoffs der des Vergasungsmittels. In gewöhnlichen Anlagen verläuft die Durchströmung des Vergasungsreaktors von oben nach unten (vgl. Kaltschmitt und Streicher 2009, S. 419), bei der Schwebefestbettvergasung nach Syncraft entsprechend gegengesetzt. Eine Verdichtung im unteren Teil des Reaktors ist bei normalen Gleichstrom-Festbettvergasern somit nicht zu vermeiden. Bei der untersuchten

Anlage hingegen bleibt das Koks durchgehend gelockert, da es vom Pyrolysegas von unten kommend durchströmt wird und sich so eine Schwebeschicht aufbaut. Dadurch können auch Fremdkörper und Verschlackungen am Fuß des Reaktors abziehen und keine Schäden in den Anlagenteilen verursachen (SynCraft 2016). *Abbildung 5* zeigt die zweistufige Arbeitsweise des Vergasers entgegen der Schwerkraft.



*Abbildung 5: Ablauf des Vergasungsprozesses der untersuchten Anlage von SynCraft*

Quelle: SynCraft 2016

Der erste Schritt bildet die Pyrolyse ab, bei welcher prinzipiell verschiedene, teilweise sehr komplexe Reaktion ablaufen. Vereinfacht zusammengefasst, wird bei der pyrolytischen Zersetzung von Holz unter Sauerstoffausschluss aus der Zellulose Koks und Pyrolysegas erzeugt (Kaltschmitt et al. 2016). Im zweiten Schritt werden die in der Pyrolyse erzeugten Produkte möglichst vollständig vergast und damit das Produktgas hergestellt. Die Vergasung findet im Schwebebettreaktor statt. Das Produktgas wird über einen Filter gereinigt, welcher nicht umgesetzte Kohlenstoffpartikel aus dem Produktgas abscheidet. Hier wird dem Prozess die Holzkohle entnommen. Das 850 °C heiße Produktgas wird anschließend in einem Wärmetauscher abgekühlt und letztendlich in einem Gaswäscher auf die Anforderungen für die Verbrennung im BHKW gebracht. In diesem kann das Produktgas nun endgültig verbrannt werden, wobei Elektrizität und Wärme erzeugt werden. Der Schwebefestbettvergaser ist auf die Stromerzeugung ausgelegt, die entstehende Wärme als Nebenprodukt wird in das Nahwärmenetz eingespeist.

Die für den Vergasungsprozess notwendigen Temperaturen des Pyrolyse- und Produktgases werden über einen mehrstufigen Wärmerückgewinnungskreislauf

gewährleistet. Ein Teil der abgeführten Wärme wird zur Brennstofftrocknung sowie zur Deckung des Heizwärmebedarfs des Hauptgebäudes verwendet. Die Hackguttrocknung an der Vergasungsanlage ist nötig, um den für die Vergasungsanlage optimalen Wassergehalt von circa 8 % zu erreichen (Ilg 2017). Die eingesetzten Hackschnitzel stammen aus Vorarlberger Wäldern und werden an einen zentralen Lagerplatz, rund zwei Kilometer von der Anlage entfernt, gelagert. An diesem Lagerplatz wird das noch waldfrische Holz gehackt (falls nicht schon direkt bei der Ernte im Wald) und von einem Wassergehalt (W) von 40 % (W40) auf 15 % (W15) getrocknet. Für die Trocknung wird Wärme aus einer nahegelegenen Biogasanlage verwendet. Nach der ersten Trocknungsphase werden die Hackschnitzel zur Vergasungsanlage transportiert und hier in einem Tagesbunker weiter auf 8 % Wassergehalt getrocknet. Für diesen zweiten Trocknungsprozess wird Abwärme aus dem Vergasungs- und Verbrennungsprozess entzogen, welche aufgrund niedriger Temperaturen nicht in das Nahwärmenetz eingespeist werden kann. Für den Betrieb der Anlage haben neben dem Einsatz von Hackschnitzeln als Brennstoff und dessen Lagerung und Trocknung auch der Eigenstrombedarf sowie Hilfsmittel, wie Stützgas und Schmieröl, Bedeutung. Nach erfolgter Vergasung und Verbrennung wird die Wärme über das Nahwärmenetz an Kunden verteilt und Strom in das öffentliche Netz eingespeist. Die anfallende Holzkohle wird gesammelt und von Abnehmern abgeholt und weiterverwertet. Neben den drei bisher beschriebenen Outputs entstehen im Betrieb der Vergasungsanlage ebenso Verluste. Es werden einerseits Wärmeverteilungsverluste über das Nahwärmenetz, Verluste durch das Abfackeln von Produktgas im Störfall des BHKW und sonstige thermische und mechanische Verluste detektiert.

*Abbildung 6* fasst die Energieflüsse für die Betriebsphase der Vergasungsanlage grafisch zusammen. Der Bezugspunkt der energetischen Betrachtung sind die Hackschnitzel W15, welche als Brennstoffeinsatz in den Prozess eingehen. Die entstehenden Outputs werden auf den Energieinhalt der eingesetzten Hackschnitzel bezogen und prozentuell nach diesem aufgeteilt. Nicht dargestellt ist die energetische Betrachtung der Brennstoffbereitstellung sowie die Konstruktion der Anlagenteile. Um die prozentuellen Verteilungen besser nachvollziehen zu können, werden die im Energiefluss-Diagramm gezeigten Prozesse im Anschluss kurz erläutert.

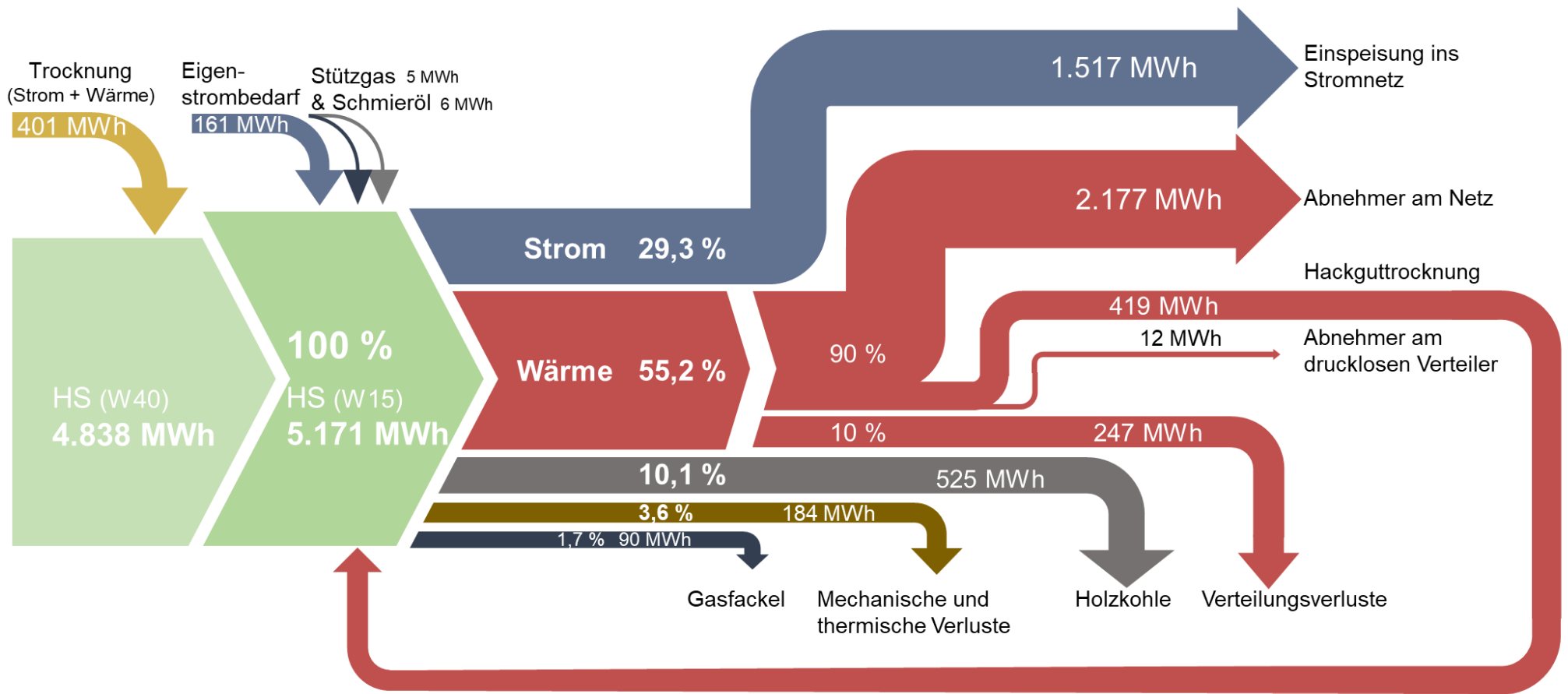


Abbildung 6: Energiefluss-Diagramm der untersuchten Anlage in der Betriebsphase im Jahr 2016

2016 werden kumuliert 1.670 t waldfrische HS (W40) eingesetzt, für deren erste Trocknung rund 400 MWh Wärme und Strom benötigt werden. Mit der Trocknung steigt der Energieinhalt der HS von 4.838 MWh auf 5.171 MWh, gleichzeitig verringert sich die Masse der HS durch die Verdampfung des Wassers auf 1.179 t (Details zur Brennstoffbereitstellung befinden sich in *Kapitel 3.4.2*). Die getrockneten HS W15 stellen damit den Brennstoffinput für den Betrieb der Vergasungsanlage dar. Die weitere Trocknung auf W8 findet während des Betriebsprozesses statt und wird deshalb nicht als Bezugswert für die energetischen Bewertungen verwendet.

Laut der Abwicklungsstelle für Ökostrom Österreich (OeMAG) werden insgesamt 1.517 MWh in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Der Eigenstrombedarf der Anlage liegt bei 161 MWh. Diese Menge wird auf Mittelspannungsebene aus dem öffentlichen Netz bezogen und ist als österreichische Wasserkraft deklariert.

Die entstehende Wärme wird über die Anlagenkomponenten Gaswäscher, Gaskühler, Gemischkühler, Rohgaskühler und Abgaswärmetauscher ausgekoppelt. Die an diesen Komponenten angebrachten Wärmemengenzähler nehmen insgesamt 2.855 MWh Wärme auf. Durch Abnehmer am Nahwärmenetz werden 2.177 MWh abgenommen, sonstige Abnehmern am drucklosen Verteiler (Wärmeabnehmer vor den Netzpumpen, sind die Werkstatt und das Betriebsgebäude) werden 12 MWh zugerechnet. Für die Hackguttrocknung im Tagesbunker werden der untersuchten Anlage 419 MWh Wärme entnommen. Weiterhin werden Wärmeverteilungsverluste in Höhe von 10 % erfasst, welche 247 MWh ausmachen. Nach Abzug der Hackguttrocknung und Verteilungsverluste entsteht ein gesamter Wärmeoutput in Höhe von 2.189 MWh. Der Gesamtoutput der Anlage beträgt damit 3.706 MWh Energie in Form von nutzbarer Wärme und Strom.

Weiterhin entstehen 424 m<sup>3</sup> Holzkohle mit einem Energieinhalt von 525 MWh. Die gleichzeitig anfallende Asche enthält keine energetisch relevanten Inhaltstoffe und wird daher nicht im Energiefluss-Diagramm dargestellt. Der Ascheanteil entspricht 0,55 % des eingesetzten Brennstoffes, was 6,5 t/a entspricht (Details in *Kapitel 3.4.3*).

59.845 m<sup>3</sup> Produktgas werden aufgrund von Störungen nicht im BHKW verbrannt, sondern über eine Gasfackel entsorgt. Bei einem Energieinhalt von 1,5 kWh/m<sup>3</sup> führt dies zum Verlust von 90 MWh (Ilg 2017). Für das Abfackeln des Produktgases werden 385 kg Propangas als Stützflamme benötigt. Mit 50,4 MJ/kg (Moran et al. 2014) kann der Einsatz von Propangas in Höhe von 5 MWh ermittelt werden. Ebenfalls als Betriebsmittel eingesetzt wird Schmieröl mit einem Energieinhalt von insgesamt 6 MWh.

Anhand der gemessenen und ermittelten Daten können weitere Verluste in der Umwandlung der Energieformen berechnet werden. Die Differenz aus Energieeinsatz zu eingespeistem Strom, abgenommener Wärme, Holzkohle, Verteilungsverlusten und sonstigen Verluste ergibt 184 MWh. Diese sind auf mechanische und thermische Verluste der Anlage zurückzuführen.

Der Gesamtwirkungsgrad der untersuchten Anlage beträgt laut *Abbildung 6* 84,5 %. Unberücksichtigt bleiben Energieaufwände der vorgelagerten Prozesse für die Phase Konstruktion sowie die Brennstoffbereitstellung. Gleiches gilt für den Energieinhalt der Holzkohle, da diese nicht in mechanische oder thermische Energie umgewandelt wird. Deren positiver Effekt auf die Treibhausgasbelastung wird in *Kapitel 4.2* diskutiert.

Die untersuchte Anlage wird für das Jahr 2016 bilanziert. Die Einsatzstunden sowie die Leistung des BHKW sind in diesem Jahr nicht repräsentativ, da das BHKW im laufenden Jahr ausgetauscht und durch ein Leistungsstärkeres ersetzt wurde. Dies führt zu höheren Ausfallstunden des BHKW, während der Holzvergaser möglichst ohne Unterbrechung läuft. Damit werden ungewöhnlich hohe Gasmengen abgefackelt und die erzeugte Energie entspricht nicht dem Normalbetrieb. Der geringere Output führt primär zu einem schlechteren Gesamtwirkungsgrad der Anlage.

### **3.2 Bisherige Ökobilanzen zu Vergasungsverfahren**

Bereits 1997 veröffentlichten Margareth Mann und Pamela Spath eine Analyse einer groß ausgelegten Vergasungsanlage (Mann und Spath 1997). Hier werden die ökologischen Auswirkungen der Kohlevergasung mit Biomasse als zusätzlichen Brennstoff in einem Batelle/FERCO Vergaser in den USA behandelt. Die eingesetzten Brennstoffe sowie der Vergasungstyp sind nicht identisch mit denen der untersuchten Anlage, jedoch liefert die LCA einen detaillierten Einblick in die Vorgehensweise bei der Erstellung einer Ökobilanz. In dieser Ausarbeitung werden die Emissionen der Vergasung sowie des Gasturbinenbetriebs auf die erzeugte elektrische Energie umgelegt. Diese Berücksichtigung beider Prozessschritte (Vergasung und anschließende Verbrennung in einer Turbine oder BHKW) wird bei der eignen LCA ebenso vollzogen. Mann und Spath's Analyse wurde jedoch vor der Einführung des genannten ISO-Standards abgeschlossen, weshalb deren Methode nicht uneingeschränkt vergleichbar ist.

Marheineke 2002 untersucht in seiner Dissertation die Auswirkungen auf die Umwelt sowie monetäre Aspekte verschiedener Stromerzeugungstechnologien. Im Bereich der Vergasungstechnologien werden jedoch ausschließlich Anlagen im großen Maßstab betrachtet, befeuert mit fossilen Brennstoffen. Bspw. ein steinkohlebefeuertes GuD-



Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung. Weiterhin verwendet auch Marheineke die Eco-Indicator 99-Methode zur Wirkungsabschätzung, welcher eine Endpoint-Betrachtung zugrunde liegt. Dabei werden die oben beschriebenen Endpoint-Kategorien menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Ressourcen unterschieden.

Elsayed et al. 2003 untersuchen in ihrer Arbeit verschiedene Technologien mit dem Einsatz biogener Brennstoffe. Es werden u.a. die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung aus Waldrestholz und Kurzumtriebsplantagen auf deren Treibhausgaspotential untersucht. Zusätzlich wird eine Untergliederung der Prozesse in die Bereitstellung von Hackschnitzeln und die Strom- und Wärmeerzeugung vorgenommen. Die übersichtliche Darstellung der Ergebnisse bietet in einigen Aspekten Vergleichsmöglichkeiten mit der untersuchten Anlage. Die Verteilung der Wärme über ein Nahwärmenetz ist allerdings nicht enthalten.

Der Weltenergieat veröffentlichte 2004 einen Vergleich von Energiesystemen unter Berücksichtigung der Lebenszyklusbetrachtung (WEC 2004). Darin werden erneuerbare Energiesysteme der fossilen sowie nuklearen Erzeugung gegenübergestellt. Ebenso werden Verfahren zur gekoppelten Wärme- und Stromerzeugung durch Kohlekraftwerke, Gasturbinen, Kombikraftwerke und Anlagen, die mit Waldrestholz betrieben werden betrachtet.

Carpentieri et al. 2005 berechnen eine Ökobilanz nach ISO-Standards, welche auf die Auswirkungen synthetisch erzeugten Gases aus Biomasse zur integrierten Stromerzeugung eingeht. Integriert bedeutet, dass die Restwärme nach der Gasturbine erneut verwendet wird, um in einem Dampfprozess eine zweite Turbine anzutreiben. Die Anlage ist nicht auf die Wärmeerzeugung ausgelegt. Weitere Abweichungen dieser LCA von der untersuchten Anlage sind der Fokus auf Abscheidungsverfahren von CO<sub>2</sub> sowie die verwendete Wirkungsabschätzungs-Methode Eco-Indicator 95, welcher eine Endpoint-Abschätzung zugrunde liegt. Dennoch kann ein Vergleich mit der untersuchten Anlage jedenfalls in Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Abscheidung erfolgen.

Sebastián et al. 2011 untersuchen das Treibhausgasminderungspotential in kohlebefeuernten Anlagen zur Stromerzeugung. Kohle als Brennstoff stellt die Referenzanlage dar, welche mit einer Beimischung von Biomasse-Brennstoffen sowie einer reinen Biomasse-Befeuerung verglichen wird. Die Systemgrenzen schließen zwar die Rohstoffbereitstellung, Bau und Betrieb der Anlagen sowie die Entsorgung der Asche mit ein, nicht aber den Abriss und damit das End-of-Life Szenario.

Eine detailliert beschriebene LCA liefert Adams 2011. Er behandelt u.a. die Analyse eines klein-dimensionierten Flugstromvergasers in Großbritannien. Die erzeugte Wärme wird an industrielle Gebäude abgegeben, der erzeugte Strom für den Eigenbedarf verwendet und

der Überschuss in das öffentliche Netz eingespeist. Die funktionelle Einheit für den Betrieb der Anlage ist 1 MJ Energie, welche Wärme und Strom beinhaltet. In der LCA werden drei verschiedene Methoden der Wirkungsabschätzung gewählt (ReCiPe Midpoint und Endpoint, Eco-Indicator 99 (vgl. *Kapitel 4.1*)) und eine ausführliche Aufschlüsselung und Interpretation der Prozesse mit den größten Auswirkungen dargestellt. Unterschiede zu der untersuchten Anlage bestehen einerseits in den unterschiedlichen Vergasungstechnologien und andererseits in der Wahl der Systemgrenzen. Die Systemgrenzen unterscheiden sich in der Form, dass Adams 2011 den Brennstoff als Abfallprodukt aus einem Sägewerk bezieht, dieses Werk selbst jedoch außerhalb der Systemgrenzen liegt und damit nicht der gesamte Lebensweg des Brennstoffes in der Analyse inkludiert ist. In der untersuchten Anlage hingegen wird die gesamte Kette von der Bewirtschaftung des Waldes bis hin zur Aufbereitung der Hackschnitzel und deren Transport berücksichtigt. Zudem lässt Adams 2011 die Verteilung der Wärme über ein Nahwärmenetz an die Verbraucher unberücksichtigt.

Eine weitere sehr umfangreiche LCA befindet sich in der Publikation *Regenerative Energien in Österreich* (Kaltschmitt und Streicher 2009). Hierin wird eine ökologische Analyse der Bereitstellung elektrischer und thermischer Energie geliefert. Die Autoren untersuchen zum einen verschiedene Verfahren der Wärmebereitstellung in Kleinanlagen aus Scheitholz, Pellets und Waldhackgut sowie die Wärmeerzeugung in Biomasseheizwerken mit Nahwärmeversorgung. Zum anderen werden Technologien zur elektrischen Versorgung verschiedener Referenzanlagen untersucht. Die Emissionsbilanzen beziehen sich im Allgemeinen auf die gesamte Lebensdauer (Bau, Betrieb und Abriss) worin auch die Brennstoffbereitstellung (Hackschnitzelproduktion) enthalten ist. Ein Vergleich der Ergebnisse mit der untersuchten Anlage kann jedoch nur bei ausschließlicher Wärme- bzw. Stromerzeugung erstellt werden, da Kaltschmitt und Streicher 2009 bei einer gekoppelten Wärme- und Stromerzeugung einen der beiden Outputs als Gutschrift betrachten. Anhand einer Systemerweiterung ist dieses Vorgehen möglich, führt allerdings dazu, dass diese Gutschrift das Gesamtergebnis der Umweltwirkungen stark reduziert. Damit können die Ergebnisse von Kaltschmitt und Streicher 2009 der untersuchten Anlage nur bedingt gegenübergestellt werden.

Biemann 2015 stellt in ihrer Dissertation die Umweltwirkungen zentraler holzbasierter Wärmeversorgung gegenüber dezentralen Versorgungssystemen. Dabei betrachtet sie u.a. den für die untersuchte Anlage ebenfalls relevanten Aspekt der Wärmeverteilung über ein Nahwärmenetz. Neben einer ORC-Anlage, Pellet- und Hackschnitzelheizungen wird auch ein Holzvergaser (Wirbelschichtverfahren) mit BHKW untersucht, welcher mit Hackschnitzeln betrieben wird. Dabei wird für die Konstruktion des Vergasers und BHKW

auf Daten aus der freiverfügbaren Datenbank GEMIS 4.6 zurückgegriffen, welche jedoch nur Stahl und Beton als Baumaterial ausweisen. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt die Konstruktion von Gebäuden, in welchen die Anlagenkomponenten aufgestellt werden. Leider werden keine konkreten Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dokumentiert, es bleibt nur die Möglichkeit Äquivalent-Emissionen der jeweiligen Wirkungskategorie anhand der dargestellten Grafiken abzuschätzen.

Scharte et al. 2016 liefern umfangreiche Vergleichsdaten für die untersuchte Anlage. Die Arbeit stellt umfangreiche Daten aus GEMIS und ÖKOBAUDAT zusammen, welcher neben Hackschnitzelkessel und Gas-BHKW auch Daten von Fernwärmeanlagen beinhaltet. Letztere beziehen sich neben Fernwärme-Erzeugungsanlagen auch auf das Nahwärmenetz zur Verteilung der Wärme. In Bezug auf die Fernwärmeversorgung wird der hohe Einfluss des Brennstoffeinsatzes auf die Umweltwirkungen deutlich, welcher im Gegensatz zur untersuchten Anlage rein auf fossilen Energieträgern beruht.

Bis auf die Ökobilanzen von Adams 2011; Biemann 2015; Elsayed et al. 2003; Mann und Spath 1997; Carpentieri et al. 2005; Scharte et al. 2016; Kaltschmitt und Streicher 2009 können die Analysen nur in komprimierter Form eingesehen werden. Die meisten LCA werden in wissenschaftlichen Journals zusammengefasst veröffentlicht ohne detaillierte Einblicke zu bieten. Damit sind oftmals Systemgrenzen oder Allokationen nicht vollständig nachvollziehbar und Vergleiche mit Ergebnissen der untersuchten Anlage nur schwer möglich. Ein Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Anlage mit der beschriebenen Literatur wird in *Kapitel 4.4* diskutiert.

### **3.3 Angewandte Methodik**

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist es, die entstehenden Umweltwirkungen bei der Vergasung und Stromerzeugung aus Biomasse über den gesamten Lebenszyklus zu analysieren. Dabei sollen die Prozesse mit den schädlichsten und größten Auswirkungen identifiziert und mittels international anwendbarer Methoden vergleichbar gemacht werden. Bau, Betrieb sowie Abriss aller relevanten Prozesse werden hierbei berücksichtigt. Auf Kerninformationen der untersuchten Anlage wird nachfolgend im Detail eingegangen.

Der Output und damit der Nutzen der untersuchten Anlage ist Energie in Form von Wärme und Strom. Damit stellt die funktionelle Einheit (fE) 1 kWh Energie dar. In der weiteren Arbeit wird der Output der Vergasungsanlage mit der Einheit kWh<sub>fE</sub> definiert. Es gilt zu beachten, dass Strom und Wärme gleich bewertet werden. Die Anteile an der gesamterzeugten Energie beträgt rund 65 % Wärme und 35 % Strom. Die Auswahl der fE der untersuchten Anlage ist auf die Einflussgrenze des Betreibers zurückzuführen. Es werden alle Prozesse

berücksichtigt, die bis zur Wärmeübergabe an den Endkunden bzw. zur Einspeisung in das öffentliche Netz notwendig sind.

Zur gesamtheitlichen Darstellung der untersuchten Anlage bedarf es zweier weiterer Kernprozesse. Einerseits die Konstruktion aller benötigten Anlagenkomponenten unter Berücksichtigung derer Lebens- und Nutzungszeiten, welche zusammengefasst die fE 1 Vergasungsanlage (VGA) darstellen. Andererseits die Bereitstellung der HS mit der funktionellen Einheit 1 kg HS. Diese beiden Zwischenoutputs werden wiederum auf die eigentliche fE 1 kWh<sub>fE</sub> umgelegt, und bilden somit gemeinsam die gesamte Analyse ab. Weitere Details folgen in *Kapitel 3.4*.

In *Abbildung 7* sind die drei untersuchten Phasen der untersuchten Anlage innerhalb der Systemgrenzen und inklusive deren fE dargestellt. Die farbliche Untergliederung markiert die drei Lebenszyklusphasen Bau, Betrieb und Abriss. Weiterhin abgebildet sind die Energie-, Ressourcen- und Emissionsflüsse der einzelnen Prozessschritte. Der Materialeinsatz (M) stellt nicht nur bereits verarbeitete Materialien wie Stahl, Aluminium, Hackschnitzel etc. dar, sondern auch Rohmaterialien wie Kies, Sand, Wasser etc. Diese weitere Untergliederung wird an dieser Stelle aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht getroffen. Transporte sind nicht speziell ausgewiesen, da diese in jedem Prozess bereits enthalten sind.

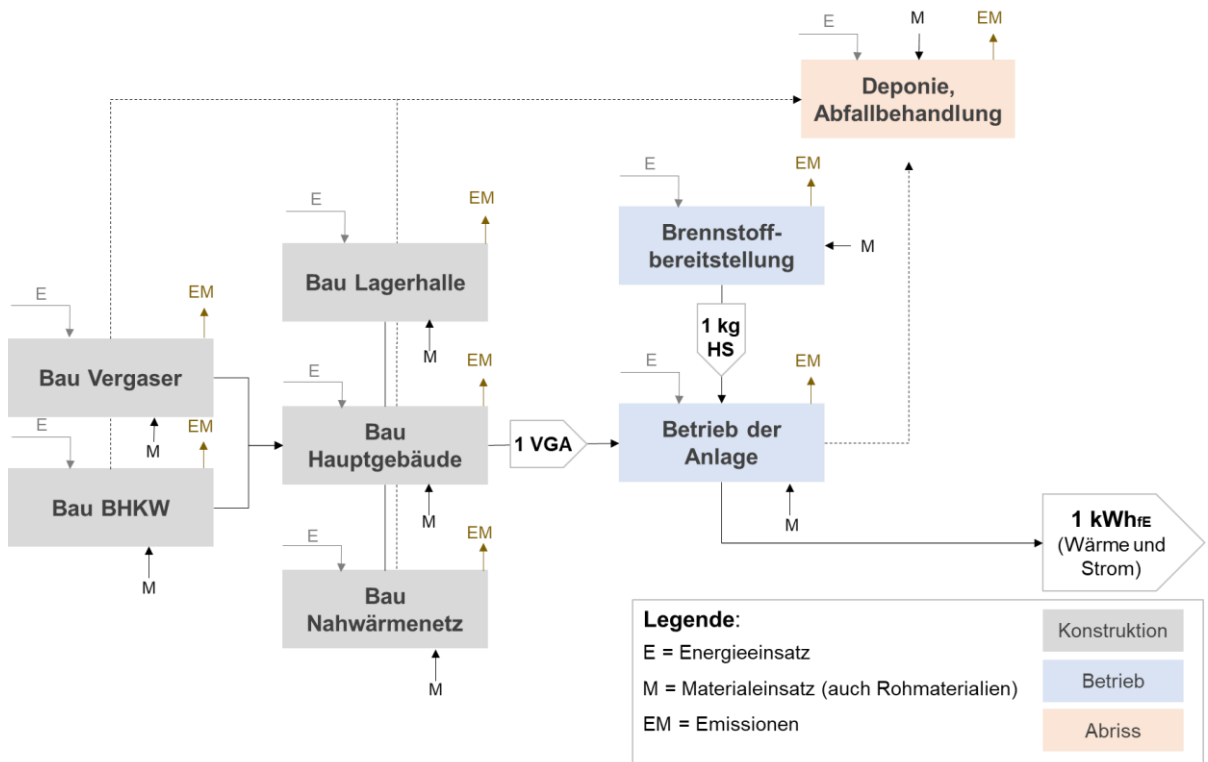
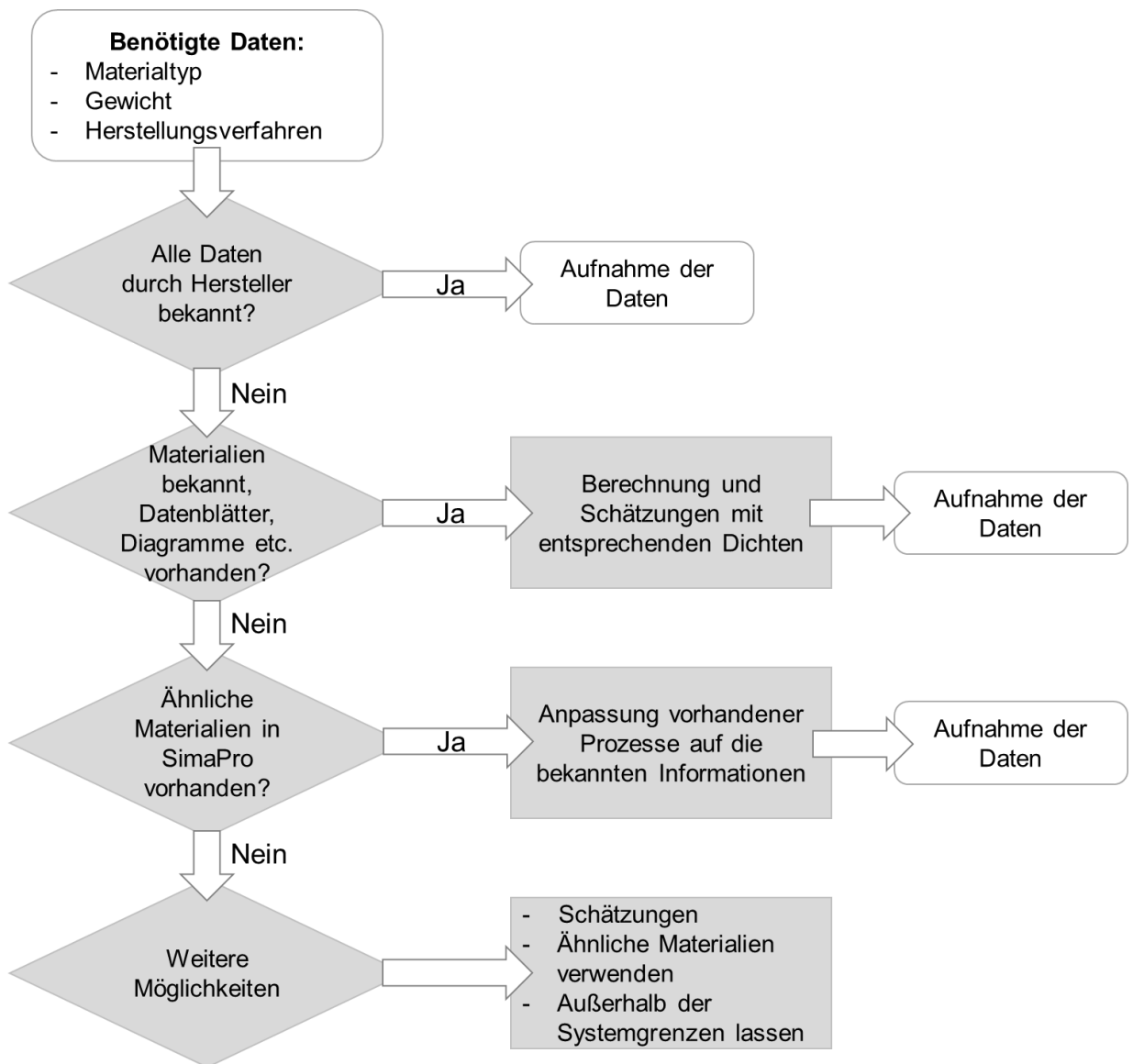


Abbildung 7: Überblick der Systemgrenzen und funktionellen Einheiten der untersuchten Anlage inklusive Konstruktion, Betrieb und Abriss

### 3.4 Sachbilanzdaten – Sammlung und Aufbereitung

In diesem Abschnitt wird die Sammlung von Primär- und Sekundärdaten der einzelnen Anlagenkomponenten erläutert. Primärdaten (PD) sind Daten, die direkt aufgenommen werden können, bspw. durch Angaben der Hersteller, Auskunft durch die Betreiber der Anlage oder durch Internetrecherche. Sekundärdaten (SD) werden durch die ecoinvent Datenbank zur Verfügung gestellt oder durch eigene Kalkulationen basierend auf Literaturdaten berechnet. *Abbildung 8* stellt die Schritte der Datensammlung schematisch dar.



*Abbildung 8: Methodik Datensammlung – Allgemeiner Ablauf*

Die hier beschriebene Methode stellt das Vorgehen bei der Recherche einzelner Materialien dar. Oft sind die eingesetzten Materialien bestimmter Produkte nicht bekannt und müssen

durch Kontaktaufnahme mit dem Hersteller bzw. den Betreibern der Anlage recherchiert werden. Möglich ist auch, dass der Hersteller nur ein Gesamtgewicht eines Produktes angibt, nicht aber die Aufschlüsselung der einzelnen Komponenten. So ist es teilweise nötig, das Gesamtgewicht durch Vergleich mit ähnlichen Produkten aufzuschlüsseln. Dieser Methode wird sich bspw. bei der Datensammlung des BHKW bedient. Weiterhin ist für die Eingabe in SimaPro meist die Masse des Materials zu ermitteln, und nicht eine verwendete Fläche oder das Volumen. Hierfür muss auf Datenblätter und Literatur mit Angaben zur Dichte zurückgegriffen werden, um eine exakte Berechnung der eingesetzten Materialien zu gewährleisten. In einigen Fällen kann auch auf bestehende Prozesse aus der ecoinvent Datenbank in SimaPro zurückgegriffen werden. Dies ist nur dann möglich, wenn die Daten sehr gut auf den eigenen Prozess zutreffen oder diesen ggf. noch genauer beschreiben, als es mit den eigens gesammelten Daten möglich wäre. Alle diese Fälle sind entsprechend gekennzeichnet. Im Folgenden werden die relevanten Anlagenkomponenten dargestellt und die verwendeten Datensätze für die Eingabe in SimaPro offengelegt.

### **3.4.1 Konstruktion**

Die Phase Konstruktion stellt alle Prozesse dar, die nötig sind, um Anlagenkomponenten zu errichten bzw. den Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Neben der Herstellung und Montage der innerhalb der Systemgrenzen liegenden Anlagenkomponenten, werden auch Vorketten berücksichtigt, wie bspw. die Bereitstellung der eingesetzten Materialien. Transporte werden nicht gesondert ausgewiesen, sind jedoch in allen Prozessen enthalten. Für den Einsatz der Materialien werden Abfallszenarien erstellt, die die End-of-Life Betrachtung der Systemgrenze mitabbilden.

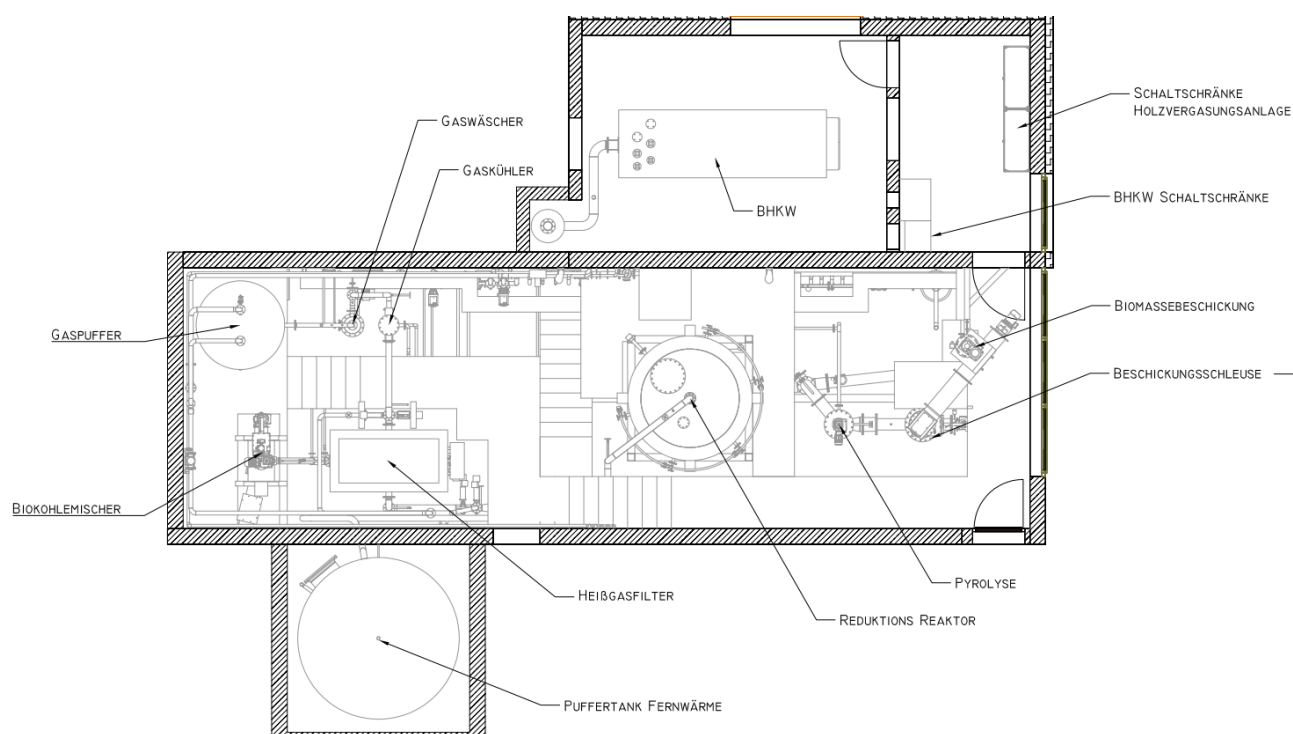
Der verwendete Strom während der Bau- und Betriebsphase am Standort Hatlerdorf wird aus Wasserkraft erzeugt und wird daher nicht durch einen Standardstrommix abgebildet. Um die Herkunft des Strombedarfs der untersuchten Anlage korrekt darzustellen, wird ein eigener Prozess erstellt, welcher die tatsächlichen Emissionen für Elektrizität aus Laufwasserkraftwerken in Österreich inklusive Übertragungs- und Verteilungsverlusten sowie die Transformation von Hoch- auf Mittelspannung beinhaltet. Als Treibgas in den Schaltanlagen wird Schwefelhexafluorid eingesetzt. Daten entstammen der ecoinvent Datenbank.

Alle Angabe basieren auf Nachweisen oder persönlichen Gesprächen durch die Anlagenbetreiber des Energiewerk Ilg (Ilg 2017). Andere Quellen als diese werden gesondert ausgewiesen.

### 3.4.1.1 Bau Hauptgebäude

Das Hauptgebäude erhält seinen Namen, weil hierin die Vergasungsanlage sowie das BHKW und alle sonstigen technischen Komponenten für den Betrieb der Anlage aufgestellt sind. Ebenfalls enthalten ist der Tagesbunker, zur weiteren Trocknung der HS.

Die nachfolgende *Abbildung 9* zeigt den Aufstellungsplan der gesamten technischen Anlagenkomponenten innerhalb des Hauptgebäudes. Bei diesem Plan ist allerdings nur ein Stockwerk dargestellt, der Tagesbunker für die Hackschnitzellagerung sowie ein Teil der Kohleverwertung (Hänger im Keller) sind nicht abgebildet. In der Ermittlung der Gesamtnutzfläche sowie der in Summe eingesetzten Materialien sind diese jedoch berücksichtigt. Der in der Abbildung zu sehende Puffertank wird der untersuchten Anlage nicht zugerechnet, da dieser größtenteils für die BM-Kessel eingesetzt wird und eine Allokation nach Wärmemengen hier keine Auswirkungen hat.



*Abbildung 9: Aufstellungsplan Gebäude für Gesamtanlage am Standort Hatlerdorf (SynCraft 2016)*

Quelle: (Ilg 2016)

Das Hauptgebäude hat eine Nutzungszeit von 30 Jahren. Die Grundfläche des Gebäudes zur Unterbringung der relevanten Komponenten beträgt 217 m<sup>2</sup>. Diese Fläche wird verwendet, um die Besetzung von Land (Landnutzungsänderung) auf die gesamte Lebenszeit des Gebäudes hochzurechnen. Die Bauzeit der Halle beträgt 25 Wochen.

Dieser Zeithorizont dient der Ermittlung des Energieeinsatzes der Baumaschinen für Elektrizität und Diesel.

*Tabelle 2* liefert einen Überblick über die eingesetzten Materialien und Prozesse für die Errichtung des Gebäudes und die Bezeichnung des verwendeten Prozesses in SimaPro. Dabei werden einerseits Ressourcen aus der Natur sowie die Besetzung von Land als Folge der Bebauung bilanziert. Andererseits werden alle Materialeinsätze und energetischen Aufwendungen dokumentiert, die zur Errichtung des Hauptgebäudes notwendig sind. Der dritte Teil stellt die Abfallbehandlung und damit die End-of-Life Betrachtung dar. Alle Sachbilanztabellen dieser Arbeit sind nach diesem Schema aufgebaut.

*Tabelle 2: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau Hauptgebäude*

<b>Prozesse</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Eingaben in SimaPro</b>
<b>Ressourceneinsatz aus der Natur</b>		
1. Fundament	700 kg Sand und Kies (Mischung)	<i>Sand and gravel</i>
2. Besetzung und Umwandlung Landfläche	6.510 m <sup>2</sup> a über 30 Jahre Nutzungszeit. Umwandlung von 217m <sup>2</sup> Fläche	<i>Occupation, industrial area</i>  <i>Transformation, from urban to industrial area</i>
<b>Material- und Energieeinsatz aus der Technosphäre</b>		
3. Aushub Erde	480 m <sup>3</sup> Erde inklusive Arbeitszeit Bagger, Dieselverbrauch etc.	<i>Excavation, hydraulic digger</i> <i>{RER}  processing   Alloc Def, U</i>
4. Transporte	13.920 Tonnenkilometer (tkm). Für Anlieferung Kies und Sand und Abtransport Überschuss- Erde aus Aushub	<i>Transport, freight, lorry 7.5-16</i> <i>metric ton, EURO6 {RER} </i> <i>transport, freight, lorry 7.5-16</i> <i>metric ton, EURO6   Alloc Def, U</i>
5. Fundament	312 m <sup>3</sup> Stahlbeton	<i>Concrete, sole plate and</i> <i>foundation {CH}  market for   Alloc</i> <i>Def, U</i>
6. Holzfassade	480 m <sup>2</sup> Schalung aus 18 Festmeter (fm) heimischer Weißtanne: 18 m <sup>3</sup> Holz.	<i>Sawnwood, softwood, raw, dried</i> <i>(u=10%) {RER}  market for   Alloc</i> <i>Def, U</i>



7. Glasfenster	17 m <sup>2</sup> Glas: 850 kg	<i>Flat glass, uncoated {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
8. Dachpappe	150 m <sup>2</sup> : 1.500 kg Bitumen	<i>Bitumen seal {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
9. Dämmung	Schaumstoff für Dachisolierung, 10 cm Stärke: 1050 kg	<i>Polystyrene foam slab {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
10. Einsatz Baumaschinen	1.250 h Bauzeit. Daten aus Vergleichsprozess	<i>Machine operation, diesel, &lt; 18.64 kW, generators {GLO}  machine operation, diesel, &lt; 18.64 kW, generators   Alloc Def, U</i>
11. Einsatz Elektrizität	1.250 h Bauzeit bei 6 kW Dauerleistung: 7.500 kWh	<i>Elektrizität aus Flusswasserkraft AT inkl. Transformation auf MS</i>

### **Outputs zur Technosphäre – Abfälle und Recycling**

12. Fundament - Abfall Zement	748,80 Tonnen	<i>Waste cement in concrete and mortar {CH}  treatment of, collection for final disposal   Alloc Def, U</i>
13. Holz – Abfall	6,3 Tonnen (18 m <sup>3</sup> á 350 kg/m <sup>3</sup> )	<i>Waste wood, untreated {CH}  clinker production   Alloc Def, U</i>
14. Dämmung – Abfall	1.050 kg	<i>Waste polystyrene {CH}  market for waste polystyrene   Alloc Def, U</i>
15. Trapezdach – Abfall	1.500 kg	<i>Waste bitumen sheet {CH}  market for   Alloc Def, U</i>
16. Glas – Abfall	850 kg	<i>Waste glass {CH}  market for waste glass   Alloc Def, U</i>

### 3.4.1.2 Bau Lagerhalle

Die Lagerhalle befindet sich rund zwei Kilometer entfernt vom Hauptgebäude, in welchem die VGA betrieben wird. Sie stellt den zentralen Sammel- und Lagerplatz der Hackschnitzel dar und dient weiterhin dem Trocknungsprozess der HS auf W15. Die Anlagenkomponenten für den Trocknungsprozess werden ebenfalls in den Bau der Lagerhalle aufgenommen. Die Trocknung selbst wird jedoch in der Phase Betrieb näher erläutert. Es wird ebenfalls von einer Nutzungszeit von 30 Jahren ausgegangen. Die Grundfläche der Halle beträgt 900 m<sup>2</sup>. Bis auf eine Höhe von 6 m ist die Halle in Stahlbeton ausgeführt. Weitere 3,5 m werden in Holzbauweise gefertigt. Die Lagerkapazität beträgt 5.000–6.000 Schüttraummeter (srm). Die Bauzeit der Halle umfasst 5 Wochen, was 120 Stunden entspricht. Für die Halle werden 30 m<sup>3</sup> recyceltes Holz aus eigener Produktion eingesetzt. Die Konstruktion der Halle wird der untersuchten Anlage nur zu 50 % angerechnet. Hintergrund ist, dass nur die Hälfte der in der Halle gelagerten Hackschnitzel für die untersuchte Anlage verwendet werden, die andere Hälfte wird in den Biomassekesseln eingesetzt, welche außerhalb der Systemgrenzen liegen. Aus diesem Grund werden für die Modellierung der Anlage nur 0,5 Einheiten der Lagerhalle verwendet.

*Abbildung 10* zeigt ein Archivfoto aus 2010, worauf der Bau der Lagerhalle und ein Teil der eingesetzten Hauptmaterialien zu sehen sind.



*Abbildung 10: Bau Lagerhalle – Archivfoto*

Quelle: (Ilg 2016)

Tabelle 3 stellt die Eingaben in SimaPro nach bereits erläuterten Schema dar.

Tabelle 3: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau Lagerhalle

<b>Prozesse</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Eingaben in SimaPro</b>
<b>Ressourceneinsatz aus der Natur</b>		
1. Fundament	798 Tonnen Kies	<i>Gravel</i>
2. Besetzung und Umwandlung Landfläche	27.000 m <sup>2</sup> a Besetzung Grasfläche über die gesamte Lebenszeit. Umwandlung von 900m <sup>2</sup>	<i>Occupation, grassland Transformation, from grassland Transformation, to urban</i>
<b>Material- und Energieeinsatz aus der Technosphäre</b>		
3. Aushub Erde	558 m <sup>3</sup> Erde inklusive Arbeitszeit Bagger, Dieserverbrauch etc.	<i>Excavation, hydraulic digger {RER}  processing   Alloc Def, U</i>
4. Transporte	39.938 tkm für Anlieferung Kies und Abtransport Überschuss-Erde aus Aushub	<i>Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RER}  transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6   Alloc Def, U</i>
5. Fundament	108 m <sup>3</sup> Beton für Fundament	<i>Concrete, sole plate and foundation {CH}  market for   Alloc Def, U</i>
6. Betonfertigwände	Stahlbeton: 56 m <sup>3</sup>	<i>Concrete, normal {CH}  market for   Alloc Def, U</i>
7. Stahlsäulen	24 Stück: 16.800 kg	<i>Reinforcing steel {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
8. Holz	Insgesamt 76 m <sup>3</sup> Schalung, davon 30 m <sup>3</sup> recyceltes Altholz: 46 m <sup>3</sup> Sägeholz	<i>Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}  market for   Alloc Def, U</i>
9. Trapezblech	Stahlblech: 1.100 m <sup>2</sup> , 1,7 mm Stärke: 14,68 kg Stahl	<i>Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
10. Ventilator	Stahl: 300 kg	<i>Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
11. Energieeinsatz Baumaschinen	Dieserverbrauch während Bauzeit von 250h	<i>Machine operation, diesel, &lt; 18.64 kW, generators {GLO}  machine operation, diesel, &lt;</i>

		<i>18.64 kW, generators   Alloc Def, U</i>
12. Einsatz Elektrizität	120 h Bauzeit bei 2 kW Dauerleistung: 500 kWh	<i>Elektrizität aus Flusswasserkraft AT inkl. Transformation auf MS</i>
<b>Outputs zur Technosphäre – Abfälle und Recycling</b>		
13. Asphalt - Abfall	404 Tonnen	<i>Waste concrete {CH}  market for waste concrete   Alloc Def, U</i>
14. Holz - Abfall	26,6 Tonnen	<i>Waste building wood, chrome preserved {CH}  market for   Alloc Def, U</i>
15. Stahl - Recycling	16,8 Tonnen	<i>Scrap steel {CH}  market for scrap steel   Alloc Def, U</i>

### 3.4.1.3 Bau Vergaser

Die Holzvergasungsanlage befindet sich im Hauptgebäude und enthält nachfolgende Komponenten:

- Biomassebeschickung – Schnecke
- Beschickungsschleuse
- Pyrolyse-Reaktor
- Reduktionsreaktor
- Heißgasfilter
- Gaswäscher
- Gaskühler
- Gemischkühler
- Biokohlemischer

Die Nutzungszeit des Vergasers beträgt 15 Jahre, wobei nach Ablauf dieser die Hälfte der Komponenten ausgetauscht und erneut für 15 Jahre betrieben werden kann (Marcel Huber, SynCraft 2016). Damit erhöht sich die Nutzungszeit der untersuchten Anlage auf 30 Jahre, wofür 1,5 Vergaser benötigt werden. Hersteller ist das Tiroler Unternehmen SynCraft Engineering GmbH in Schwaz. Für die Montage bzw. den Zusammenbau aller Komponenten des Vergasers sind keine Informationen des Herstellers vorhanden. Es wird ein Wert für den Wärme- und Strombedarf aus dem Herstellungsprozess des anschließend definierten BHKWs verwendet. *Tabelle 4* fasst die Eingaben in SimaPro zusammen.

Tabelle 4: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau Vergaser

<b>Prozesse</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Eingaben in SimaPro</b>
<b>Material- und Energieeinsatz aus der Technosphäre</b>		
1. Stahl, chromlegiert	7,2 Tonnen	<i>Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
2. Stahl, verzinkt	9,6 Tonnen in Anlagenteilen und Treppen	<i>Steel, unalloyed {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
3. Aluminium	350 kg	<i>Aluminium, cast alloy {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
4. Elektrik	350 kg Kupfer für elektrische Komponenten	<i>Copper {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
5. Dämmung	3 Tonnen Steinwolle	<i>Stone wool {GLO}  market for stone wool   Alloc Def, U</i>
6. Filterkerze	24 Keramikkerzen mit je 3,50 kg im Heißgasfilter	<i>Ceramic tile {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
7. Einsatz Elektrizität/Wärme	Für Montage (aus BHKW-Prozess übernommen) 4.940 kWh Strom 25.650 MJ Wärme	<i>Energy requirement for assembly of heat and power co-generation unit, 160kW electrical {RER}  Alloc Def, U</i>
<b>Outputs zur Technosphäre – Abfälle und Recycling</b>		
8. Aluminium	350 kg	<i>Scrap aluminium {CH}  market for scrap aluminium   Alloc Def, U</i>
9. Kupfer	350 kg	<i>Scrap copper {CH}  market for scrap copper   Alloc Def, U</i>
10. Stahl	16,8 Tonnen	<i>Scrap steel {CH}  market for scrap steel   Alloc Def, U</i>
11. Sonstige Entsorgung	3.048 kg für Steinwolle und Filterkerzen	<i>Inert waste, for final disposal {CH}  market for inert waste, for final disposal   Alloc Def, U</i>

### 3.4.1.4 Bau BHKW

Für das BHKW wird von einer Nutzungszeit von 8 Jahren ausgegangen. Hersteller ist das Unternehmen 2G Energy AG. Es handelt sich um das Modell agentior 406 BG mit einer elektrischen Leistung von 240 kW. Aufgrund mangelnder Primärdaten des Herstellers wird ein Vergleichsprozess aus der ecoinvent-DB adaptiert, welcher die verwendeten Komponenten sowie Energieeinsätze für die Herstellung des BHKW berücksichtigt. Der Vergleichsprozess beschreibt die Herstellung eines BHKWs in Europa mit 160 kW elektrischer Leistung: *Heat and power co-generation unit, 160kW electrical, common components for heat+electricity {RER}| construction | Alloc Def, U*.

Der Prozess wird folgendermaßen adaptiert: Gasmotor, Luft Ein- und Auslass Einheit sowie der Umrichter werden mit 1,5 multipliziert, um der korrekten Dimension zu entsprechen. Die weiteren Teilprozesse werden unabhängig der BHKW Leistung als konstant angenommen. Die verwendeten Prozesse können *Tabelle 5* entnommen werden.

Folgende Prozesse des Vergleichsprozesses bleiben für das untersuchte BHKW unberücksichtigt: Planung, Wartung, Aufstellung und Konstruktionsarbeiten. Die Planung des BHKW liegt außerhalb der Systemgrenzen, weshalb hierfür keine Energieeinsätze kalkuliert werden. Für die Wartung werden Primärdaten aus Angaben der Betreiber verwendet. Der Prozess *Aufstellung (Start-up)* enthält lediglich den Personentransport per Auto und wird für die untersuchte Anlage nicht benötigt. Die Konstruktionsarbeiten beziehen sich auf den Bau eines Gebäudes für die Aufstellung des BHKWs, dieser Prozess ist bereits in *Bau Hauptgebäude* enthalten.

*Tabelle 5: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau BHKW*

<b>Prozesse</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Eingaben in SimaPro</b>
<b>Ressourceneinsatz aus der Natur</b>		
Keine Besetzung und Umwandlung von Landflächen	In Hauptgebäude inbegriffen	-
<b>Material- und Energieeinsatz aus der Technosphäre</b>		
1. Luft Ein-/Auslass Einheit	Auf 240 kW dimensioniert	<i>Air input/output unit, heat and power co-generation unit, 160kW electrical {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>

2. Gasmotor	Auf 240 kW dimensioniert	<i>Gas motor, 206kW {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
3. Steuerung / Schaltschrank	275 kg Stahl, 0,15 kg Aluminium, 10,8 kg Kupfer, 78,5 kg Polyethylen	<i>Control cabinet, heat and power co-generation unit, 160kW electrical {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
4. Schallschutz	1.919 kg Stahl und 480 kg Steinwolle	<i>Sound insulation, heat and power co-generation unit, 160kW electrical {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
5. Umrichter	7,5 Umrichter (5 Stück hochgerechnet aus Vergleichsprozess) mit je 65 kg Stahl	<i>Catalytic converter, three-way, 19.1l {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
6. Einsatz Elektrizität/Wärme	Für Montage 4.940 kWh Strom 25.650 MJ Wärme	<i>Energy requirement for assembly of heat and power co-generation unit, 160kW electrical {RER}  Alloc Def, U</i>
<b>Outputs zur Technosphäre – Abfälle und Recycling</b>		
7. Polyethylen	78,5 kg von Schaltschrank	<i>Waste polyethylene {CH}  market for waste polyethylene   Alloc Def, U</i>
8. Kupfer	10,8 kg elektrische Komponenten Schaltschrank	<i>Scrap copper {CH}  market for scrap copper   Alloc Def, U</i>
9. Stahl	2.681,5 kg aus Schaltschrank, Schallschutz und Umrichter	<i>Scrap steel {CH}  market for scrap steel   Alloc Def, U</i>
10. Steinwolle	480 kg Steinwolle	<i>Inert waste, for final disposal {CH}  market for inert waste, for final disposal   Alloc Def, U</i>

### 3.4.1.5 Bau Nahwärmenetz

Die Nutzungszeit wird mit 40 Jahren angegeben. Allerdings ist zu bemerken, dass das Netz im Boden verbleibt und nicht ausgegraben und entsorgt werden muss. Daher spielt die Abfallbehandlung keine Rolle. Die Gesamtlänge des Netzes beträgt 7.173,5 m (Stand Ende 2016). Wie bereits erläutert, werden der untersuchten Anlage nur 21,4 % des Netzes zugeteilt, was 1.535 m entspricht. Diese Allokation dient der gerechten Verteilung der Aufwendungen des Netzbaus auf alle beteiligten Wärmeerzeuger. Der Hersteller der Rohre ist das Unternehmen isoplus Fernwärmetechnik Vertriebsgesellschaft mbH. Es handelt sich um ein starres Verbundsystem mit Einzelrohren. Das Mediumrohr ist nahtlos, nicht geschweißt (isoplus 2011). Das Netz wird unter bereits bestehenden Straßen sowie auf Grasflächen verlegt, was für die Landnutzungsänderung relevant ist und in der Sachbilanz ersichtlich wird.

Da in SimaPro kein vergleichbarer Prozess für ein Nahwärmenetz existiert, wird dieser selbst erstellt. An dieser Stelle werden die Berechnungsschritte für Materialeinsätze und energetisch relevante Prozesse für die Verlegung von 1 Meter Rohr erläutert.

Die Betreiber der untersuchten Anlage und des Nahwärmenetzes stellen die Leitungslängen in den entsprechenden Dimensionen (DN) zur Verfügung, wie in *Tabelle 6* ersichtlich.

*Tabelle 6: Leitungslängen Netz entsprechend der Nennweiten in DN, Stand 2016*

Nennweite DN	Länge Leitungsstück [m]
125	36
100	450
80	2.583
65	2.648
50	980
40	2.481
32	1.544
25	3.625

In Summe werden Rohre mit einer Gesamtlänge von 14.347 m verlegt, was dem Faktor zwei der Netzlänge entspricht, da je zwei Rohre parallel verlegt sind (Vor- und Rücklauf). Der Aufbau der Fernwärmerohre wird in *Abbildung 11* dargestellt. Das Stahlrohr, in welchem das Medium Wasser fließt, ist von einer PUR-Hartschaumdämmung



(Polyurethane), freonfrei, umgeben. Der äußere PEHD-Mantel (Polyethylen hoher Dichte) umschließt das Dämmsystem (isoplus 2011).

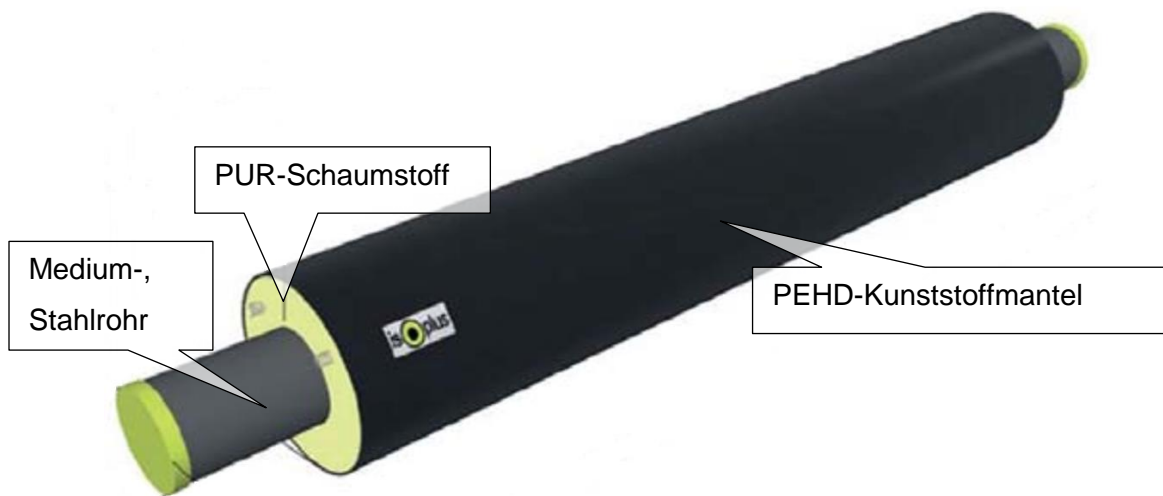


Abbildung 11 Aufbau isoplus-Einzelrohr, diskontinuierliche Fertigung - Mediumrohr nahtlos

Quelle: (isoplus 2011)

Für die Berechnung der Massen der drei Hauptkomponenten müssen die Durchmesser und Wandstärken des Stahl- und Mantelrohres bekannt sein, aus welchen in weiterer Folge das Volumen der PUR-Dämmung ermittelt werden kann. Mittels der gegebenen Durchmesser können die Flächen des Mantelrohres, des Stahlrohres und des PUR-Schaumes berechnet werden. Über die Dichte der Materialien kann schließlich die Masse bestimmt werden, welche als Inputgröße der Sachbilanz dient.

Die Materialmassen entsprechend den Rohrstücken werden in *Tabelle 7* zusammengefasst dargestellt. In dieser sind ebenfalls die Wartungsarbeiten und Reparaturen über die Betriebszeit von 40 Jahren berücksichtigt. Dies inkludiert die Baggerarbeiten für das erneute Ausheben der Erde, Verlegen der Rohre, Transport der Baumaterialien, Zuschütten und erneutem Asphaltieren der Straße. Die Wartungsarbeiten des Nahwärmenetzes stammen aus Erfahrungswerten der Betreiber. Es wird von einer Erneuerung des Netzes von fünf Metern in 15 Jahren ausgegangen, was für den Nutzungszeitraum von 40 Jahren kumuliert 13,33 m ergibt.

Bezogen auf die bekannten Leitungslängen aus *Tabelle 6* wird das Gesamtgewicht der Materialien pro Meter Leitungstück umgerechnet. Mit dieser spezifischen Masse (kg/m) kann das Nahwärmenetz in beliebigen Netzlängen modelliert werden.

*Tabelle 7* stellt die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 7: Übersicht aller Materialien für Bau und Instandhaltung Nahwärmenetz, PUR-Schaum, PEHD-Mantel und Stahlrohr, Angaben gesamt und pro Meter

<b>Nennweite DN</b>	<b>PUR-Schaum [kg]</b>	<b>PEHD-Mantel [kg]</b>	<b>Stahlrohr [kg]</b>
125,00	78,05	95,31	481,91
100,00	854,69	1011,89	4422,65
80,00	3177,11	4093,48	17469,27
65,00	2797,14	3722,31	13353,29
50,00	771,53	1202,10	4416,03
40,00	1613,36	2710,08	8830,25
32,00	1049,46	1686,56	4776,42
25,00	1929,24	3472,85	8725,24
Für Wartung	52,05	68,61	286,97
<b>Massen gesamt [kg]</b>	12.322,63	18.063,18	62.762,02
<b>Spez. Masse [kg/m]</b>	1,72	2,52	8,75

In *Tabelle 8* werden die Hauptprozesse für den Bau und die Wartungsarbeiten des Nahwärmenetzes aufgelistet. Die funktionelle Einheit ist hier ein Meter Nahwärmenetz inklusive Wartungsarbeiten. Der Abriss des Netzes ist, wie bereits ausgangs erläutert, nicht in der Sachbilanz enthalten.

Tabelle 8: Sachbilanzdaten Konstruktion - Bau Nahwärmenetz für 1 m Netzlänge inkl. Wartungsarbeiten

<b>Prozesse</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Eingaben in SimaPro</b>
<b>Ressourcenxeinsatz aus der Natur</b>		
1. Fundament	495 kg/m Kies und 680 kg/m Sand	<i>Sand und gravel</i>
2. Besetzung und Umwandlung Land	Besetzung Grünfläche 50m <sup>2</sup> a. Hälfte des Netzes unterhalb Straße, Hälfte auf Grünfläche. 1,25 m <sup>2</sup> /m Umwandlung Grünland.	<i>Occupation, grassland, natural (non-use)</i> <i>Transformation, from grassland, natural (non-use)</i> <i>Transformation, to urban</i>

---

**Material- und Energieeinsatz aus der Technosphäre**

---

3. Aushub Erde	1,2 m <sup>3</sup> Erde pro Meter Netzsaubau. Inklusive Arbeitszeit Bagger, Dieselverbrauch etc..	<i>Excavation, hydraulic digger {RER}  processing   Alloc Def, U</i>
4. Transporte	38,77 tkm je Meter Netzausbau für Anlieferung Kies und Sand und Abtransport Überschuss- Erde.	<i>Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5   Alloc Def, U</i>
5. Asphaltierung	197,16 kg Asphalt. Beinhaltet Dieselverbrauch für Rammax- Rüttelplatte und Masse Asphalt.	<i>Mastic asphalt {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
6. Stahlrohre	8,75 kg/m Mediumrohr	<i>Chromium steel pipe {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
7. Mantelrohr	2,52 kg/m Hartkunststoffmantel aus PEHD	<i>Polyethylene, high density, granulate {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
8. Dämmung	1,72 kg/m PUR-Schaum	<i>Polyurethane, rigid foam {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
9. Energieeinsatz Baumaschinen	0,11 h/m Arbeitszeit Rammax	<i>Machine operation, diesel, &lt; 18.64 kW, generators {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>

---

**Outputs zur Technosphäre – Abfälle und Recycling**

---

10. -	Kein Recycling der Einsatzmaterialien, da diese im Boden verbleiben	-
-------	---	---

---

### 3.4.1.6 Zusammenführung Konstruktion

Entsprechend der bereits erwähnten Nutzungszeiten der Anlagenkomponenten wird die Aufteilung jedes Anlagenteils für ein Betriebsjahr ermittelt. Dies ist notwendig, um die gesamte VGA letztendlich auf eine kWh<sub>fE</sub> umzulegen.

Tabelle 9: Sachbilanzdaten Konstruktion - Zusammenführung anhand Nutzungszeiten

Anlagen-komponenten	Anteile (Stück)	Nutzungszeit (Jahre)	Anteile für 1 Betriebsjahr
<b>Bau Hauptgebäude</b>	1,000	30	0,033
<b>Bau Lagerhalle</b>	0,500	30	0,017
<b>Bau Vergaser</b>	1,500	30	0,050
<b>Bau BHKW</b>	1,000	8	0,125
<b>Bau Netz (1.563 m)</b>	1,000	40	0,025

Daraus ergibt sich für die Konstruktionsphase die fE 1 Vergasungsanlage (VGA), welche nun die Nutzungszeiten ihrerer Komponenten berücksichtigt. Ein Bezug der VGA auf eine kWh<sub>fE</sub> stellt die entstehenden Emissionen für die Erzeugung einer Kilowattstunde Energie in der untersuchten Anlage dar. Wie bereits im Energiefluss-Diagramm in *Kapitel 3.1* näher erläutert, ist der Output der untersuchten Anlage 3.706 MWh Wärme und Elektrizität im Jahr 2016. Damit ergibt sich ein Anteil der VGA pro kWh erzeugter Energie von  $2,7 \cdot 10^{-7}$  Stück pro kWh<sub>fE</sub>.

### 3.4.2 Brennstoffbereitstellung

Nachfolgend wird der Brennstoffeinsatz der Hackschnitzel ermittelt. Masse, Volumen (hier Schüttraummeter (srm)) und Energieinhalt der Hackschnitzel, abhängig von dem jeweiligen Wassergehalt, sind dabei wichtige Kenngrößen für Eingaben in die Modellierungssoftware SimaPro. Die Menge des eingesetzten Brennstoffs beträgt 6.335 srm HS laut Messung bei der Anlieferung am Vergaser. Es handelt sich um Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von W15.

Der spezifische Heizwert ( $H_u$ ) pro Schüttraummeter sowie pro Kilogramm Fichtenholz sind tabelliert (Ik 2005), bzw. können mittels Interpolation auf den entsprechenden Wassergehalt angepasst werden. Entsprechend der nachfolgenden Berechnungen, werden im Jahr 2016 1.179 Tonnen Hackschnitzel W15 mit einem gesamten Energieinhalt von 5.171,17 MWh eingesetzt:

Der Heizwert in kWh/kg in Abhängigkeit jedes beliebigen Wassergehaltes kann anhand folgender Formel bestimmt werden:

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

Mit: L (Verdampfungswärme Wasser) = 2,44 kJ/kg entspricht 0,68 kWh/kg

w = Wassergehalt in Prozent

atro = Absolut trockenes Holz (W0)

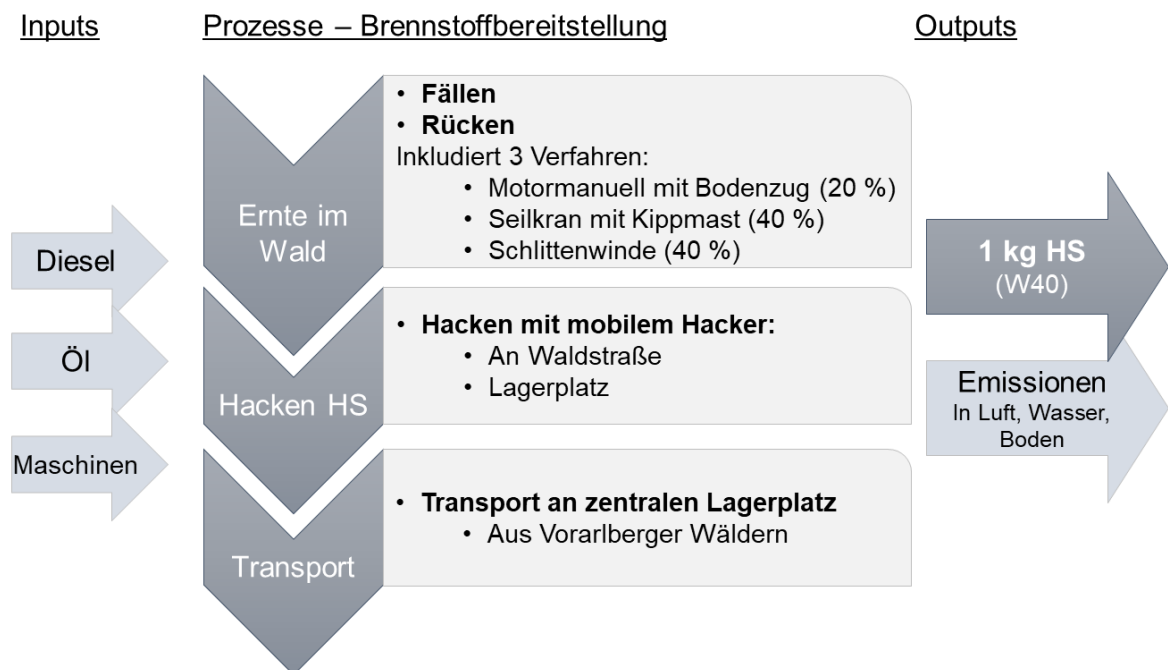
Anhand *Formel (1)* wird die Trockenmasse (TM) sowie die Masse des feuchten Holzes aus dem Wald (W40) bestimmt. Nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse für den Brennstoffbedarf 2016 zusammen:

*Tabelle 10: Zusammenfassung Heizwert, Volumen, Masse, Energieinhalt in Abhängigkeit vom Wassergehalt, 2016*

<b>Wassergehalt</b>	<b>W0</b>	<b>W15</b>	<b>W40</b>
<b><math>H_u</math> (kWh/kg)</b>	5,28	4,39	2,90
<b><math>H_u</math> (kWh/srm)</b>	908,00	816,29	732,00
<b>Volumen (srm)</b>	5.827	6.335	6.610
<b>Masse (t)</b>	1.002	1.179	1.670
<b>Energieinhalt (Heizwert in MWh)</b>	5.291	5.171	4.838

Für die Eingabe in SimaPro wird auf einen bereits ausführlich dokumentierten Vergleichsprozess zurückgegriffen. Ziel ist es, den vorhandenen Vergleichsprozess so anzupassen, dass er die speziellen Verhältnisse der Ernte, Aufbereitung und des Transportes der untersuchten Anlage wiedergibt. So kann einerseits von der umfangreichen vorhandenen Datenlage im SimaPro profitiert und gleichzeitig eine wahrheitsgemäße Darstellung der untersuchten Anlage abgebildet werden.

Die nachfolgende *Abbildung 12* stellt die Hauptprozesse für die Brennstoffbereitstellung sowie deren relevanten In- und Outputs dar. Dabei umfasst die Brennstoffbereitstellung die Ernte im Wald, das Hacken des Holzes zu Hackschnitzeln sowie dem Transport bis an den zentralen Lagerplatz. Nicht enthalten ist die Trocknung und Einlagerung der Hackschnitzel, diese werden erst in der Betriebsphase berücksichtigt.



*Abbildung 12: Übersicht Prozesse Brennstoffbereitstellung, relevante In- und Outputs*

Inputs der dargestellten Prozesse zur Brennstoffbereitstellung sind Treibstoff und Öl für die Ernte und den Transport und die dazu notwendigen Maschinen. Die funktionelle Einheit des Prozesses stellt 1 kg Hackschnitzel W40 dar. Die angewandten Ernteverfahren unterscheiden sich von denen, des Vergleichsprozesses. Bei der untersuchten Anlage werden drei Ernteverfahren angewandt, welche jeweils die beiden Hauptarbeiten Fällen und Rücken enthalten. Mengenmäßig hat die motormanuelle Nutzung (Motorsägen) mit Bodenzug der Stämme an die Waldstraße einen Anteil von 20 % der gesamten Erntemenge. 80 % der Erntemengen teilen sich die beiden halbautomatischen Verfahren, bei welchen einerseits ein Prozessorkopf das Fällen und Entasten übernimmt und eine Art

temporäre Seilbahn die Stämme an die Waldstraße transportiert. Diese Verfahren sind in Hanglagen und unzugänglichen Gegenden von Vorteil. Der verwendete Vergleichsprozess (*Wood chips, wet, measured as dry mass {DE} softwood forestry, spruce, sustainable forest management | Alloc Def, U*) stellt moderne Ernteverfahren auf flachem Gelände dar, wobei die Nutzung einer Vollerntemaschine, dem Harvester, sowie das Rücken an die Waldstraße mittels einem Forwarder übernommen werden kann.

Für die Modellierung in SimaPro werden die beschriebenen Prozesse so angepasst, dass sie den tatsächlichen Aufwand für die Brennstoffbereitstellung der untersuchten Anlage wiedergeben. Dieser tatsächliche Aufwand kann durch Anpassungen der Einsatzzeit (h/kg) der eingesetzten Maschinen zur Bereitstellung der Hackschnitzel vorgenommen werden. Der ggf. höhere Spritverbrauch der halbautomatischen und manuellen Ernteverfahren wird hierfür auf die Einheit h/kg umgerechnet, um diesen in der Modellierung korrekt berücksichtigen zu können. *Tabelle 11* fasst die Eingaben in SimaPro zusammen. Weitere Erläuterungen zu den Prozessen werden nachfolgend beschrieben.

*Tabelle 11: Sachbilanzdaten Betrieb - Brennstoffbereitstellung*

<b>Prozesse</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Eingaben in SimaPro</b>
<b>Ressourceneinsatz aus der Natur</b>		
1. Holz	2,3*10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> stehendes Holz im Wald für 1 kg Hackschnitzel	<i>Wood, soft, standing</i>
2. Energie aus Biomasse	20,23 MJ für Fichtenholz	<i>Energy, gross calorific value, in biomass</i>
<b>Material- und Energieeinsatz aus der Technosphäre</b>		
3. Fällen	7,12*10 <sup>-5</sup> h Einsatzzeit Vollerntemaschine Harvester	<i>Harvesting, forestry harvester {RER}  harvesting, forestry harvester   Alloc Def, U</i>
4. Rücken	9,67*10 <sup>-5</sup> h Einsatzzeit Forwarder	<i>Forwarding, forwarder {RER}  forwarding, forwarder   Alloc Def, U</i>
5. Hacken	3,39*10 <sup>-5</sup> h Einsatzzeit mobiler Hacker an Waldstraße bzw. am Lagerplatz	<i>Wood chipping, chipper, mobile, diesel, at forest road {RER}  wood chipping, mobile chipper, at forest road   Alloc Def, U</i>
6. Transport	0,020 tkm für die Strecke Wald bis Lagerplatz (20 km)	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Alloc Def, U</i>

### 1./ 2. – Ressourceneinsatz aus der Natur

Anhand der ecoinvent-DB wird das Volumen an Holz bestimmt, welches benötigt wird, um ein Kilogramm Hackschnitzel zu erzeugen. Dieser Platzbedarf von 0,0023 m<sup>3</sup> im Wald wird als Ressource aus der Natur in den Prozess aufgenommen (Ecoinvent 2016). Die Daten können für die untersuchte Anlage übernommen werden, da ebenfalls Fichte als Brennstoff verwendet wird.

Die Höhe der Energie in Megajoule (MJ), die in der Biomasse enthalten ist, wird leicht abgeändert. Nach eigenen Berechnungen enthält die eingesetzte Biomasse-TM (Fichte) Energie in Höhe von 20,23 MJ/kg. Der Berechnung liegt der Brennwert von Fichte bei 0 % Wassergehalt mit 5,62 kWh/kg zugrunde (Ik 2005).

### 3. und 4. – Fällen und Rücken

Der Prozess *Fällen* wird in dem Vergleichsprozess durch einen Harvester abgebildet, mit einem Spritverbrauch von 12,8 Liter pro Stunde und einer Einsatzzeit von  $3,86 \cdot 10^{-5}$  Stunden pro Kilogramm Hackschnitzel Output.

Der Prozess *Rücken* wird durch einen Forwarder mit einem Spritverbrauch von elf Liter pro Stunde und einer Einsatzzeit von  $5,24 \cdot 10^{-5}$  Stunden pro Kilogramm dargestellt.

Demgegenüber stehen die drei bereits erwähnten Ernteverfahren, wie sie bei der untersuchten Anlage angewandt werden. Anhand einer detaillierten Datenaufnahme durch einen Mitarbeiter der Anlagenbetreiber (Mäser 2017) werden Daten über Einsatzzeit und Spritverbrauch bereitgestellt. Da die drei Ernteverfahren jeweils Fällen und Rücken enthalten, werden deren Einsatzzeiten anteilig ihrer Verwendung auf den Fäll- sowie Rückeprozess des Vergleichsverfahrens übertragen. Damit werden beide Prozesse *Harvesting* und *Forwarding* an die realen Verhältnisse angepasst, aber gleichzeitig zwei Einsatzmaschinen mit in die Bilanz aufgenommen, welche die beiden Erntemaschinen Seilkran mit Kippmast und Schlittenwinde widerspiegeln.





Aus *Formel (3)* ergibt sich der Faktor 1,85, welcher den mittleren Mehraufwand der drei österreichischen Ernteverfahren ausdrückt und auf die Einsatzzeit (h/kg) des Referenzverfahrens angewandt wird. Mit diesem Aufschlag benötigt der adaptierte Prozess *Harvesting*  $7,12 \cdot 10^{-5}$  Stunden zur Ernte von 1 kg Holz. *Forwarding* entsprechend  $9,67 \cdot 10^{-5}$  h/kg.

## 5. – Hacken

Zur Anpassung des Referenzprozesses *wood chipping* wird erneut die Einsatzzeit sowie der Spritverbrauch der Referenzanlage mit dem tatsächlich eingesetzten Hacker verglichen. *Tabelle 13* stellt die Spritverbräuche in l/kg entsprechend *Formel (2)* dar.

*Tabelle 13: Betrieb - Hackerprozess, Stammdaten, Einsatzzeit und Spritverbrauch des Referenzverfahrens (RZ) und der untersuchten Anlage (AT)*

<b>Verfahren:</b>	<b>Einsatzzeit</b> (h/kg)	<b>Spritverbrauch</b> (l/h)	<b>Spritverbrauch</b> (l/kg)
<b>Wood chipping (RZ)</b>	$0,59 \cdot 10^{-5}$	70,0	$0,41 \cdot 10^{-3}$
<b>Hacken (AT)</b>	$1,79 \cdot 10^{-5}$	120,0	$2,37 \cdot 10^{-3}$

Ein Vergleich der beiden Spritverbräuche ergibt einen Faktor von 5,78, der den Mehraufwand des Hackprozesses der untersuchten Anlage im Verhältnis zum Referenzprozess darstellt. Nachfolgend werden die Eingaben in SimaPro entsprechend der Faktoren zusammengefasst.

*Tabelle 14: Betrieb - Anwendung Faktoren für Mehraufwand der untersuchten Anlage*

	<b>Harvesting</b> (h/kg)	<b>Forwarding</b> (h/kg)	<b>Wood chipping</b> (h/kg)
<b>Referenzeingabe (RZ)</b>	$3,86 \cdot 10^{-5}$	$5,24 \cdot 10^{-5}$	$0,59 \cdot 10^{-5}$
<b>Untersuchte Anlage (AT)</b>	$7,12 \cdot 10^{-5}$	$9,67 \cdot 10^{-5}$	$3,39 \cdot 10^{-5}$

## 6. – Transport

Die Distanz für die Anlieferung der Hackschnitzel beträgt durchschnittlich 20 km aus Vorarlberger Wäldern. Für die HS W40 entsteht anhand der zu transportierenden Massen aus *Tabelle 10* ein Transportaufwand von 33.402 tkm. Wird dieser Transport erneut auf den Output des Prozesses bezogen, ergibt sich ein spezifischer Transportaufwand von 0,02 tkm/kg.

### 3.4.3 Betrieb der Vergasungsanlage

Die dritte Phase der untersuchten Anlage stellt den Betrieb der Vergasungsanlage dar. Hierunter fällt u.a. die Lagerung und Trocknung der waldfrischen Hackschnitzel am zentralen Lagerplatz. Unter Einsatz von Wärme aus einer Biogasanlage und Strom für den Betrieb der Ventilatoren werden die HS von W40 auf W15 getrocknet. Ein Radlader lagert die HS ein und nach wenigen Tagen Trocknungsdauer wieder aus. Anschließend werden diese zum Tagesbunker transportiert, wo sie bis auf W8 weiter getrocknet werden. Die hierfür benötigte Wärme wird dem Output der Anlage direkt entzogen und nicht in die Modellierung aufgenommen, da dies zu Zirkelbezügen führt. Der Effekt entspricht dem der direkten Verwendung der Wärme. Der Eigenstrombedarf der Anlage wird aus dem öffentlichen Netz gedeckt und stammt größtenteils aus der energieintensiven Stickstoffbereitstellung. Der Vergasungsprozess bedarf zusätzlichem Stickstoff, welcher unter Einsatz elektrischer Energie aus der Luft gewonnen wird. Bei Störungen des BHKW, einer Gas-Überproduktion oder beim Anfahren der Anlage wird Flüssiggas (Mischung aus Butan und Propan) als Stützflamme benötigt, um überschüssiges Produktgas abzufackeln. Der Einsatz von Schmieröl fällt größtenteils für die beweglichen Motorteile und den zweimal jährlichen Ölwechsel an. Nach erfolgter Vergasung und Verbrennung des Produktgases im BHKW wird Wärme und Strom erzeugt sowie Holzkohle aus dem Prozess ausgeschieden. Anfallende Emissionen werden in den nachfolgenden Erläuterungen diskutiert. *Abbildung 13* demonstriert die wichtigsten In- und Outputgrößen für den Betrieb der untersuchten Anlage.

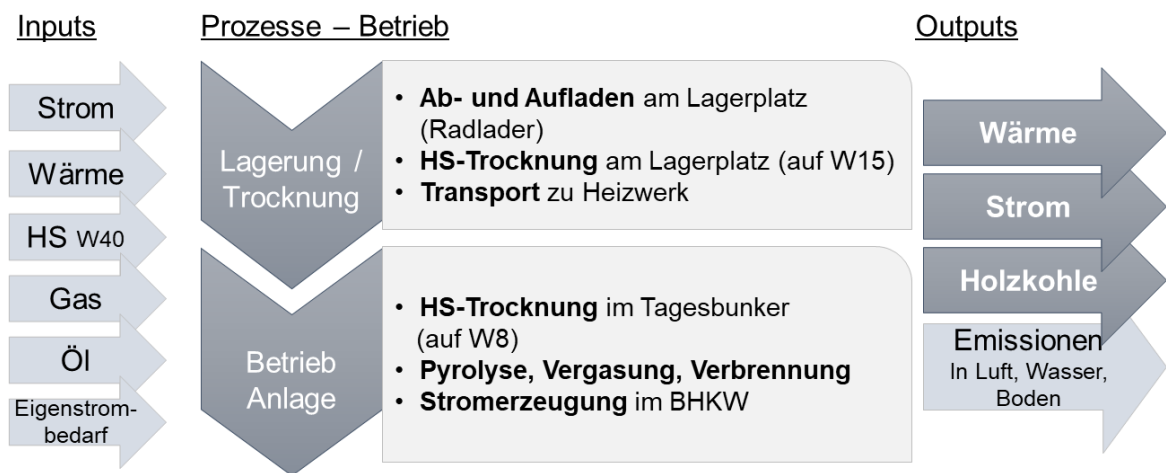


Abbildung 13: Übersicht Prozesse Betrieb der Anlage, relevante In- und Outputs

Tabelle 15 stellt die eingesetzten Betriebsstoffe für das Jahr 2016 dar. Die Betriebsstoffe werden je kWh<sub>FE</sub> angegeben.

Tabelle 15: Sachbilanzdaten Betrieb – Betriebsmittel und Emissionen pro kWh<sub>FE</sub>

Prozesse	Beschreibung	Eingaben in SimaPro
<b>Ressourceneinsatz aus der Natur</b>		
1. Wasser	Wassereinsatz $3,23 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$	<i>Water, fresh (in ground)</i>
<b>Material- und Energieeinsatz aus der Technosphäre</b>		
2. Umschlag	0,0200 tkm für Ab- und Aufladen am Lagerplatz	<i>Transport, tractor and trailer, agricultural {CH}  processing   Alloc Def, U</i>
3. Wärme-Trocknung	0,1070 kWh Wärme aus Biogasanlage zur Trocknung der HS auf W15	<i>Heat, central or small-scale, other than natural gas {AT}  heat and power co-generation, biogas, gas engine   Alloc Def, U</i>
4. Elektrizität-Trocknung	0,0011 kWh für den Betrieb des Ventilators zur Trocknung der HS	<i>Elektrizität aus Flusswasserkraft AT inkl. Transformation auf MS</i>
5. Transport	0,0006 tkm für die Strecke Lagerplatz bis Tagesbunker (2 km)	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   Alloc Def, U</i>
6. Schmieröl	Summe 519,33 l entsprechen $1,401 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$ pro kWh	<i>Lubricating oil {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
7. Stützgas	385 kg Flüssiggas im Jahr 2016 entsprechen $5,23 \cdot 10^{-3} \text{ MJ}$ Propan pro kWh <sub>FE</sub>	<i>Propane, burned in building machine {GLO}  market for   Alloc Def, U</i>
8. Eigenstrombedarf	Summe 160.890 kWh entsprechen 0,0434 kWh pro kWh <sub>FE</sub> . Dient u.a. der Stickstoffbereitstellung	<i>Elektrizität aus Flusswasserkraft AT inkl. Transformation auf MS</i>
<b>Emissionen in Luft, Wasser und Boden</b>		
9. Kohlenmonoxid in der Luft	254,50 mg CO (58mg/Nm <sup>3</sup> )	<i>Carbon monoxide, biogenic</i>

10. Stickstoffmonoxid in der Luft	557,27 mg NO (127mg/Nm <sup>3</sup> )	<i>Nitrogen monoxides</i>
11. Stickoxide in der Luft	960,96 mg NO <sub>x</sub> (219mg/Nm <sup>3</sup> )	<i>Nitrogen oxides</i>
12. Kohlenstoffdioxid	- 64,85 g gebundenes CO <sub>2</sub> aus Holzkohle	<i>Carbon dioxide,</i> <i>biogenic</i>

### 1. – Ressourceneinsatz aus der Natur

Für die Befeuchtung der Kohle werden 120 m<sup>3</sup> Wasser pro Jahr benötigt. Dies entsprechen 3,23\*10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup> je kWh<sub>fE</sub>.

### 2. – Umschlag: Auf- und Abladen am Lagerplatz

Als erster Schritt wird das feuchte Hackgut mit einem Wassergehalt W40 aus LKW bzw. Traktoren am Lagerplatz abgeladen. Nach dem hier stattfindenden Trocknungsprozess wird das Hackgut mit nun W15 wieder aufgeladen und an das Heizwerk transportiert. Dabei werden folgende Daten für die Ermittlung des massen- und distanzbezogenen Aufwands in tkm zugrunde gelegt:

*Tabelle 16: Betrieb - Stammdaten Auf- und Abladen Hackschnitzel am Lagerplatz*

<b>Fassungsvolumen Schaufel</b> (V <sub>s</sub> )	5,00 srm
<b>Distanz pro Schaufel</b> (s)	0,02 km

$$tkm HS = \left( m_{W40} * \frac{V_{W40}}{V_S} + m_{W15} * \frac{V_{W15}}{V_S} \right) * s \quad (4)$$

Mit: V<sub>s</sub>= Fassungsvolumen Schaufel                      V<sub>w</sub>= Volumen HS (srm)

s= Distanz

Durch Einsetzen der Daten aus *Tabelle 16* ergibt sich ein Aufwand für die Lagerung der Hackschnitzel von 74.030,10 tkm. Bezogen auf den Output dieser Phase (1 kg HS W15) ergibt sich ein spezifischer Aufwand von 0,063 tkm/kg. Wird dies wiederum auf eine kWh<sub>fE</sub> umgelegt, werden 0,02 tkm aufgewendet.

### 3. und 4. - Trocknung HS in der Lagerhalle

Die Hackschnitzel aus eigener Produktion sowie die eingekauften Mengen werden in der oben beschriebenen Lagerhalle am Standort *Untere Fängen* getrocknet. Für die Trocknung der gelagerten Hackschnitzel wird Wärme aus einer am gleichen Standort befindlichen

Biogasanlage verwendet. In fünf Tagen (120 Stunden) werden 300 srm Hackschnitzel getrocknet. Die hierfür benötigte Wärme wird mit einer Dauerleistung von 150 kW<sub>therm.</sub> bereitgestellt. Pro srm werden somit 60 kWh Wärme benötigt. Strom wird für den Betrieb eines Ventilators eingesetzt, ebenfalls über fünf Tage Trocknungszeit für 300 srm Hackgut. Der Ventilator weist eine Leistung von 1,5 kW<sub>el</sub> auf. Folglich wird 1 srm mit 0,6 kWh elektrisch belüftet. Für das Jahr 2016 ergibt sich ein Trocknungsaufwand von 396,58 MWh Wärme und 3,97 MWh Elektrizität.

#### 5. – Transport

Die getrockneten HS W15 werden vom Lagerplatz zum Tagesbunker transportiert, wofür ein Aufwand von 2.358 tkm berechnet wird. Die Distanz von zentralem Lagerplatz zur Vergasungsanlage beträgt 2 km.

#### 6. und 7. – Schmieröl und Gas als Betriebsmittel

Wie bereits erläutert, wird für den Betrieb der Anlage im Jahr 2016 Schmieröl für Ölwechsel sowie für Verluste im täglichen Betrieb eingesetzt. In Summe entsprechen die Mengen 519,33 kg, bezogen auf 1 kWh<sub>FE</sub> entspricht dies  $1,40 \cdot 10^{-4}$  kg.

#### 8. Eigenstrombedarf

Der Eigenstrombedarf der Anlage wird dem öffentlichen Netz entnommen und entspricht 0,043 kWh pro kWh<sub>FE</sub>. Der Eigenstrombedarf stammt größtenteils aus der energieintensiven Stickstoffbereitstellung, welcher für den Vergasungsprozess benötigt wird. Unter Einsatz elektrischer Energie kann der Stickstoff aus der Außenluft gewonnen werden.

#### 9. – 11. – Emissionen in die Luft

Neben gesetzlich verpflichtenden Abgasmessungen wird eine detaillierte Messung im Juni 2017 durch eine Mitarbeiterin des Management Center Innsbruck (MCI) bereitgestellt (Dumfort 2017). Bei den zur Verfügung gestellten Daten handelt es sich um Emissionswerte in Milligramm pro Normkubikmeter (mg/Nm<sup>3</sup>). Die Umrechnung der Konzentration in Milligramm pro Kilowattstunde wird nachfolgend erläutert, Ergebnisse sind in *Tabelle 17* zusammengefasst.

*Tabelle 17: Emissionen in die Luft, Konzentration in mg/Nm<sup>3</sup> und mg/kWh, Messung durch MCI 2017*

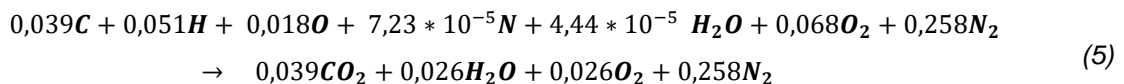
<b>Abgaskomponente</b>	<b>Konzentration (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Konzentration (mg/kWh)</b>
<b>CO</b>	58	254,5
<b>NO</b>	127	557,3
<b>NOx</b>	219	960,9

Normkubikmeter beziehen sich auf eine Referenztemperatur von 25 °C. Um die abgegebenen Emissionen in das Gesamtsystem aufnehmen zu können, werden diese auf den Output Energie in kWh bezogen. Hierfür ist die Ermittlung des Volumenstroms Voraussetzung, welcher anhand der nachfolgend beschriebenen Verbrennungsgleichung ermittelt werden kann. Die Verbrennungsgleichung enthält die Stoffmengen in Kilomol (kmol) pro 1 kg eingesetztem Brennstoff.

Tabelle 18: Verbrennungsgleichung Holz - Massen und Stoffmengen

Bestandteile Holz	Massenanteile Holz atro (%)	Massenanteile Holz W8 (%)	Molare Masse (kg/kmol)	Abgasmenge pro kg Holz (kmol/kg)
<b>C</b>	50,78	43,16	12,011	0,0389
<b>H</b>	5,63	5,07	1,008	0,0514
<b>O</b>	42,95	38,66	22,045	0,0179
<b>N</b>	0,11	0,10	14,005	$7,23 \cdot 10^{-5}$
<b>Asche</b>	0,52	0,47	-	-
<b>H<sub>2</sub>O</b>	0,00	8,00	18,020	$4,44 \cdot 10^{-5}$

Anhand der Stoffmengen der bekannten Inputgrößen werden die Stoffmengen der Outputgrößen ermittelt. Die nachfolgende *Formel (5)* stellt die Verbrennungsgleichung bei einem Verbrennungsluftverhältnis von 1,6 dar.



Mit der idealen Gasgleichung  $p \cdot V = R \cdot T \cdot n$  wird der Volumenstrom der Verbrennungsluft mit 8,60 Nm<sup>3</sup> pro kg Brennstoff sowie des Abgases mit 13,80 Nm<sup>3</sup> pro kg bestimmt. Anhand der ermittelten Größen kann das Abgasvolumen auf eine kWh<sub>E</sub> bezogen werden. Dieses multipliziert mit der Emissions-Konzentration (mg/Nm<sup>3</sup>) ergibt die gesuchte Konzentration pro kWh (mg/kWh). Die Ergebnisse sind bereits in *Tabelle 17* zusammengefasst.

## 12. Gebundener Kohlenstoffdioxid – CO<sub>2</sub>-Senke

Die Rückstände aus dem Vergasungsprozess bestehen zu 91 % aus Holzkohle und zu 9 % Anteil Asche (Umweltinstitut Vorarlberg 2015). Die Holzkohle besteht aus reinem Kohlenstoff, der an Abnehmer verkauft wird, welche die Holzkohle als Düngung in den Boden einbringen bzw. als Tierfutterergänzung einsetzen. Aktuelle Forschungen mit Holzkohle aus Holzvergasungsanlagen weisen in ersten Versuchen ein gesteigertes

Pflanzenwachstum nach, unter Zugabe von zusätzlichen Nährstoffen um bis zu 60 % (Hupfau et al. 2016).

Durch diese Verwendungsform wird der Kohlenstoff langfristig gebunden und kann nicht mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid oxidieren. Pro kWh<sub>fE</sub> der untersuchten Anlage werden 64,8 g CO<sub>2</sub> gebunden. Nachfolgend werden die Rechenschritte kurz erläutert.

Der Anlage werden 424 m<sup>3</sup> Kohle inklusive Asche entnommen. Bei einer Dichte von 170 kg/m<sup>3</sup> und einem Energieinhalt von 8 kWh/kg (Ilg 2017) ergibt sich eine Energiemenge von 524.742 kWh.

Anhand der Daten aus *Tabelle 19* wird die Menge an gebundenem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) ermittelt.

*Tabelle 19: Betrieb - Daten Holzkohle und Asche für Ermittlung Kohlenstoffdioxid-Bindung, 2016*

<b>Masse Holzkohle</b>	72,08	t/a
<b>Anteil reiner Kohlenstoff (C)</b>	91	%
<b>Anteil Asche</b>	9	%
<b>Masse Kohlenstoff</b>	65,59	t/a
<b>Masse Asche</b>	6,49	t/a
<b>Molare Masse C</b>	12,01	g/mol
<b>Molare Masse CO<sub>2</sub></b>	44,01	g/mol
<b>Massenbezogener Faktor CO<sub>2</sub></b>	3,66	-
<b>Output Energie (Strom und Wärme)</b>	3.706.416	KWh/a

Damit werden 240 t CO<sub>2</sub> gebunden, bezogen auf eine kWh<sub>fE</sub> entspricht dies 64,8 g/kWh<sub>fE</sub>.



### 3.4.4 Zusammenführung der Phasen

An dieser Stelle wird die Zusammenführung der Phasen Konstruktion, Brennstoffbereitstellung und Betrieb erläutert. Die Abfallbehandlung ist bereits in der Konstruktion der Anlagenkomponenten enthalten und wird nicht separat ausgewiesen. Die Verbindung der drei Phasen zu einem Prozess ergibt letztendlich ein Gesamtbild an Umweltwirkungen, die über den gesamten Lebenszyklus der untersuchten Anlage anfallen. Diese werden schließlich auf den Output der Anlage, 1 kWh<sub>fE</sub>, bezogen. Nachfolgendes Schema stellt die vorgelagerten funktionellen Einheiten der Phasen Konstruktion und Brennstoffbereitstellung inklusive deren Prozesse sowie die Eingaben in SimaPro dar. Für die Erzeugung einer Kilowattstunde werden  $2,7 \cdot 10^{-7}$  VGA, 0,45 kg Hackschnitzel und die dargestellten Betriebsprozesse benötigt. In der dritten Phase werden außerdem die anfallenden Emissionen während des Betriebs sowie das gebundene CO<sub>2</sub> eingegeben. Emissionen, die während der Konstruktionsphase sowie der Hackschnitzel-Herstellung entstehen, sind in diesen Prozessen bereits hinterlegt.

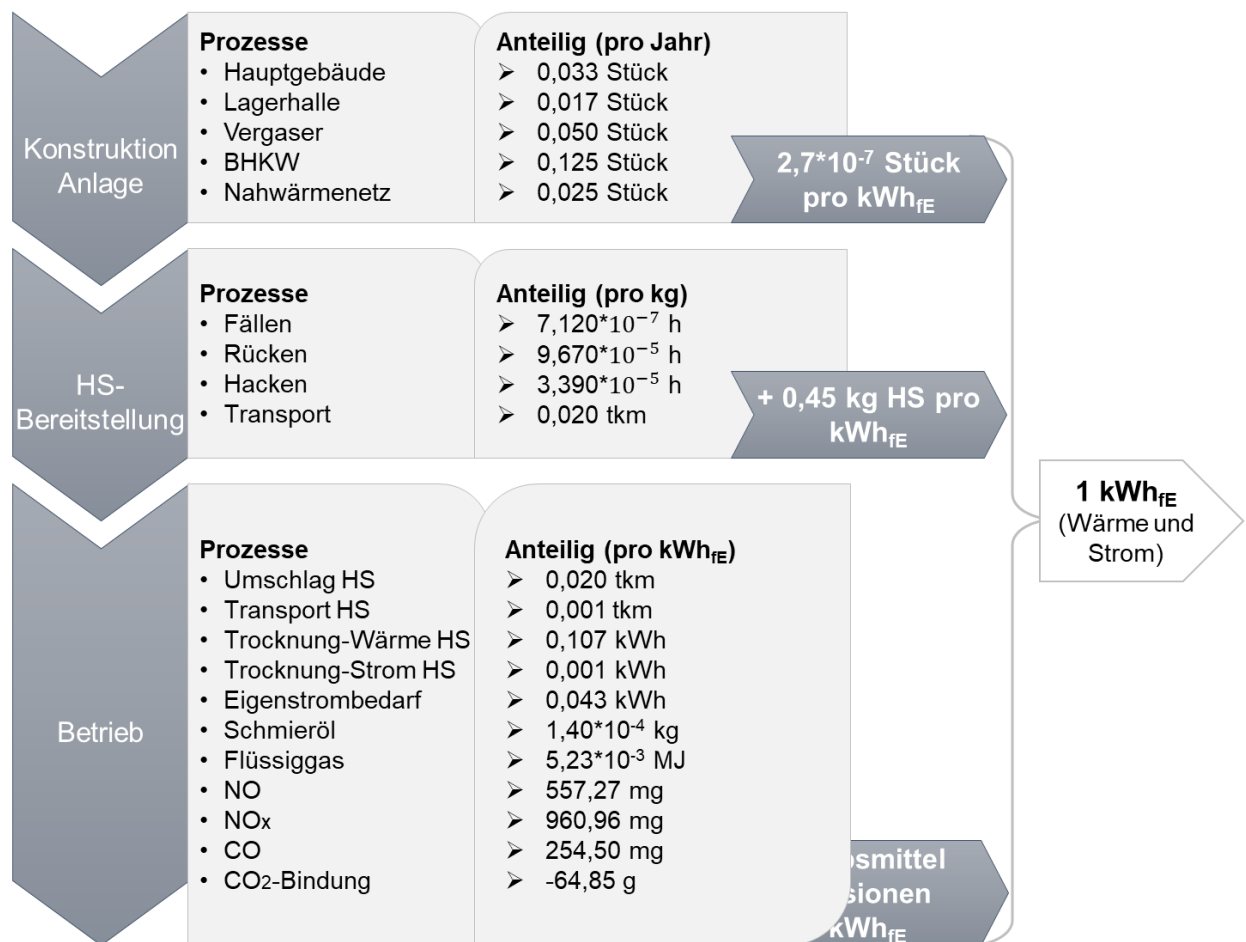


Abbildung 14: Zusammenführung Konstruktion, Brennstoffbereitstellung und Betrieb - Eingaben in SimaPro

## 4. Potentielle Umweltwirkungen der untersuchten Anlage

Anhand der aufgenommenen Sachbilanzdaten aus *Kapitel 3.4* werden in diesem Abschnitt Wirkungskategorien ausgewählt, welche die Umwelteinflüsse der untersuchten Anlage quantifizierbar machen. Die Zuordnung der Sachbilanzdaten zu Wirkungskategorien (Klassifizierung) und weiterhin zu Wirkungsendpunkten hängt von der Wahl der Methode der Wirkungsabschätzung ab. Diese Auswahl wird im nächsten Schritt diskutiert. Weiterhin werden die Ergebnisse der untersuchten Anlage dargestellt. Dank verschiedener Sensitivitätsanalysen kann letztlich der Einfluss einzelner Prozesse auf die Ergebnisse bewertet werden.

### 4.1 Methode der Wirkungsabschätzung

Die verwendete Software SimaPro bietet unterschiedliche Methoden der Wirkungsabschätzung. Dabei wird zwischen europäischen und nordamerikanischen Methoden unterschieden. Da sich die untersuchte Anlage in Europa befindet, kommen die folgenden acht europäischen Methoden (Auflistung *Tabelle 20*) in Frage:

*Tabelle 20: Auswahl europäischer Methoden der Wirkungsabschätzung in SimaPro*

• CML-IA	• EPS D2015 und EPS DX2015
• Ecological Scarcity 2013	• ILCD 2011 Midpoint+
• EDIP 2003	• Impact 2002+
• EPD 2013	• ReCiPe

Die häufig verwendete und in Facharbeiten zitierte ReCiPe-Methode, welche Nachfolger der bereits erwähnten Eco Indicator-99-Methode ist, wird für die Modellierung im Hauptszenario verwendet. Weiterhin wird die Midpoint-Ebene betrachtet, da diese durch die Darstellung gängiger Wirkungskategorien eine gute internationale Vergleichbarkeit ermöglicht. Zusätzlich wird die Perspektive *Hierarchist* (h) gewählt. Diese bildet ein typisches Szenario in Hinblick auf Zeithorizont, menschliches Verhalten oder politischer Grundsätze ab. Die Variante *Individualist* (i) unterstellt einen sehr kurzen Zeithorizont mit weniger Wirkungskategorien. Demgegenüber steht *Egalitarian* (e) für einen vorbeugenden Ansatz mit weitreichender Zukunftsausrichtung und Wirkungskategorien, die noch nicht komplett ausgreift sind. Auf der Midpoint-Ebene (h) werden aus 18 vorhandenen Wirkungskategorien sieben für die untersuchte Anlage ausgewählt und näher betrachtet. Die Auswahl fällt auf Kategorien, die vor allem durch den Betrieb der untersuchten Anlage betroffen sind oder aus ortsbezogenen Gesichtspunkten relevante Einflüsse auf die Umwelt haben.

Beispielsweise spielen die Wirkungskategorien zu radioaktiver Strahlung oder Vergiftung der Meere keine Rolle für die untersuchte Anlage. Informationen zu den verwendeten Wirkungskategorien werden durch (Klöpffer und Grahl 2009) und (SimPro 2016) bereitgestellt und in Tabelle 21 festgehalten.

Tabelle 21: ReCiPe Midpoint (h) – Auszug schädlicher Substanzen, Wirkungskategorien und Einheiten

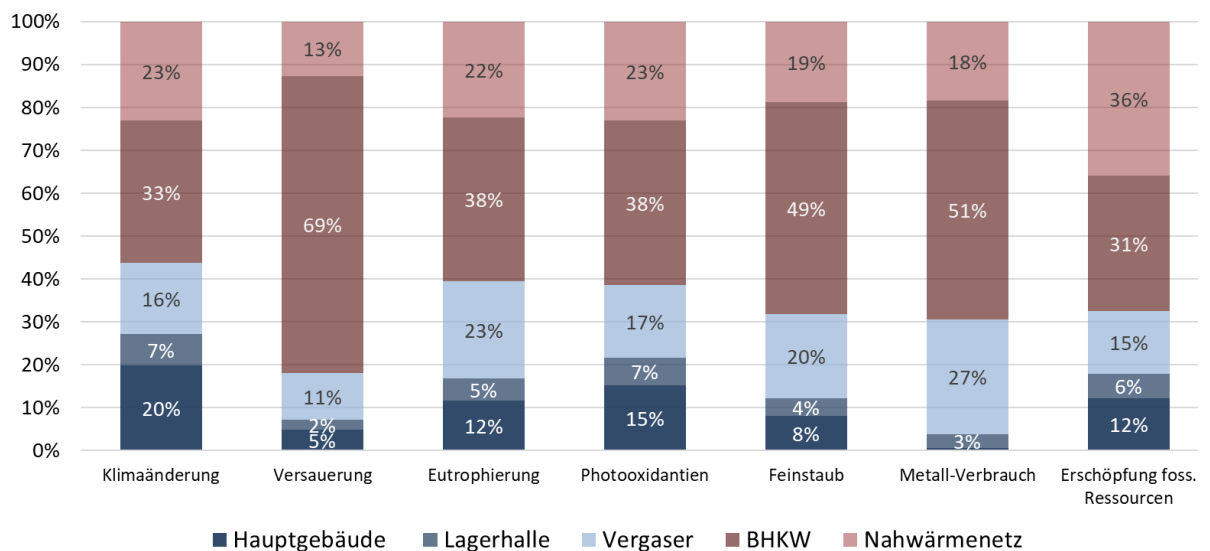
<b>Emissionen / Substanzen</b>	<b>Wirkungs-kategorie</b>	<b>Indikatoremodell</b>	<b>Einheit</b>
CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O O <sub>3</sub> , HFC, ...	Klimaänderung	Treibhauspotential (GWP) auf 100 Jahre Zeithorizont (für Hierarchist)	kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent
NO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>x</sub> SO <sub>2</sub> , SO, SO <sub>x</sub>	Versauerung Boden	Versauerungspotential (AP) verursacht durch Emissionen gewichtet nach weltweiter Aufnahmefähigkeit für SO <sub>2</sub>	kg SO <sub>2</sub> -Äquivalent
Nitrate, NH <sub>3</sub> , CFC, HCFC...	Aquatische Eutrophierung	Aufnahmefähigkeit der Umwelt von Stickstoffemissionen	kg N-Äquivalent
CO, VOC NO <sub>2</sub> NO, Isobutan	Bildung Photooxidantien / Sommersmog	Marginale Änderung in europäischer 24h-Durchschnittskonzentration von Ozon (dCO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> ) verursacht durch Emissionsänderungen der Substanz x (dMx in kg/a)	kg NMVOC
Partikel > 2,5 und < 10 µm SO, SO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> Ammonium	Feinstaub	Aufgenommener/eingeatmeter Anteil Partikel in Bezug auf emittierte Partikel	kg PM10-Äquivalent
Gas Öl Kohle, ...	Erschöpfung fossiler Ressourcen	Verbrauch bezogen auf die Extraktion fossiler Ressourcen mit einem Heizwert unter 42 MJ	kg Öl-Äquivalent
Metalle	Metall-Verbrauch	Abnahme der Qualität von Edelmetallen	kg Fe-Äquivalent

## 4.2 Wirkungsabschätzung der untersuchten Anlage

Es gilt vorab festzuhalten, dass es sich um potentielle Umweltwirkungen handelt und diese von der Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode und einer Vielzahl weiterer Unsicherheitsfaktoren bestimmt sind. Der geringe Orts- und Zeitbezug und weitere Einschränkungen einer Ökobilanz wird in *Kapitel 4.6* näher erläutert.

### 4.2.1 Konstruktion

Zur Analyse der Phase Konstruktion wird die funktionelle Einheit *eine Vergasungsanlage*, bezogen auf ein Jahr, verwendet, welche den Bau aller Hauptkomponenten anteilig deren Nutzungszeiten darstellt. *Abbildung 15* fasst die Auswirkungen der Bauphase auf die oben festgelegten Wirkungskategorien prozentuell zusammen, während *Tabelle 22* die Absolutwerte der ausgewählten Wirkungsindikatoren ausgibt. Weitere Darstellungen befinden sich im Anhang.



*Abbildung 15: Wirkungsabschätzung Konstruktion: Prozentuelle Anteile Anlagenkomponenten bezogen auf ein Jahr*

*Tabelle 22: Wirkungsabschätzung Konstruktion: Absolutwerte Anlagenkomponenten bezogen auf ein Jahr*

Wirkungs-kategorie	Einheit	Haupt-gebäude	Lager-halle	Vergaser	BHKW	Nahwärme-netz
Klimaänderung	kg CO <sub>2</sub> eq	3.968	1.499	3.311	6.672	4.649
Versauerung	kg SO <sub>2</sub> eq	10	5	22	142	26
Eutrophierung	kg N eq	1	0	1	2	1

Photooxidantien	kg NMVOC	12	5	14	32	19
Feinstaub	kg PM <sub>10</sub> eq	7	3	16	41	16
Metall-Verbrauch	kg Fe eq	85	547	4.416	8.464	3.057
Erschöpfung foss. Res.	kg Öl eq	635	293	771	1.647	1.881

Die größte Auswirkung in jeder der untersuchten Kategorien hat die Konstruktion des BHKW. Mit 33 bis 69 % der gesamten Umweltwirkungen steht dieses an Platz Eins in der Phase der Konstruktion. Hintergrund dabei ist die kurze Nutzungszeit von lediglich acht Jahren. Würden die Komponenten der Gesamtanlage ohne Berücksichtigung deren Nutzungszeiten betrachtet, verändern sich die Anteile gegenüber der gezeigten Aufteilung aus *Abbildung 15* stark. Positive bzw. negative Änderungen sind in *Tabelle 23* anhand der Vorzeichen gekennzeichnet. Das BHKW wird in jeder Kategorie entlastet, da für diese Gegenüberstellung die Nutzungszeit keinen Einfluss mehr hat. Da die Nutzungs- und damit Lebenszeit der Anlagenkomponenten jedoch entscheidend für deren Umweltwirkungen sind, dient *Tabelle 23* nur als Erklärungshilfe und soll nicht den hohen Anteil der Emissionen des BHKW in Frage stellen.

*Tabelle 23: Wirkungsabschätzung Konstruktion: Änderungen der Auswirkungen bei unberücksichtigter Nutzungszeit*

<b>Wirkungs-kategorien</b>	<b>Hauptgebäude</b>	<b>Lagerhalle</b>	<b>Vergaser</b>	<b>BHKW</b>	<b>Netz</b>
Klimaänderung	+28 %	+28 %	-14 %	-66 %	+71 %
Versauerung	+101 %	+101 %	+34 %	-46 %	+168 %
Eutrophierung	+39 %	+39 %	-7 %	-63 %	+86 %
Photooxidantien	+35 %	+35 %	-10 %	-64 %	+80 %
Feinstaub	+58 %	+58 %	+5 %	-58 %	+110 %
Metall-Verbrauch	+67 %	+67 %	+11 %	-55 %	+123 %
Erschöpfung foss. Ressourcen	+19 %	+19 %	-21 %	-68 %	+59 %

Asphalt und Beton haben die größten Auswirkungen auf den Bau des Hauptgebäudes und der Lagerhalle, in allen Wirkungskategorien. Weitere Aufschlüsselungen der Unterprozesse der Phase Konstruktion befinden sich im Anhang.

Stahl spielt für die Konstruktion des Vergasers die größte Rolle. Für den Stahleinsatz des Vergasers und die benötigten Geländerkonstruktionen wird ein Anteil von knapp 80 % in der Kategorie Klimaänderung bilanziert. In Absolutwerten verursacht der Einsatz der

Stahlmengen einen Ausstoß von 52.560 kg CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen, ohne Berücksichtigung der Nutzungszeit des Vergasers. Vergleichsweise wird die Konstruktion aller Anlagenkomponenten (Gebäude, Vergaser, BHKW, Netz) in Summe mit 470 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen belastet (siehe Anhang).

Für das BHKW fällt die Herstellung des Schaltschranks und der Konverter bei den Wirkungskategorien Klimaänderung und Erschöpfung fossiler Ressourcen auf. Es wird u.a. Platin, Rhodium und Palladium eingesetzt, sowie Elektrizität und Wärme aus nicht erneuerbaren Quellen für deren Montage benötigt.

Die Konverter verursachen ebenfalls starke Umweltwirkungen in der Kategorie Versauerung der Böden. Hintergrund ist der Ausstoß an Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden bei deren Produktion.

Der Bedarf an Stahl für die Netzleitungen wirkt sich für das Nahwärmenetz in jeder Kategorie am stärksten aus. Lediglich die Erschöpfung fossiler Ressourcen wird mit knapp 60 % durch den Bedarf an Asphalt dominiert.

Die Abfallbehandlung der eingesetzte Materialien beschränkt sich lediglich auf die Deponierung oder Verbrennung von Materialien. Es wird nicht von Recyclingszenarien ausgegangen. Einzig für den Bau der Lagerhalle wird ein Teil des Holzes aus Altholz wiederverwertet, weshalb bspw. in der Kategorie Klimaänderung 3 % CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen eingespart werden können. Die meisten eingesetzten Rohmaterialien wie bspw. Eisen enthalten jedoch prinzipiell recycelte Anteile. Der in den meisten Prozessen eingesetzte Stahl (*steel, unalloyed*) besteht zum Beispiel zu 18,7 % aus recyceltem Stahlschrott.

#### **4.2.2 Brennstoffbereitstellung**

Für die Brennstoffbereitstellung wird die Produktion der Hackschnitzel im Wald inklusive Hacken und Transport an den zentralen Lagerplatz betrachtet. Trocknungsprozesse werden im zweiten Teil der Betriebsphase angerechnet. Die funktionelle Einheit der Brennstoffbereitstellung ist *ein Kilogramm Hackschnitzel W40*. *Abbildung 16* stellt die prozentuellen Anteile der Prozesse an den Wirkungskategorien dar, *Tabelle 24* die Absolutwerte.

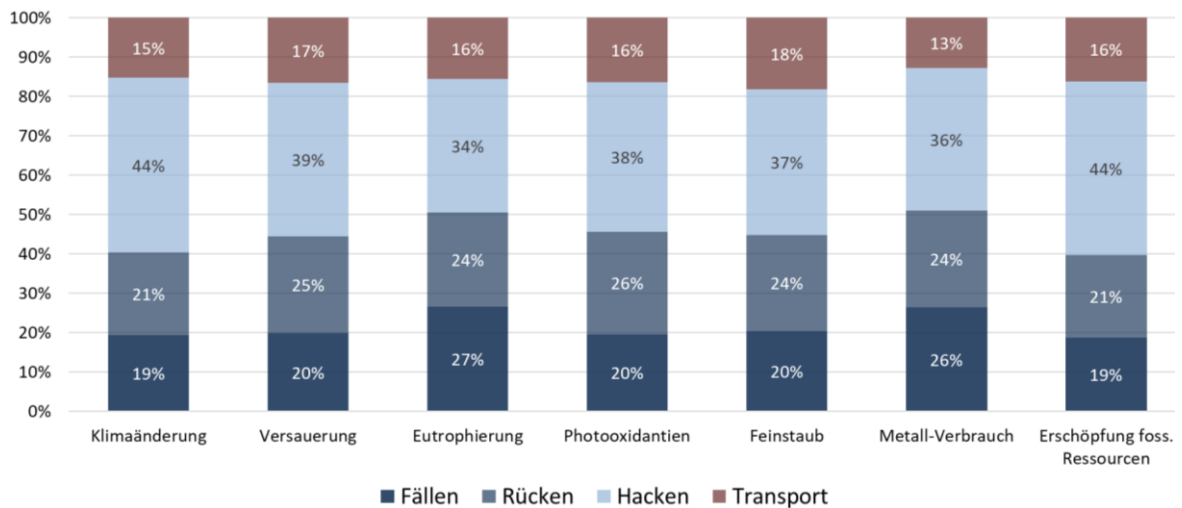


Abbildung 16: Wirkungsabschätzung Brennstoffbereitstellung: Prozentuelle Anteile der Ernteprozesse pro 1 kg HS W40

Tabelle 24: Wirkungsabschätzung Brennstoffbereitstellung: Absolutwerte der Ernteprozesse für 1 kg HS W40

Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Fällen	Rücken	Hacken	Transport
<b>Klimaänderung</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	2,11E-2	4,07E-3	4,43E-3	9,36E-3	3,23E-3
<b>Versauerung</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	7,61E-5	1,51E-5	1,87E-5	2,96E-5	1,27E-5
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	4,12E-6	1,10E-6	9,81E-7	1,40E-6	6,42E-7
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	1,07E-4	2,09E-5	2,77E-5	4,05E-5	1,75E-5
<b>Feinstaub</b>	kg PM <sub>10</sub> eq	3,57E-5	7,28E-6	8,72E-6	1,32E-5	6,53E-6
<b>Metall-Verbrauch</b>	kg Fe eq	8,60E-4	2,27E-4	2,11E-4	3,12E-4	1,10E-4
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	kg oil eq	7,30E-3	1,37E-3	1,53E-3	3,23E-3	1,18E-3

Der Prozess des Hackens hat in jeder Kategorie die höchsten Auswirkungen. Dies beruht auf dem höheren Spritverbrauch im Vergleich zu den sonstigen Prozessen. Dabei sind hiermit die direkten Emissionen, die während dem Betrieb der Maschinen freierwerden, zu verstehen.

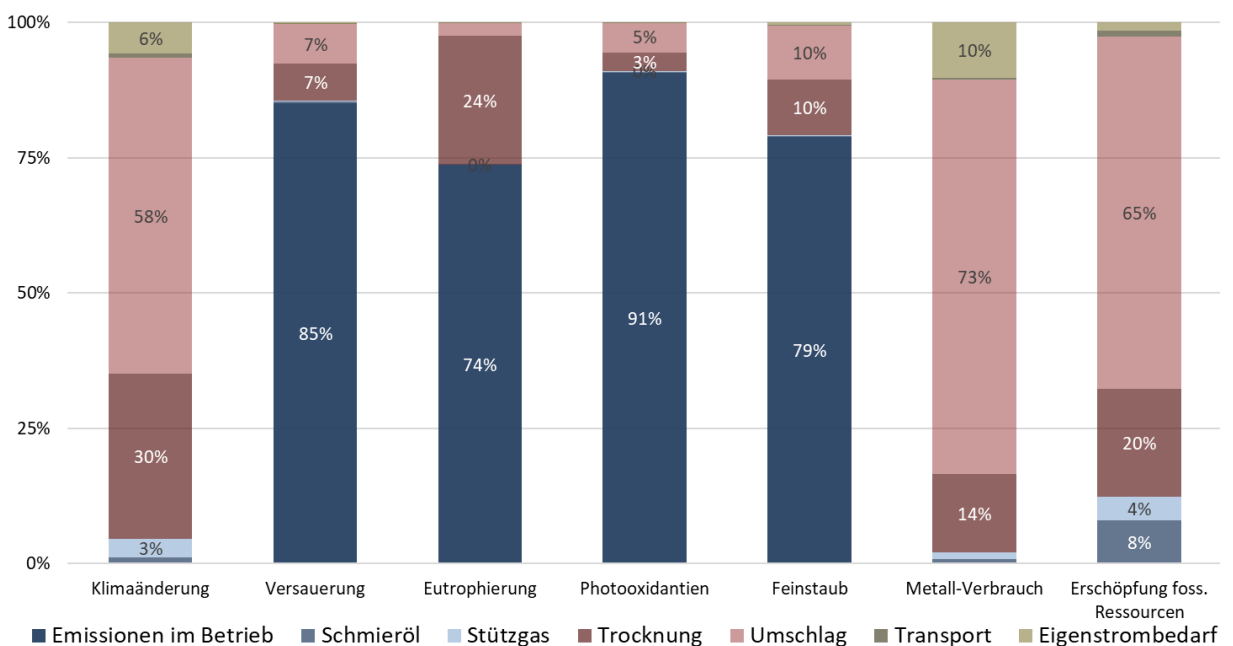
Wird der Gesamtprozess der Brennstoffbereitstellung betrachtet und damit auch die indirekten Emissionen, die während der Vorketten entstehen, fällt die Produktion von Diesel besonders auf (enthält u.a. die Förderung und Raffinerie von Öl). Mit 12,7 % hat diese den größten Anteil der gesamten CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen. Ebenfalls relevant für alle vier Unterprozesse der Brennstoffbereitstellung ist die Herstellung von Stahl, welche rund 3 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen in den Vorketten verursacht. Der Stahl wird für die Herstellung der Ernte- und Transportmaschinen benötigt, welche anteilig in den Unterprozessen berücksichtigt sind.

### 4.2.3 Betrieb der Vergasungsanlage

Die funktionelle Einheit der Betriebsphase ist 1 kWh<sub>fE</sub> und stellt damit die erzeugte Wärme und Strom als den endgültigen Nutzen der Anlage dar. Die Prozesse bzw. deren Inputgrößen werden an dieser Stelle auf ihre Umweltwirkungen untersucht.

#### Ohne CO<sub>2</sub>-Bindung (Basis 1)

Um die untersuchte Anlage mit ähnlichen Anlagen vergleichen zu können, wird für das Basisszenario 1 (kurz Basis 1) die Bindung des Kohlenstoffs außer Acht gelassen. Dabei werden 13 g CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen pro kWh<sub>fE</sub> frei. *Abbildung 17* zeigt die Auswirkungen im Betrieb auf die bekannten Wirkungskategorien.



*Abbildung 17: Wirkungsabschätzung Betrieb, ohne CO<sub>2</sub>-Bindung: Prozentuelle Anteile der Betriebsprozesse pro kWh<sub>fE</sub>*

#### Mit CO<sub>2</sub>-Bindung (Basis 2)

Wie bereits erwähnt, kann der untersuchten Anlage die Bindung von CO<sub>2</sub> durch die Ausbringung der Holzkohle in den Boden gutgeschrieben werden. Durch die Gutschrift der Holzkohle werden 65 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>fE</sub> gebunden. Bei der ausschließlichen Betrachtung der Betriebsphase, werden abzüglich der emittierten 13 g CO<sub>2</sub> noch 52 g CO<sub>2</sub> pro kWh<sub>fE</sub> gebunden. Es ändert sich lediglich die Wirkungskategorie Klimaänderung, die anderen Kategorien bleiben unbeeinflusst. *Abbildung 18* stellt die Anteile der Prozesse an den Wirkungskategorien mit CO<sub>2</sub>-Bindung dar.



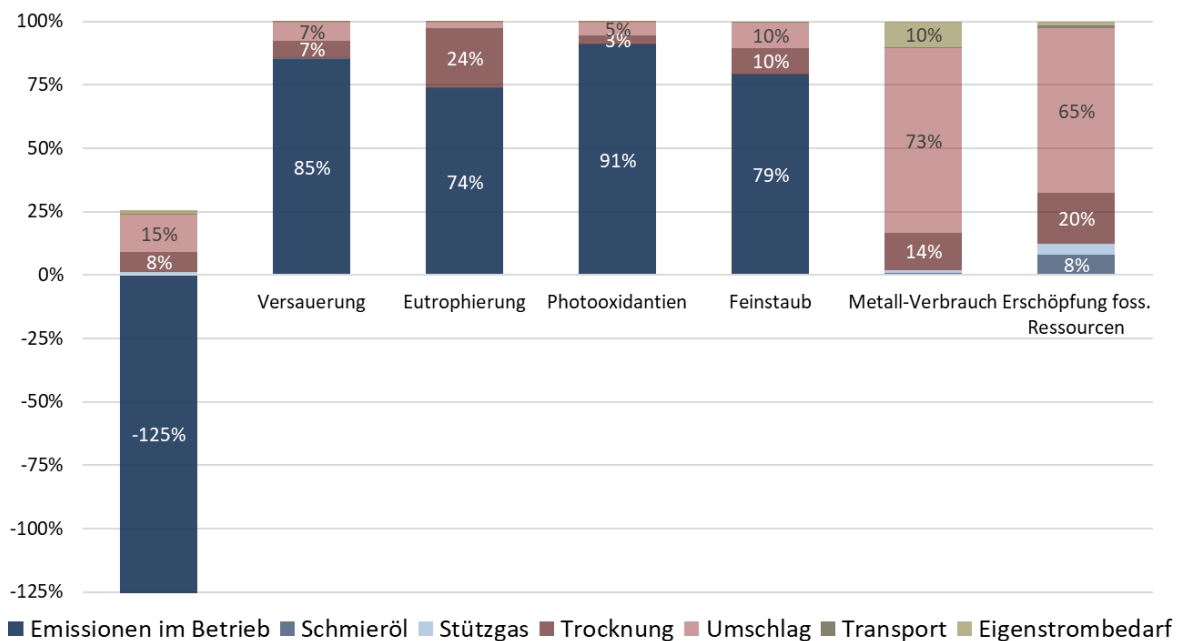


Abbildung 18: Wirkungsabschätzung Betrieb, mit CO<sub>2</sub>-Bindung: Prozentuelle Anteile der Betriebsprozesse pro kWh<sub>IE</sub>

Nachfolgende Tabelle gibt die absoluten Emissionen im Betrieb wieder. Die Unterschiede je nach CO<sub>2</sub>-Bindungsmodell sind darin ersichtlich.

Tabelle 25: Wirkungsabschätzung Betrieb: Absolutwerte der Betriebsprozesse mit und ohne CO<sub>2</sub>-Bindung

Wirkungskategorie	Summe	Emissionen im Betrieb	Schmieröl	Stützgas	Trocknung
<b>Klimaänderung</b>					
Ohne CO <sub>2</sub> -Bindung	1,31E-2	-	1,58E-4	4,46E-4	4,00E-3
Mit CO <sub>2</sub> -Bindung	-5,17E-2	-6,48E-2	1,58E-4	4,46E-4	4,00E-3
<b>Versauerung</b>	6,32E-4	5,38E-4	1,22E-6	1,04E-6	4,37E-5
<b>Eutrophierung</b>	9,63E-5	7,09E-5	3,33E-8	3,90E-8	2,29E-5
<b>Photooxidantien</b>	1,07E-3	9,73E-4	2,20E-6	1,19E-6	3,66E-5
<b>Feinstaub</b>	2,68E-4	2,11E-4	4,45E-7	4,31E-7	2,75E-5
<b>Metall-Verbrauch</b>	1,28E-3	-	1,03E-5	1,59E-5	1,85E-4
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	3,18E-3	-	2,55E-4	1,39E-4	6,32E-4

Fortsetzung *Tabelle 25*:

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>Summe</b>	<b>Umschlag</b>	<b>Transport</b>	<b>Eigenstrombedarf</b>
<b>Klimaänderung</b>				
Ohne CO <sub>2</sub> -Bindung	1,31E-2	7,67E-3	1,03E-4	7,54E-4
Mit CO <sub>2</sub> -Bindung	-5,17E-2	7,67E-3	1,03E-4	7,54E-4
<b>Versauerung</b>	6,32E-4	4,60E-5	4,03E-7	1,40E-6
<b>Eutrophierung</b>	9,63E-5	2,32E-6	2,04E-8	7,61E-8
<b>Photooxidantien</b>	1,07E-3	5,78E-5	5,55E-7	1,04E-6
<b>Feinstaub</b>	2,68E-4	2,67E-5	2,08E-7	1,27E-6
<b>Metall-Verbrauch</b>	1,28E-3	9,30E-4	3,51E-6	1,31E-4
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	3,18E-3	2,07E-3	3,75E-5	4,56E-5

Die gemessenen Emissionen im Betrieb, die in die Luft und Abwasser gelangen, verursachen die größten Auswirkungen auf die Versauerung des Bodens, aquatische Eutrophierung, Bildung von Photooxidantien sowie die Bildung von Feinstaub.

Der Umschlag der Hackschnitzel am Lagerplatz hat in den verbleibenden drei Kategorien Klimaänderung, Metall-Verbrauch und Erschöpfung fossiler Ressourcen die höchsten Anteile. In der Kategorie Klimaänderung verursacht der Umschlag bspw. 58 % der Umweltwirkungen. Dies ist leicht nachzuvollziehen, da der Betrieb des Radladers einen hohen Spritverbrauch und damit hohe CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen verursacht und ebenso fossile Ressourcen in Form von Öl verbraucht werden. Die Kategorie Metall-Verbrauch ist ebenfalls stark durch die Arbeiten des Radladers geprägt, da dieser neben dem LKW-Transport die einzige Maschine im Betrieb der Anlage darstellt.

Das stark klimawirksame Gas Methan wird fast ausschließlich im Prozess *Trocknung* wirksam. Das Biogas zur Wärmeerzeugung wird u.a. aus Rindermist fermentiert, weshalb bereits bei der Behandlung der Gülle Methan-Emissionen freiwerden. Wird die Wärme aus Biogas mit der aus Erdgas verglichen, liegen die Methanemissionen bei der Wärmeerzeugung aus Biogas rund 28-mal höher als bei Erdgas.

## 4.2.4 Zusammenfassung der gesamten Vergasungsanlage

### Ohne CO<sub>2</sub>-Bindung (Basis 1)

Die beiden letzten Übersichtsgrafiken führen die Phasen Konstruktion, Brennstoffbereitstellung und Betrieb zusammen und liefern eine gesamte Wirkungsabschätzung der untersuchten Anlage. Die funktionelle Einheit ist wie im Betrieb 1 kWh<sub>FE</sub>. Es wird erneut aus Gründen der Vergleichbarkeit zuerst das Basisszenario ohne CO<sub>2</sub>-Bindung dargestellt. In diesem werden 28,1 g CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen pro kWh<sub>FE</sub> ausgestoßen.

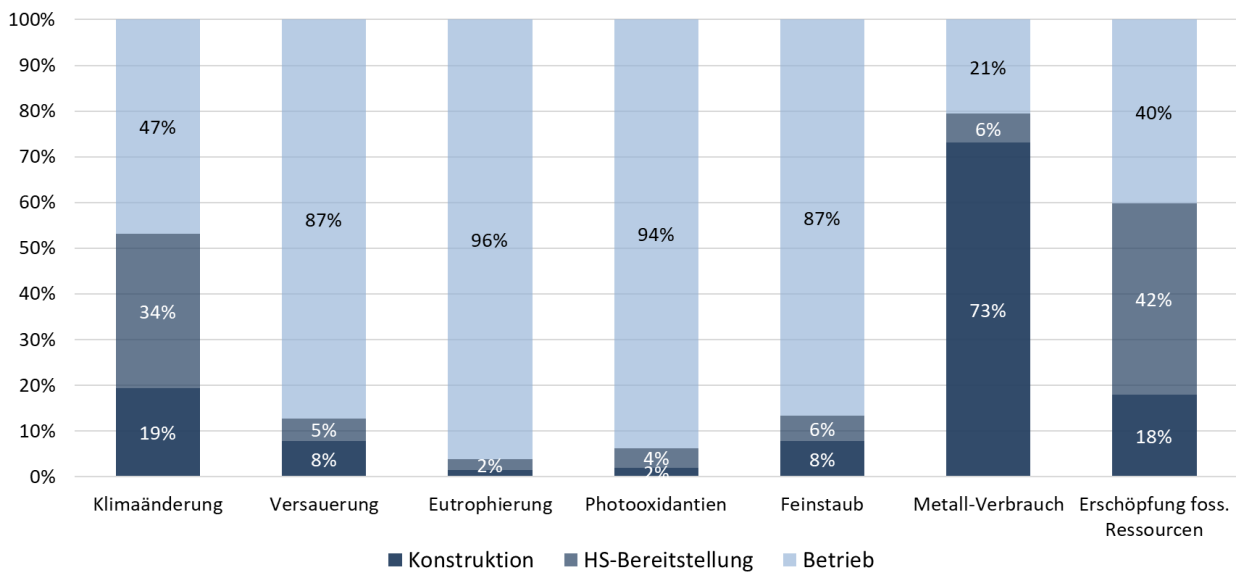


Abbildung 19: Wirkungsabschätzung gesamte Anlage, ohne CO<sub>2</sub>-Bindung: Prozentuelle Anteile der Hauptprozesse pro kWh<sub>FE</sub>

Mit fast der Hälfte der CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen wiegt der Betrieb der Anlage am schwersten. Wie bereits im letzten Abschnitt *Betrieb der Vergasungsanlage* erläutert, sind die Prozesse Umschlag mittels Radlader sowie die energieintensive Trocknung der Hackschnitzel der Hintergrund dieser Gewichtung. Der Umschlag verursacht auf die Gesamtanlage umgelegt noch 27 % der Umweltwirkungen in der Kategorie Klimaänderungen. Beim Trocknungsprozess der HS spielt die Behandlung von Gülle, als Teil der Vorkette für die Wärmeerzeugung aus Biogas, die größte Rolle.

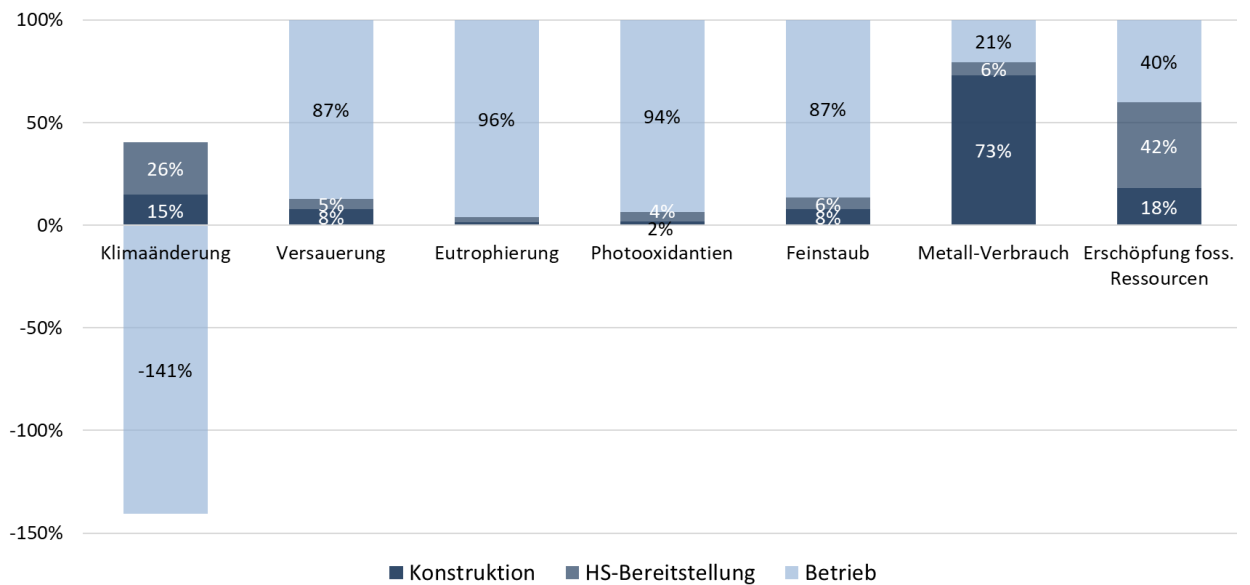
Auffallend ist der hohe Anteil der Konstruktion an der Kategorie Metall-Verbrauch. Ungewöhnlich ist der Anteil von über 70 % dennoch nicht, da die Bau-Komponenten die größten Stahlmengen beinhalten.

Die Erschöpfung fossiler Ressourcen wird größtenteils durch die Herstellung von Diesel getrieben. Bspw. werden bei der HS-Bereitstellung fast 30 % der Erschöpfung fossiler

Ressourcen durch die Treibstoffherstellung verursacht. Hintergrund ist der hohe Dieserverbrauch für den Einsatz der Erntemaschinen sowie die Transporte der Hackschnitzel.

### Mit CO<sub>2</sub>-Bindung (Basis 2)

Wird die Bindung des CO<sub>2</sub> aus der Holzkohle berücksichtigt, führt dies zu einer negativen CO<sub>2</sub>-Bilanz von -36,8 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro kWh<sub>FE</sub>. *Abbildung 20* stellt die prozentuelle Verteilung grafisch dar, *Tabelle 26* gibt die Absolutwerte mit und ohne CO<sub>2</sub>-Bindung wieder.



*Abbildung 20: Wirkungsabschätzung gesamte Anlage, mit CO<sub>2</sub>-Bindung: Prozentuelle Anteile der Hauptprozesse pro kWh<sub>FE</sub>*

*Tabelle 26: Wirkungsabschätzung gesamte Anlage mit und ohne CO<sub>2</sub>-Bindung: Absolutwerte der Hauptprozesse pro kWh<sub>FE</sub>*

Wirkungskategorie	Summe	Konstruktion	HS-Bereitstellung	Betrieb
<b>Klimaänderung</b>				
Ohne CO <sub>2</sub> -Bindung	2,81E-2	5,43E-3	9,50E-3	1,31E-2
Mit CO <sub>2</sub> -Bindung	-3,68E-2	5,43E-3	9,50E-3	1,31E-2
<b>Versauerung</b>	7,03E-4	5,51E-5	3,43E-5	6,13E-4
<b>Eutrophierung</b>	8,07E-5	1,20E-6	1,86E-6	7,77E-5
<b>Photooxidantien</b>	1,12E-3	2,22E-5	4,80E-5	1,05E-3
<b>Feinstaub</b>	2,88E-4	2,23E-5	1,61E-5	2,50E-4
<b>Metall-Verbrauch</b>	6,12E-3	4,47E-3	3,88E-4	1,26E-3
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	7,86E-3	1,41E-3	3,29E-3	3,16E-3

## 4.2.5 Kumulierter Energieaufwand (KEA), nicht-erneuerbar

Der KEA zählt nicht zu den Wirkungskategorien, wird jedoch als Informationsgröße herangezogen. Er dient der primärenergetischen Bewertung der Prozesse bis an deren Systemgrenzen (Klöpffer und Grahl 2009). Im Falle der untersuchten Anlage werden 0,0996 kWh fossile Energie benötigt, um eine Kilowattstunde Energie zu erzeugen. Dieser Wert enthält alle energetischen Aufwendungen, die nicht aus erneuerbaren Energien stammen. Die nachfolgende Grafik zeigt die Gewichtungen innerhalb der Lebenszyklusphasen. Es werden nur die bedeutendsten Teilprozesse dargestellt.

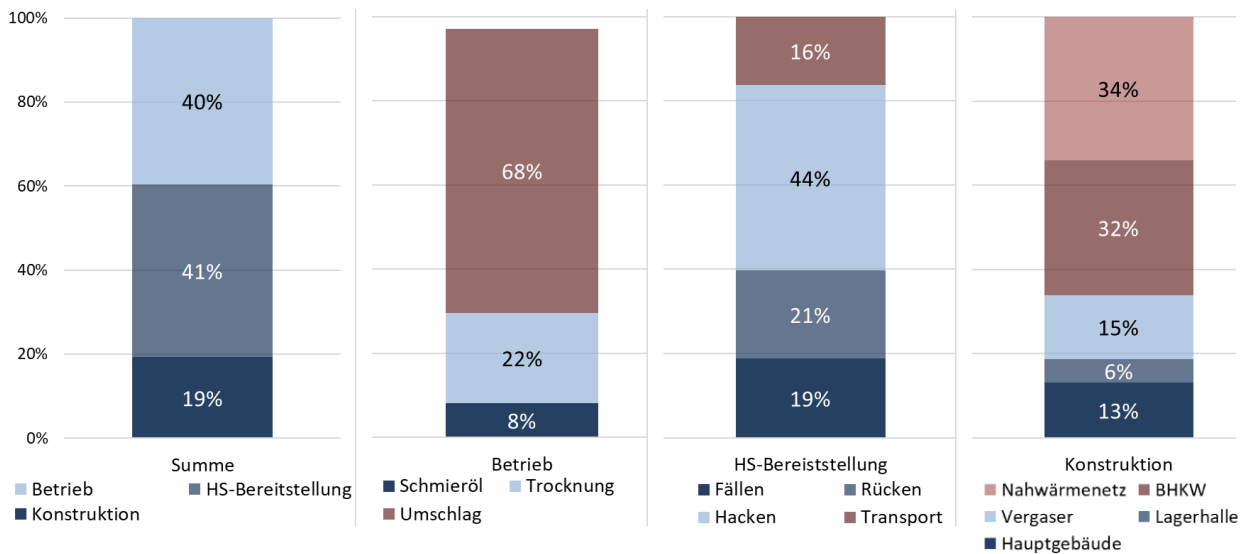


Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand: Prozentuelle Anteile Phasen Betrieb, Brennstoffbereitstellung und Konstruktion

Der Umschlag der Hackschnitzel am Lagerplatz benötigt mit 0,0266 kWh pro kWh<sub>FE</sub> die größte Menge fossiler Energieträger in Form von Diesel. Der Wert entspricht knapp einem Drittel der gesamt benötigten fossilen Brennstoffe (27%).

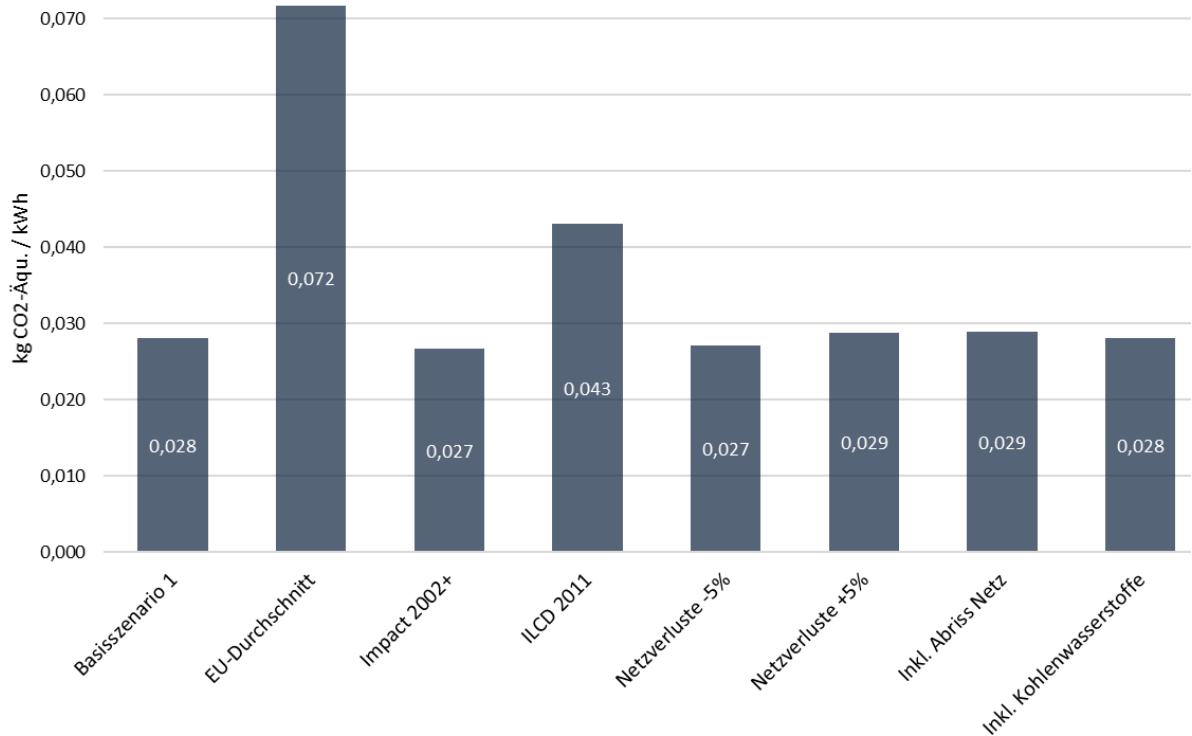
### 4.3 Sensitivitätsanalysen

Nach ISO 14040/44 ist eine Sensitivitätsanalyse nur zwingend vorgeschrieben, wenn die Wahl mehrerer Allokationsmethoden möglich ist (Klöpffer und Grahl 2009). Obwohl Allokationen für die untersuchte Anlage vermieden wurden, werden an dieser Stelle verschiedene Analysen vorgenommen. Einerseits, um Unsicherheiten der Ergebnisse zu überprüfen und andererseits, um eine bessere Einschätzung der untersuchten Anlage zu liefern. So können durch die Variation von Eingabeparametern Aussagen über deren Einfluss auf die Gesamtergebnisse der untersuchten Anlage getroffen werden.

Folgende Analysen werden erarbeitet und mit dem Basisszenario 1 (ohne CO<sub>2</sub>-Bindung) verglichen:

1. Anpassung der Hilfsenergien zur Darstellung eines durchschnittlichen europäischen Szenarios
  - a. Einsatz EU-Strommix anstelle von Wasserkraft
  - b. Einsatz Erdgas für die HS-Trocknung statt Biogas
  - c. Anpassung der Brennstoffbereitstellung auf EU-Durchschnittswerte
  - d. Summe aller Anpassungen (inklusive Transporte)
2. Änderung der Wirkungsabschätzungsmethode in SimaPro
  - a. IMPACT2002+
  - b. ILCD 2011
3. Reduktion Nutzungszeiten des Vergasers auf 15 Jahre
4. Variation der Netzverlustannahmen
  - a. Erhöhung auf 15%
  - b. Senkung auf 5%
5. Berücksichtigung Abriss und Abfallbehandlung des Nahwärmenetzes
6. Hinzuziehen von Kohlenwasserstoff-Emissionen (als Methan)
  - a. Höhe aus Messungen durch den Hersteller (Syncraft)
  - b. Höhe der Kohlenwasserstoffe ermittelt nach Literatur-Richtwert (Kaltschmitt et al. 2016)
7. Aufnahme unbehandelter Abwasseremissionen

Eine erste Einordnung der CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen der Sensitivitätsanalysen liefert *Abbildung 22*. Die Analysen 3. *Reduktion der Nutzungszeit des Vergasers* sowie 7. *Aufnahme unbehandelter Abwasseremissionen* werden nicht abgebildet, da diese keine Änderungen in der Wirkungskategorie Klimaänderung hervorrufen.



*Abbildung 22: Sensitivitätsanalysen: Gegenüberstellung der CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen der Kategorie Klimaänderung*

*Tabelle 27* stellt die Abweichungen der Sensitivitätsszenarien zum Basisszenario 1 (ohne CO<sub>2</sub>-Bindung) dar. Dabei werden jeweils nur die stärksten Abweichungen in Prozent ausgewiesen. Erläuterungen zu den Analysen werden anschließend gegeben. Weitere Auflistungen der Ergebnisse befinden sich im Anhang.

Abkürzungen für eine Zuordnung der Wirkungskategorien mit:

KÄ	= Klimaänderung	VB	= Versauerung Boden
EUT	= Eutrophierung Wasser	POX	= Photooxidantien
FS	= Feinstaub	MV	= Metall-Verbrauch
EFR	= Erschöpfung foss. Ressourcen		

Tabelle 27: Sensitivitätsanalysen: Abweichungen zum Basisszenario 1

Nr	Sensitivitäts-analyse	Szenarien	Abweichung zu Basis 1 - Stärkst beeinflusste Kategorien
1	EU-Durchschnitt	a) EU-Strommix	+73% (KÄ); +72% (EFR)
		b) Wärme aus Erdgas	+84% (KÄ); +112% (EFR)
		c) Brennstoffbereitstellung	-3% (KÄ); -9% (EFR)
		d) Summe	+156% (KÄ); +177% (EFR)
2	Methode	a) IMPACT 2002+	-5% (KÄ); +1427% (VB); -5% (FS)
		b) ILCD 2011	+53% (KÄ); +48% (POX); -88% (FS)
3	Nutzungszeit Vergaser	15 Jahre (ohne Austausch Komponenten)	+5 % (KÄ); + 8% (EUT); +9% (MV)
4	Netzverluste	a) Senkung auf 5 %	-3,3% (KÄ); -3,6% (MV)
		b) Erhöhung auf 15%	+2,5% (KÄ); +3,3% (EUT)
3	Abriss Netz	Rückbau und Abfallbehandlung Netz	+3% (KÄ); +4% (EFR)
6	Kohlenwasserstoff Emissionen	Verwendung von Methan aus	
		a) Messung Hersteller	+0,5% (KÄ)
		b) Literatur-Richtwert	+0,7% (KÄ)
7	Abwasser-Emissionen	Annahme unbehandeltes Abwasser	+231% (EUT)

### 1. Anpassungen auf ein durchschnittliches EU-Szenario

Es wird untersucht, welche Umweltwirkungen die untersuchte Anlage an einem durchschnittlichen Standort innerhalb der EU erzeugt. Damit soll eine ortsunabhängige Übertragbarkeit des Systems gewährleistet werden. Weiterhin können damit die speziellen Bedingungen der untersuchten Anlage in Dornbirn verallgemeinert werden. Es wird zum einen der europäische Strommix laut SimaPro für den Elektrizitätsbedarf verwendet (a)), andererseits wird für die Wärmebereitstellung zur Trocknung der HS am Lagerplatz Erdgas als Wärmequelle gewählt (b)) und letztlich wird die Brennstoffbereitstellung an den europäischen Durchschnitt angepasst (c)). Letzteres kann durch Verwendung der Referenzdaten für den *Harvester*, *Forwarder*, *Wood Chipper* abgebildet werden (vgl. Kapitel 3.4.2). Zusätzlich wird der Prozess *power sawing* (Motorsäge) hinzugefügt, welcher bei der Darstellung der untersuchten Anlage bereits in die Prozesse *Harvesting* und *Forwarding* integriert wurde. Weitere Anpassungen beziehen sich auf die Transportdistanz des Holzes. Die durchschnittliche Distanz vom Lagerplatz der Erntemaschinen zum Einsatzort im Wald



wird in ecoinvent mit 25 km angegeben. Damit kann der Transport des Holzes zum Lagerplatz adaptiert werden. Der Transportweg von einem zentralen Lagerplatz zur Heizzentrale wird nicht als eigenes Szenario dargestellt, sondern ist in der Summe aller Anpassungen ebenfalls enthalten (d)). Es wird von einer durchschnittlichen Entfernung von Lagerplatz zur Heizzentrale von 10 km ausgegangen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die untersuchte Anlage in Summe unterdurchschnittliche CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen ausstößt (-156 % ggü. EU-Vergleich). Der alleinige Einfluss der Stromerzeugung liegt bei 73 % zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen ggü. dem Basisszenario. Dieser Unterschied ergibt sich aus dem Verhältnis der österreichischen Laufwasserkrafterzeugung mit 17,4 g CO<sub>2</sub>-Äqu. pro kWh zu dem europäischen Strommix mit 480 g CO<sub>2</sub> pro kWh (Ecoinvent 2016). Hintergrund sind die im EU-Schnitt hohen Anteile an Kohle- und Gaskraftwerken. Einen noch höheren Einfluss auf die Kategorie Klimaänderung hat die Wärmeerzeugung (relevant für die HS-Trocknung am Lagerplatz). Wird der Biogaseinsatz auf Erdgas umgestellt, so steigt das Gesamtergebnis um insgesamt 84 %. Die Brennstoffbereitstellung weist im EU-Schnitt etwas geringere Umweltwirkungen in der Kategorie Klimaänderung (-3 %) und Erschöpfung fossiler Ressourcen (-9 %) aus. Hintergrund ist der niedrigere Treibstoffverbrauch während der Ernte, trotz insgesamt größerer Strecken.

## 2. Änderung der Wirkungsabschätzungsmethode

Um den Vergleich weiterer Wirkungsabschätzungsmethoden heranzuziehen, werden Methoden mit teilweise gleichen Wirkungsindikatoren gewählt. Hierfür bieten sich die europäischen Methoden IMPACT 2002+ und ILCD 2011 an. Von deren vorhandenen Wirkungskategorien werden nur diese für einen Vergleich mit ReCiPe herangezogen, welche dieselben Einheiten ausweisen. Die nachfolgende Tabelle stellt die Ergebnisse gegenüber:

*Tabelle 28: Vergleich Midpoint-Wirkungsabschätzungsmethoden ReCiPe mit IMPACT 2002+ und ILCD 2011*

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>Einheit</b>	<b>Ergebnisse in ReCiPe (Basis)</b>	<b>Ergebnisse in IMPACT 2002+</b>	<b>Ergebnisse ILCD 2011</b>
<b>Klimaänderung</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	2,81E-2	2,67E-2	4,30E-2
<b>Versauerung Boden</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	7,03E-4	1,07E-2	-
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	8,07E-5	-	7,55E-4
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	1,12E-3	-	1,66E-3
<b>Feinstaub</b>	kg PM2.5 eq	2,88E-4	2,74E-4	3,46E-5

Die starken Abweichungen der CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen nach der ILCD-Methode sind ausschließlich in der Phase Betrieb begründet. Hier werden für die Wärmebereitstellung aus Biogas 378 % mehr CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen ermittelt als im Basisszenario. Bei weitergehender Analyse der Unterprozesse kann festgestellt werden, dass die Unterschiede zwischen den Berechnungsmethoden minimal bis nicht vorhanden sind, solange es sich nicht um ein biogenes Material handelt, wie hier Biogas. Zur Kontrolle dient ein direkter Vergleich der beiden Methoden, in dem einerseits die Wärmebereitstellung aus Biogas und andererseits die Wärmebereitstellung aus Erdgas betrachtet wird. Der Unterschied der beiden Methoden in der Berechnung der Biogas-CO<sub>2</sub> Äquivalent-Emissionen ist bedeutsam, wie die nachfolgende Abbildung zeigt.

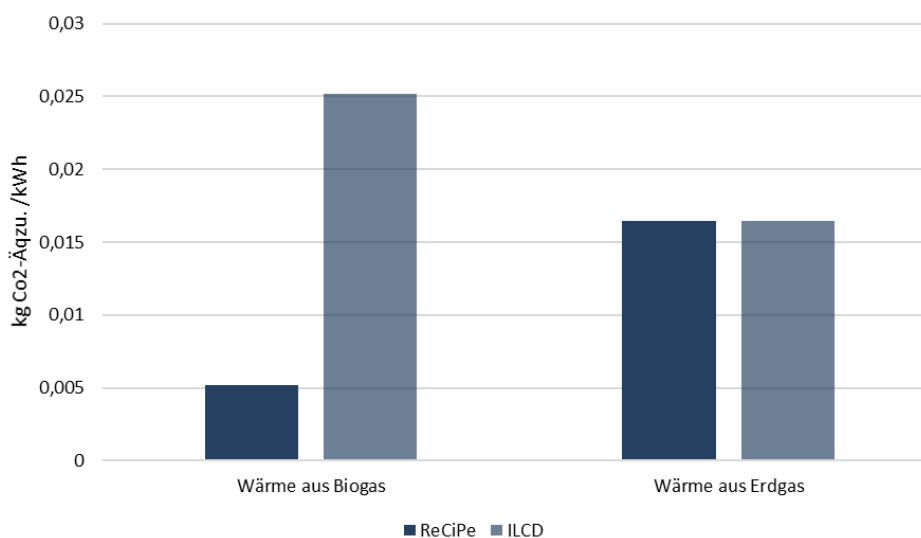


Abbildung 23: Vergleich der Wirkungsabschätzungsmethoden ReCiPe und ILCD 2011, Berechnung der CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen bei Einsatz von Biogas und Erdgas

Erstaunlich ist, dass nach der ILCD-Methode Wärme aus Biogas deutlich höhere Emissionen hinterlegt sind, als für Erdgas (+36 %). Dieser Umstand ist auf die unterschiedliche methodische Behandlung des Substratanbaus inklusive dessen Vorketten zurückzuführen.

### 3. Reduktion der Nutzungszeit de Vergasers

Die Nutzungszeit des Vergasers wird so angepasst, dass dieser nach 15 Jahren das Ende seiner Lebenszeit erreicht hat und vollständig entsorgt wird. Im Basisszenario wird von einer 30-jährigen Nutzungszeit ausgegangen, innerhalb welcher 1,5 Vergaser eingesetzt werden. Damit ändert sich der Anteil des Vergasers in der Phase Konstruktion von 0,05 Stück pro Jahr auf 0,07 Stück pro Jahr (vgl. Kapitel 3.4.1). Die Ergebnisse auf die Wirkungskategorie Klimaänderung sind dabei sehr gering. Die CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen steigen um +1 % pro kWh, der Metallverbrauch um 7 %. Wird jedoch die Konstruktion der Anlage isoliert betrachtet, die Phasen Betrieb und Brennstoffbereitstellung folglich unberücksichtigt

gelassen, so ändern sich in dieser Phase die CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen um 5 %, von 20.100 kg auf 21.200 kg. An dieser Stelle ist eine wirtschaftliche Betrachtung sinnvoll, um eine Empfehlung über die längerfristige Verwendung des Vergasers geben zu können. Diese ist jedoch nicht Ziel der Arbeit und wird nicht untersucht.

#### 4. Variation der Netzverluste

Es wird einerseits eine optimistische Annahme getroffen, die einer Reduktion der Verteilungsverluste auf 5 % darstellt sowie eine pessimistische Annahme mit Verlusten in Höhe von 15 %. Um diese Anpassungen darstellen zu können, wird der Output der untersuchten Anlage, die erzeugte Energie in Form von Wärme und Strom, entsprechend der niedrigeren oder höheren Netzverluste angepasst. Mit zunehmenden Verteilungsverlusten, bspw. durch mangelhafte Isolierung, Leckagen oder sonstigen Undichtigkeiten, nehmen die Emissionen der meisten Wirkungskategorien linear zu. *Tabelle 29* stellt die Ergebnisse inklusive Vergleich zum Basisszenario zusammen.

*Tabelle 29: Variation der Netzverluste mit 5 % und 15 %, Vergleich mit Basisszenario 1*

Wirkungskategorie	Netzverlust 5 %		Netzverlust 15 %	
	Summe	Delta zu Basis	Summe	Delta zu Basis
<b>Klimaänderung</b>	2,71E-2	-3,3 %	2,88E-2	+2,5 %
<b>Versauerung</b>	6,80E-4	-3,2 %	7,25E-4	+3,2 %
<b>Eutrophierung</b>	7,82E-5	-3,2 %	8,34E-5	+3,3 %
<b>Photooxidantien</b>	1,09E-3	-3,2 %	1,16E-3	+3,2 %
<b>Feinstaub</b>	2,79E-4	-3,2 %	2,97E-4	+3,1 %
<b>Metall-Verbrauch</b>	5,90E-3	-3,6 %	6,31E-3	+3,1 %
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	7,61E-3	-3,3 %	8,07E-3	+2,6 %

#### 5. Abriss des Nahwärmenetzes und Abfallbehandlung

Im Fall der untersuchten Anlage wird das Nahwärmenetz im Boden belassen, es kommt folglich nicht zu einer Abfallbehandlung von Stahl, Kunststoffmantel und Dämmschaum, ebenfalls muss keine zusätzliche Energie für das erneute Aufbaggern des Bodens und Abtransport der Komponenten angerechnet werden. Dieser Umstand wird geändert und überprüft, wie stark der Rückbau des Netzes und dessen Abfallbehandlung Einfluss auf die gesamten Umweltwirkungen hat. Unter dieser Annahme werden 3 % höhere CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen erzeugt und 4 % mehr fossile Ressourcen in Form von Diesel als Treibstoff benötigt. *Tabelle 30* zeigt die Ergebnisse mit Berücksichtigung des Abfallszenarios.

Tabelle 30: Hinzufügen Abriss und Rückbau des Nahwärmenetzes, Vergleich mit Basisszenario

Wirkungskategorie	Basis-Szenario	Summe	Delta zu Basis
Klimaänderung	2,81E-2	2,89E-2	+3 %
Versauerung	7,03E-4	7,07E-4	+1 %
Eutrophierung	8,07E-5	8,09E-5	+0 %
Photooxidantien	1,12E-3	1,13E-3	+0 %
Feinstaub	2,88E-4	2,89E-4	+1 %
Metall-Verbrauch	6,12E-3	6,13E-3	+0 %
Erschöpfung foss. Ressourcen	7,86E-3	8,19E-3	4%

#### 6. Hinzuziehen von Kohlenwasserstoff-Emissionen (als Methan)

Bei unvollständiger Verbrennung können giftige Schadstoffe über das Abgas in die Atmosphäre gelangen. Darunter befinden sich neben den in der Sachbilanz dokumentierten Kohlenmonoxid und Stickoxiden auch unverbrannte Kohlenwasserstoffe ( $C_xH_y$ , polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Dioxine und Furane) sowie Ruß (Kaltschmitt et al. 2016). Laut Angaben der Hersteller SynCraft wird kein Feinstaub und Ruß bei dem Vergasungsprozess frei, da ein 0,3 Mikrometer Filter den Staub in Form von Holzkohle abscheidet (Huber 2017). Für unverbrannte Kohlenwasserstoffe ( $C_xH_y$ ) im Abgas werden Messungen durch SynCraft bereitgestellt, die eine Konzentration von 21 ppm (parts per million) angeben (SynCraft 2015). Unverbrannte Kohlenwasserstoffe können prinzipiell als VOC-Emissionen (volatile organic compounds) zusammengefasst werden. Da die ReCiPe Midpoint-Methode VOC jedoch nicht berücksichtigt, werden diese als Methan ( $CH_4$ ) deklariert. Methan ist in allen Wirkungsabschätzungsmethoden als Treibhausgas eingestuft und damit bilanzwirksam. Mithilfe der idealen Gasgleichung (vgl. Kapitel 3.4.3) und der molaren Masse von Methan kann die Konzentration mit 5,95 mg  $CH_4$  pro kWh<sub>fE</sub> ermittelt werden. Unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Methanemissionen verändern sich die Ergebnisse der untersuchten Anlage minimal mit einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen um 0,5 %. Auch die Wirkungskategorie *Bildung von Photooxidantien* steigt um lediglich 0,1 %.

Aufgrund der marginalen Änderungen wird in einer zweiten Analyse ein Richtwert aus Literaturdaten verwendet. Es soll überprüft werden, ob mit dieser anderen Vorgehensweise ebenso minimale Änderungen durch den Ausstoß von Methan verursacht werden und damit die Höhe der Kohlenwasserstoffemissionen als unbedeutend eingestuft werden können. Für Verbrennungsanlagen sind die Zusammenhänge zwischen der Konzentration von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen im Abgas untersucht (Kaltschmitt et al. 2016).

Abbildung 24 zeigt den idealisierten Zusammenhang zwischen Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen im Abgas.

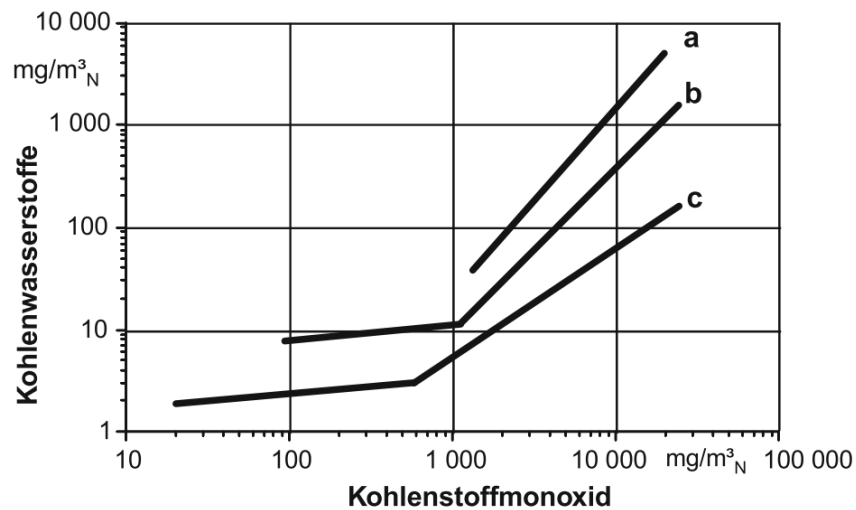


Abbildung 24: Idealisierter Zusammenhang zwischen CO- und C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>-Emissionen (a Kaminofen geschlossen, b Stückholzkessel, c Unterschubfeuerung)

Quelle: (Kaltschmitt et al. 2016)

Aus dem Umrechnungsverhältnis kann ein Kohlenwasserstoffwert von 2 mg/Nm<sup>3</sup> entsprechend der CO-Emissionen (58 mg/Nm<sup>3</sup>) ermittelt werden. Bezogen auf 1 kWh<sub>IE</sub> ergeben sich damit 8,78 mg CH<sub>4</sub>-Emissionen. Auch mit Verwendung der Literatur-Richtwerte verändert sich das Ergebnis der untersuchten Anlage in der Kategorie Klimaänderung lediglich um +0,7 %.

## 7. Aufnahme unbehandelter Abwasseremissionen

Die Emissionen, die ins Wasser abgegeben werden, können mittels chemischer Schnelltests selbst gemessen werden. Die Abwasseremissionen werden nicht in das Basisszenario aufgenommen, da das Abwasser in einer örtlichen Reinigungsanlage behandelt wird und somit die Umwelt weniger stark belastet. Aufgrund fehlender Daten der Reinigungsanlage, inwieweit die Abwasseremissionen entfernt werden können, wird in dieser Analyse der Extremfall betrachtet, indem alle Abwasseremissionen unbehandelt in Boden und Wasser gelangen. Es werden drei Substanzen analysiert, bei welchen von einer erhöhten Konzentration ausgegangen wird. Dabei handelt es sich um Ammonium (NH<sub>4+</sub>), Nitrat (NO<sub>3</sub>-) und Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Es werden Proben des Waschwassers aus dem Gaswäscher und des Kondensats aus der Abgaskondensation entnommen. Da der Gaswäscher und die Abgaskondensation mit Wasser betrieben werden, können umweltschädliche Substanzen in die Kanalisation geraten. Nachfolgend werden die Messschritte kurz erläutert.

Die Proben werden mithilfe eines Sterilfilters, Porosität 0,45 µm, gereinigt, um enthaltene Trübstoffe der Probe zu entfernen, welche das Photometer beeinflussen. Es wird nach den Anweisungen des Macherey Nagel Schnelltests vorgegangen. In einem ersten Schritt wird die geforderte Menge Mikroliter der Probe mit einem vorgefertigten Reagenz vermischt. Das Reagenz dient der Identifikation bestimmter Ionen, indem eine chemische Reaktion mit diesem ausgelöst wird und es zur Farbänderung der Substanz kommt. Nach Ablauf einer vorgegebenen Verweilzeit wird die Küvette von Fingerabdrücken gereinigt und im Digitalphotometer *NANOCOLOR® 500 D* fixiert, welches anhand des angebrachten Strichcodes der Küvette erkennt, um welche Inhaltsstoff es sich bei der Messung handelt. Da im Fall des Schnelltests für Ammonium der zulässige Messbereich des Photometers überschritten wird, wird eine zweite Messung mit einer Verdünnung von 1 zu 25 (volumenbezogen) mit destilliertem Wasser erstellt und diese verwendet.

Das Waschwasser aus dem Gaswäscher vermischt sich mit dem Kondensat zu Abwasser. Daher werden die Emissionswerte entsprechend der Volumenströme angepasst.

Mit:

- Volumenstrom Gaswäscher: 20 l/h
- Volumenstrom Abgaskondensation: 40 l/h
- Volllaststunden: 7.986 Stunden

Anhand der Messergebnisse des Photometers in Milligramm pro Liter werden die Emissionen in Milligramm pro kWh umgerechnet, damit diese auf eine kWh<sub>fE</sub> bezogen werden können. Es ergeben sich für beide Abwasserströme Ammonium-Rückstände in Summe von 225,94 mg/kWh<sub>fE</sub> und Nitrat-Rückstände von 1,12 mg/kWh<sub>fE</sub>. Die Sulfat-Messwerte liegen unter dem messbaren Bereich des Photometers und werden daher nicht aufgenommen. Die Ergebnisse werden in *Tabelle 31* zusammengefasst.

*Tabelle 31: Emissionen ins Wasser: Ammonium, Nitrat, Sulfat*

<b>Emissionen ins Wasser</b>	<b>Gaswäscher</b>		<b>Abgaskondensation</b>	
	mg/l	mg/kWh <sub>fE</sub>	mg/l	mg/kWh <sub>fE</sub>
<b>Ammonium</b> (NH <sub>4+</sub> )	1.869,00	80,54	1.687,00	145,40
<b>Nitrat</b> (NO <sub>3-</sub> )	14,00	0,60	6,00	0,52
<b>Sulfat</b> (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	< 10	-	-	-

Unter Berücksichtigung der Abwasseremissionen ändert sich ausschließlich die Kategorie Eutrophierung, da diese mit Stickstoff indiziert wird. Die Konzentrationen von Ammonium

und Nitrat führen letztendlich zu einer Erhöhung der Eutrophierung von Wasser in Höhe von 231 %.

#### **4.4 Einordnung und Vergleich mit bisherigen Arbeiten**

In diesem Kapitel werden der untersuchten Anlage Ergebnisse anderer relevanter Arbeiten gegenübergestellt (vgl. *Kapitel 3.2*). Dabei liegt der Fokus auf Vergleichen mit gekoppelter Wärme- und Stromerzeugung, die durch Vergasung mit Hackschnitzeln abläuft. Biemann 2015; Elsayed et al. 2003; Adams 2011; Scharte et al. 2016 stellen in ihren Publikationen Ergebnisse der Hackschnitzelvergasung mit anschließender Stromerzeugung im BHKW vor. Weiterhin wird der Einsatz von HS und Pellets zur ausschließlichen Wärmeversorgung untersucht. Letztlich wird ein Vergleich mit der Wärmeerzeugung aus fossilen Brennstoffen mit Erdgas-Brennwertkesseln sowie der Kombination Erdgas mit leichtem Heizöl dargestellt (Kaltschmitt und Streicher 2009). Keine der in *Abbildung 25* dargestellten Referenzen berücksichtigt die Wärmeverteilung über ein Nahwärmenetz. Aus diesem Grund wird die untersuchte Anlage mit den beiden Szenarien Basis 1 (ohne CO<sub>2</sub>-Bindung) und Basis 2 (mit CO<sub>2</sub>-Bindung) ebenfalls um den Bau des Netzes sowie die auftretenden Netzverluste reduziert. Die Gesamtergebnisse der Wirkungsabschätzung der untersuchten Anlage ohne Berücksichtigung des Netzes und Netzverluste befinden sich im Anhang. Die Grafik ist farblich nach den verschiedenen Autoren hinterlegt.

Mit: HS=Hackschnitzel BW=Brennwert

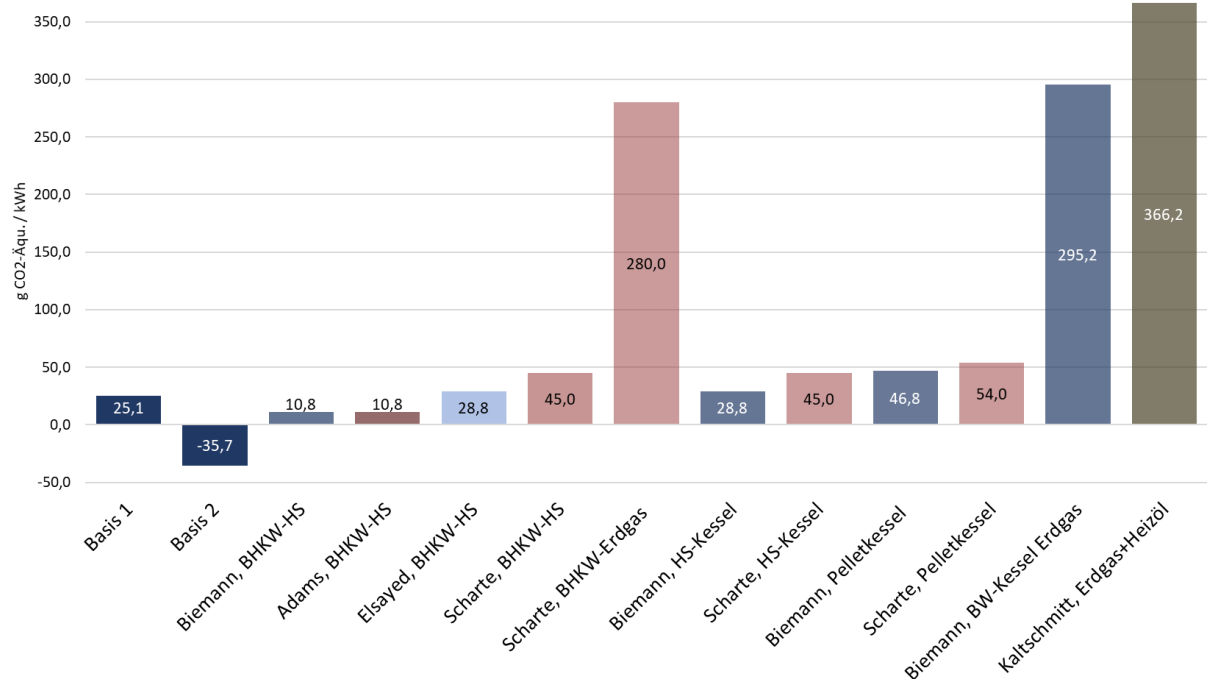


Abbildung 25: CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen in g/kWh ohne Berücksichtigung Nahwärmenetz - Vergleich ausgewählter Wärmeerzeugungsanlagen

Die Ergebnisse der untersuchten Anlage scheinen plausibel im Vergleich mit den weiteren untersuchten HS-BHKW. Die niedrigen CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen von Adams 2011 können damit begründet werden, dass sein Modell nicht die gesamte Kette der Brennstoffbereitstellung berücksichtigt, da das Holz als Abfallprodukt aus einem Sägewerk, bis auf das Hacken, ohne Aufwand zur Verfügung stehen. Biemann 2015 berücksichtigt zwar die Hackschnitzelbereitstellung, weist aber aufgrund schlechter Datenlage sehr spärliche Informationen zur Konstruktion der Anlage aus. Auch die Datenlage für den Bau des Nahwärmenetzes wird von Biemann 2015 selbst als mangelhaft beschrieben, jedoch vernachlässigt sie diesen Fehler aufgrund des generell geringen Anteils des Netzes an den Gesamtemissionen. Die Ergebnisse von Elsayed et al. 2003 weichen nur um 3,7 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>IE</sub> von den adaptierten Ergebnissen im Basisszenario 1 ab. Mit rund 56 % bilanziert Scharte et al. 2016 die höchsten Umweltwirkungen eines mit HS betriebenen BHKW. Diese Abweichung kann auf die Betriebsweise der BHKW zurückgeführt werden, da die untersuchten BHKW Nutzungsgrade zwischen 44 % und 57 % für die Wärmeabgabe aufweisen (Scharte et al. 2016). Der wärmebezogene Nutzungsgrad der untersuchten Anlage liegt hier vergleichsweise höher. Dieser beträgt ohne Berücksichtigung der Verteilungsverluste 60 %, inklusive Wärmeverteilungsverluste 55,2 % (vgl. Energiefluss-Diagramm in Kapitel 3.1).



Neben den mit HS betriebenen BHKW werden auch Kessel zur reinen Wärmeerzeugung untersucht. Der Einsatz von HS in Verbrennungskesseln verursacht ähnlich hohe CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen wie im BHKW, Pellets hingegen schneiden etwas schlechter als Hackschnitzel ab, was auf energieaufwendige Press- und Trocknungsverfahren in der Pelletherstellung zurückzuführen ist.

Der Einsatz von fossilen Brennstoffen wie Erdgas (Scharte et al. 2016 und Biemann 2015) oder Erdgas kombiniert mit leichtem Heizöl (Kaltschmitt und Streicher 2009) erhöht die Umweltwirkungen um bis zu 1.360 % gegenüber der Basis 1 (ohne CO<sub>2</sub>-Bindung).

Wärmeerzeugungssysteme, die ein Nahwärmenetz mitabbilden, liefern innerhalb der Literaturrecherche lediglich die zwei Publikationen von Kaltschmitt und Streicher 2009 und Scharte et al. 2016. Biemann 2015 untersucht in ihrer Publikation zwar Nahwärmesysteme, weist jedoch keine konkreten Ergebnisse für ein Wärmeerzeugungssystem inklusive Verteilung über ein Nahwärmenetz aus. Kaltschmitt und Streicher 2009 stellen Ergebnisse für ein Nahwärmenetz dar, welches an einen mit Sägerestholz und Waldhackgut betriebenen Biomassekessel angebunden ist. Weiterhin kombinieren sie die Wärmeerzeugung aus Biomasse mit solarer Unterstützung. *Abbildung 26* stellt die Vergleiche grafisch dar.

Mit: NW= Nahwärmenetz Solar= Solare Warmwasserunterstützung

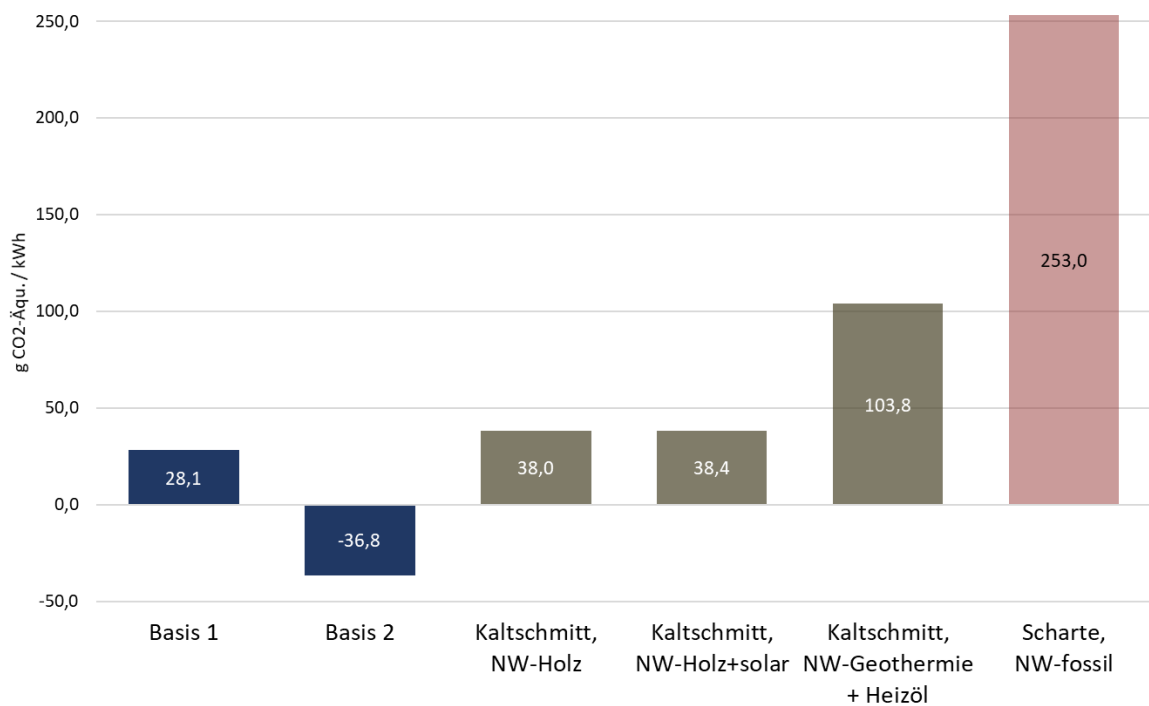


Abbildung 26: CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen in g/kWh mit Berücksichtigung Nahwärmenetz – Vergleich ausgewählter Nahwärmesysteme

Die Einordnung der untersuchten Anlage zeigt ein vergleichsweise geringes Klimaänderungspotential dieser, auch ohne Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Bindung. Ein fossil betriebenes Nahwärmenetz erzeugt dabei rund 800 % höhere CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen als die untersuchte Anlage. Dem fossil betriebenen Netz wird ein Brennstoffmix von 59,6 % Erdgas, 25,3 % Steinkohle, 10,6 % Braunkohle und 4,5 % Heizöl unterstellt (Scharte et al. 2016).

Erkenntnisse zu weiteren Wirkungskategorien liefert Biemann 2015 in einem Vergleich von Hackschnitzel- und Holzgas-BHKW gegenüber konventionellen Gasheizungen. Dabei werden durch die Hackschnitzelverbrennung deutlich höhere Feinstaubwerte erreicht als mit Gasheizungen. Das Holzgas-BHKW hingegen schneidet besser ab als die Gasheizung.

Im Hinblick auf die Eutrophierung (Stickstoffeintrag in Boden) sind Wärmekonzepte aus Biomasse prinzipiell nachteilig gegenüber Gasheizungen, da hohe Stickstoffgehalte aus der Biomasse freiwerden. Dies ist einerseits dem Stickstoff aus der Verbrennungsluft und dem biogenen Brennstoff geschuldet. Die Oxidation des im Brennstoff gebundenen Stickstoffs stellt den wichtigsten NO<sub>x</sub>-Bildungsmechanismus dar (Kaltschmitt et al. 2016). Andererseits wird das in festen Biobrennstoffen vorkommende Nebenelement Schwefel zu Schwefeldioxid umgesetzt. NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub> sind neben Ammonium die Hauptkomponenten

der Versauerung und Eutrophierung (Kaltschmitt und Streicher 2009; Kaltschmitt et al. 2016).

Durch Kaltschmitt und Streicher 2009 werden neben CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen auch Daten der Wirkungskategorie Versauerung (SO<sub>2</sub>-Äqu.) veröffentlicht. Für das in der *Abbildung 26* dargestellte Nahwärmenetz *NW-Holz* fallen 0,65 g SO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh an. Die für die untersuchte Anlage gemessenen Ergebnisse liegen dabei 8 % höher mit 0,70 g SO<sub>2</sub>/kWh.

#### **4.5 Identifikation signifikanter Parameter**

Zum Schutz vor Fehlinterpretationen werden signifikante Parameter ermittelt. Diese führen unter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten tatsächlich zu einem quantitativen Unterschied im Ergebnis der Arbeit (Klöpffer und Grahl 2009).

##### Systemgrenzen

Werden die Systemgrenzen verändert und einzelne Prozesssteile exkludiert, ändern sich die Ergebnisse signifikant. Wird bspw. die Hackschnitzelbereitstellung von der Grenze *ab Wald* zur Grenze *ab Lagerplatz* geändert, bleibt die gesamte Ernte und der Transport unberücksichtigt. So könnte Sägerestholz aus einem Sägewerk eingesetzt werden, wofür höchstens Aufwendungen für das Hacken innerhalb der Systemgrenzen liegen.

Die Erweiterung bzw. Verkleinerung von Systemgrenzen ist gleichzeitig eine Möglichkeit, Allokationsprobleme zu vermeiden. Werden mehrere Outputs in einem Prozess erzeugt, können die insgesamt entstehenden Umweltwirkungen auf diese aufgeteilt werden. So ist es prinzipiell möglich, die Erzeugung von Wärme und Strom separat zu betrachten und einen der beiden Outputs als Koppelprodukt zu behandeln. Beispielsweise kann so für die „nebenbei“ erzeugte Wärme eine Gutschrift verrechnet werden. Diese ist darin begründet, dass ein alternativer Herstellungsprozess für die Wärmeerzeugung substituiert wird. So kann nur die elektrische Energie der untersuchten Anlage als fE definiert werden und die Erzeugung von Wärme, zum Beispiel durch einen Heizöl-Brenner, vermieden werden. Kaltschmitt und Streicher 2009 gehen nach dieser Methode vor, welche zu negativen CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen bei gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugung führt. Die Wahl der Systemgrenzen hat damit einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse sowie die Vergleichbarkeit dieser mit anderen Studien.

### Abschätzungsmethode

Wie in der Sensitivitätsanalyse deutlich wurde, hängt das Ergebnis auch von der Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode ab. Das stark abweichende Ergebnis der ILCD 2011-Methode in Hinblick auf die Biogasbewertung zeigt, dass jede Methode eine andere Berechnungsgrundlage aufweist und verschiedene Gewichtungen berücksichtigt. Um ein Ergebnis vergleichbar zu machen, muss die selbe Methode verwendet werden.

### Nutzungszeit

Die Lebenszeit der Anlagenkomponenten spielt eine entscheidende Rolle für die Aufteilung der Umweltwirkungen untereinander. Komponenten mit kurzen Nutzungszeiten, wie das BHKW, fallen dadurch besonders ins Gewicht. Das BHKW wird von den Anlagenbetreibern auf acht Jahre geschätzt, andere Quellen gehen hingegen von bis zu 20 Jahren Nutzungszeit aus (Biemann 2015). Eine gründliche Datenrecherche ist offensichtlich ausschlaggebend, damit Ergebnisse nicht verfälscht werden.

### Brennstoffeinsatz

Die Ergebnisse sind stark abhängig von Annahmen, die über den Brennstoffeinsatz getroffen werden. Wird der Wassergehalt des eingesetzten Brennstoffs verändert, ändern sich auch die energetischen Aufwendungen für die Ernte, Aufbereitung und Transport des Holzes. Gleiches gilt für die Art des Holzes, da sich Weichholz und Nadelholz bspw. von Energieinhalt und Gewicht unterscheiden.

## **4.6 Einschränkungen**

In diesem Abschnitt werden Einschränkungen der Ökobilanz im Allgemeinen sowie im speziellen für die untersuchte Anlage diskutiert.

### Geringer Orts- und Zeitbezug

Generell haben Ökobilanzen einen geringen Orts- und Zeitbezug, welche nur grob in den Systemgrenzen abgesteckt werden (Klöpffer und Grahl 2009). Darunter wird verstanden, dass die potentiellen Umweltwirkungen keinem festen Ort zugeordnet werden können. Auch der Zeithorizont ist nicht eindeutig abschätzbar. Wirken sich die potentiellen Umweltwirkungen nur während der Betriebsphase auf die Umwelt aus oder auch nachwirkend, und wer ist davon betroffen? In welchem Umkreis werden Mensch und Natur am stärksten belastet? Es stellt sich auch die Frage, ob sich die Risiken für die Umwelt ändern, wenn alle Emissionen an einem zentralen Ort freigesetzt werden oder diese

aufgeteilt an vielen Orten emittiert werden. Die Ökobilanz stellt lediglich potentielle Ergebnisse zur Verfügung, welche noch Interpretationsspielraum lassen.

#### Transparenz und Vergleiche

Wie bereits erwähnt sind Vergleiche mit Angaben aus vorhandener Literatur extrem schwierig anzufertigen. Falls Systemgrenzen, Allokationsverfahren, Wirkungsabschätzungsmethoden und Sachbilanzdaten genau bekannt sind, ist es prinzipiell möglich, die untersuchte Anlage auf diese anzupassen und damit einen Vergleich anzustellen. Im Normalfall sind die veröffentlichten Ökobilanzen jedoch nicht ausreichend detailliert dokumentiert und Vergleiche sollten prinzipiell kritisch betrachtet werden.

#### Vollständigkeit der Daten

Die Messungen zu Emissionen wurden mit den vorhandenen Mitteln bestmöglich angegeben, jedoch kann keine Gewähr auf deren Vollständigkeit gegeben werden. Für die Darstellung der Abfallszenarien kann nur ein Ausschnitt der tatsächlichen Abfälle dokumentiert werden, da nur ein Teil der Abfallprozesse in SimaPro vorhanden ist. Ein manuelles Analysieren von zusätzlichen Abfallpfaden ist aufgrund mangelnder Datenlage nicht möglich. Da prinzipiell jede Ökobilanz mit der Transparenz und Darstellung der verwendeten Daten steht und fällt, wird in dieser Arbeit auf eine umfangreiche Dokumentation der Daten großen Wert gelegt.

#### Keine monetäre Betrachtung

In dieser Arbeit werden lediglich potentielle Umweltwirkungen identifiziert, um Entscheidungen auf Basis ökologischer Analysen treffen zu können. Es werden keine Angaben zur Wirtschaftlichkeit der Anlage dargestellt.

## 5. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die untersuchte Holzvergasungsanlage eine ökologisch sinnvolle Alternative zu rein thermischen Biomassekesseln und zur Wärmeerzeugung in fossilen Heiz(kraft)werken ist. Die spezielle Technologie der Schwebefestbettvergasung ermöglicht die Bindung von CO<sub>2</sub> in Form von Holzkohle, welche dem Prozess zusätzlich entnommen werden kann. Mit diesem Zusatznutzen weist die untersuchte Anlage negative CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen auf. In dieser Studie ist zusätzlich die Wärmeverteilung über das Nahwärmenetz enthalten, welche die Systemgrenzen bis hin zum Endkunden ausdehnt. Die berechneten potentiellen Umweltwirkungen lassen eine Einschätzung zu, welche Anlagenkomponenten bzw. Prozesse besonders starke oder schädliche Auswirkungen haben. Durch das Wissen über die kritischen Prozesse im gesamten Lebenszyklus der untersuchten Anlage können Entscheidungshilfen für Anlagenbauer geliefert werden, allerdings lediglich unter dem Gesichtspunkt der ökologischen Bewertung. Eine monetäre Betrachtung ist in dieser Arbeit nicht enthalten.

Zentrale Problemstellung ist die Analyse der Holzvergasungsanlage in Dornbirn inklusive Verteilung der Wärme über ein Nahwärmenetz. Dabei sollen Informationsgrundlagen geschaffen werden, inwieweit eine industrielle Anlage in Hinblick auf deren ökologische Auswirkungen sinnvoll ist, unter anderem mit der Berücksichtigung des zusätzlichen Nutzens der Holzkohle. Um diese Frage vollumfänglich beantworten zu können, bedarf es noch weiterer Forschungsarbeiten in der Zukunft, die mit der gleichen Methode und Vorgehensweise angestellt werden. Es werden weitere Vergleiche mit dezentralen Wärme- und Stromversorgungskonzepten benötigt, die neben Hackschnitzel- und Pelletkesseln bspw. auch Photovoltaik oder Mikro-BHKW miteinbeziehen. Solche Arbeiten dienen der Beantwortung der Frage, ob eine industrielle Nahwärmeversorgung aus Biomasse ökologisch sinnvoller ist, als die dezentrale Erzeugung in Kleinanlagen.

Trotz weiteren Forschungsbedarfs liefern die Ergebnisse der untersuchten Anlage bei einem Vergleich mit bestehender Literatur sowie anhand der Sensitivitätsanalysen die nachfolgend zusammengefassten Erkenntnisse. Der Fokus liegt dabei auf der Wirkungskategorie Klimaänderungen, da in den Vergleichsstudien ebenfalls immer CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen ausgewiesen sind.

Bei der Erzeugung einer kWh<sub>fE</sub> werden 28,1 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen ausgestoßen. Auf die Phase Konstruktion entfallen 19 %, die Hackschnitzel-Bereitstellung 34 % und den Betrieb der Anlage 47 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen. Unter Berücksichtigung der Holzkohle wird eine Bindung von CO<sub>2</sub> ermöglicht. Dies hat zur Folge,

dass pro kWh<sub>fE</sub> 36,8 g CO<sub>2</sub> gebunden werden, was einen negativen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck darstellt. Anhand des Literaturvergleichs kann festgehalten werden, dass die untersuchte Anlage über 30 % niedrigere Umweltwirkungen in der Kategorie Klimaänderungen aufweist, als Nahwärmesysteme, die mit Hackschnitzelkesseln betrieben werden. Ein Vergleichswert für eine Holzvergasungsanlage inklusive Netzbetrieb liegt nicht vor. Wird die untersuchte Anlage mit einem fossil betriebenen Nahwärmenetz verglichen, fallen für dieses 800 % höhere CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen an (siehe Nahwärme fossil, Scharte et al. 2016).

Für die Konstruktion von Gebäuden und Anlagenkomponenten ist die Nutzungszeit ausschlaggebend. Am Beispiel des „kurzlebigen“ BHKW wird deutlich, dass die Auswirkungen sehr stark von der Lebensdauer abhängen. Es werden rund 470 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionen für den Bau aller Anlagenkomponenten ermittelt. Werden diese auf die funktionelle Einheit bezogen, fallen 5,4 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>fE</sub> auf die Phase Konstruktion. Der Bau eines Nahwärmenetzes beeinflusst die potentiellen Umweltwirkungen nur gering. Bei der untersuchten Anlage verursacht das Netz rund 4 % der gesamten Klimaänderungen (CO<sub>2</sub>-Äqu.). Die Asphaltierung der Straßen fällt in jeder untersuchten Wirkungskategorie (bis auf Metall-Verbrauch) am stärksten ins Gewicht.

Die Hackschnitzelbereitstellung ist für die untersuchte Anlage in Hinblick auf die Kategorie Klimaänderung 10 % aufwendiger, als in einem durchschnittlichen europäischen Ernteszenario. Die gesamte Anlage betrachtet, entspricht dies 3 % höheren CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen. Der größte Anteil dieser Phase wird mit 44 % durch den Treibstoffeinsatz für das Hacken des Holzes verursacht.

Die Phase Betrieb verursacht die größten potentiellen Umweltwirkungen. Diese beinhaltet bspw. Trocknungs- und Transportprozesse, welche über 90 % der CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen verursachen. Dabei handelt es sich um maschinelle Prozesse, welche am zentralen Lagerplatz stattfinden und zur weiteren Aufbereitung der Hackschnitzel dienen. Der Umschlag der Hackschnitzel am Lagerplatz verursacht verhältnismäßig die höchsten CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen. Durch den energieaufwendigen und häufigen Einsatz des Radladers werden 27 % der gesamten Emissionen ausgestoßen. Der Radlader ist damit der Prozess mit den größten Umweltwirkungen der untersuchten Anlage.

Insgesamt sind die vergleichsmäßig niedrigen Emissionen, auch ohne Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Bindung der Holzkohle, auf eine umweltschonende Betriebsweise zurückzuführen. Der Einsatz von Strom aus Wasserkraft reduziert die Umweltwirkungen in der Kalkulation stark, ebenso der Einsatz von Biogas als Wärmequelle für die Trocknung.

Das Versauerungs- und Eutrophierungspotential einer mit Holz betriebenen Vergasungsanlage ist in der Regel höher, als bei dem Einsatz von Erdgas.

Durch Austausch der Wirkungsabschätzungsmethode in SimaPro verändern sich die Ergebnisse gegenüber ReCiPe mit IMPACT2002 um lediglich -5 %, was für ein stabiles Ergebnis spricht. Der starke Anstieg von rund 50 % mit ILCD 2011 stammt ausschließlich aus der extrem unterschiedlichen Berechnung für Wärme aus Biogas, welcher laut ILCD über 380 % höhere CO<sub>2</sub>-Äqu. Emissionen zugerechnet werden.

Die Erzeugung von Wärme und Strom aus regenerativen Ressourcen wird in Zukunft eine tragende Rolle in der Energieversorgung einnehmen. Nicht nur die Verknappung fossiler Brennstoffe macht diesen Wandel nötig, sondern auch das Bewusstsein über den anthropogenen Klimawandel forciert ein Umdenken der Gesellschaft und fördert damit die Weiterentwicklung und Erforschung neuer Technologien. Die untersuchte Anlage stellt ein mögliches Konzept dar, wie aus Holz Strom und Wärme erzeugt und gleichzeitig CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre in Form von Holzkohle gebunden werden kann.



## Literaturverzeichnis

2G Energy AG (2016): Technische Spezifikation agenitor 406 BG.

Adams, Paul Richard William (2011): An assessment of UK bioenergy production, resource availability, biomass gasification and life cycle impacts. Thesis (Doctor of Philosophy (PhD)).

Biemann, Kirsten (2015): Vergleichende Ökobilanzierung der semi-zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen. Dissertation. Darmstadt. Online verfügbar unter [http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4377/1/Dissertation\\_KBiemann\\_Ver%C3%B6ffentlichung.pdf](http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4377/1/Dissertation_KBiemann_Ver%C3%B6ffentlichung.pdf), zuletzt geprüft am 12.02.2017.

Carpentieri, Matteo; Corti, Andrea; Lombardi, Lidia (2005): Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO<sub>2</sub> removal. In: *Energy Conversion and Management* 46 (11-12), S. 1790–1808. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.08.010.

Dumfort, Sabrina (2017): Abgasmessung Energiewerk Ilg. Hg. v. Management Center Innsbruck.

Ecoinvent (2013): ecoinvent – The World’s Leading LCA Data-base Launches Version 3.0. Online verfügbar unter [http://www.ecoinvent.org/files/130604\\_mm\\_ecoinvent\\_e\\_def.pdf](http://www.ecoinvent.org/files/130604_mm_ecoinvent_e_def.pdf).

Ecoinvent (2016): softwood forestry, spruce, sustainable forest management DE. Unter Mitarbeit von Frank Werner. Hg. v. Ecoinvent 3. Zürich.

Elsayed, M. A.; Matthews, R.; Mortimer, N. D. (2003): CARBON AND ENERGY BALANCES FOR A RANGE OF BIOFUELS OPTIONS.

Frischknecht, Rolf (2013): Analyse und Beurteilung der Umweltverträglichkeit. Teil 2: Ökobilanzen (Life Cycle assessment, LCA). ETH Zürich, Zürich. Online verfügbar unter [https://www.eco-bau.ch/resources/uploads/Bildungsinstitutionen/130208\\_Frischknecht\\_v1%200.pdf](https://www.eco-bau.ch/resources/uploads/Bildungsinstitutionen/130208_Frischknecht_v1%200.pdf), zuletzt geprüft am 20.05.2017.

Huber, Marcel (2017): Filterung Feinstaubemissionen, 28.07.2017. E-Mail an Elena Käppler.

Hupfaut, Benjamin; Hämmerle, Thomas; Lepuschitz, Marcel (2016): Plant Growth Tests and the Issue of the Analysis of PAHs with Biochar from Gasifier Plants. In: *Energy Procedia* 93, S. 9–13. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.07.142.

Ilg, Tobias (2016): Energiewerk Ilg GmbH. Internetauftritt. Online verfügbar unter <http://biomassehofat.srv272.adino.at/biowaerme/>, zuletzt geprüft am 10.11.2016.

Ilg, Tobias (2017): Persönliches Gespräch. Dornbirn, 2017. Persönliches Gespräch an Elena Käßler.

isoplus (2011): 2 Starre Verbundsysteme. 2.2 isoplus - Einzelrohr. Hg. v. isoplus Ferwärmetechnik Vertriebsgesellschaft mbG. Online verfügbar unter [http://www.isoplus.at/fileadmin/data/downloads/documents/germany/Catalogue\\_German/Kapitel\\_2\\_Starre\\_Verbundsysteme.pdf](http://www.isoplus.at/fileadmin/data/downloads/documents/germany/Catalogue_German/Kapitel_2_Starre_Verbundsysteme.pdf).

Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann (Hg.) (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang (2009): Regenerative Energien in Österreich. Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden (Praxis).

Klima- und Energiefonds (2015): Faktencheck Energiewende 2015. Fakten statt Mythen zur Zukunft der Energieversorgung. In: *Erneuerbare Energie Österreich* (1), S. 12.

Klöpper, Walter; Grahl, Birgit (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: WILEY-VCH.

Kreutner, Georg (2014): Regelungsverfahren zum Betrieb eines Schwebebettvergasers und Schwebebettreaktor. Angemeldet durch Syncraft Engineering GmbH am 15.10.2014. Anmelden: 14189101.0. Veröffentlichungsnr: EP 2 862 914 A1.

lk (Hg.) (2005): Energie aus Holz. Informationsbroschüre der Landwirtschaftskammer. Unter Mitarbeit von Landwirtschaftskammer Niederösterreich. St. Pölten.

Mann, Margaret K.; Spath, Pamela L. (1997): Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined-Cycle Power System. Online verfügbar unter <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/23076.pdf>.

Marheineke, Thorsten (2002): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechnologien. Forschungsbericht. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendungen.

Mäser, Adi (2017): Primärenergieeinsatz zur Biomasseproduktion. Projektarbeit der Biomasse Facharbeiter. Unter Mitarbeit von Tobias Ilg. Hg. v. Energiewerk Ilg. Dornbirn.

Moran, Michael J.; Shapiro, Howard N.; Boettner Daisie D.; Bailey Margaret B. (2014): Fundamentals of engineering thermodynamics. Eighth edition. Hoboken, N.J.: Wiley.

- Österreichischer Biomasse-Verband (2015): Basisdaten 2015. Bioenergie. Hg. v. Österreichischer Biomasse-Verband.
- Prem, Johannes (2015): Nachhaltige Waldwirtschaft in Österreich. Österreichischer Waldbericht 2015. Wien.
- Scharte, Katrin; Seefeldt, Hanna; Koch, Marco K. (2016): Ökobilanzen von Wärmeeerzeugern mit Leistungen von 50 kW bis 500 kW. Fachbericht. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft.
- Sebastián, F.; Royo, J.; Gómez, M. (2011): Cofiring versus biomass-fired power plants. GHG (Greenhouse Gases) emissions savings comparison by means of LCA (Life Cycle Assessment) methodology. In: *Energy* 36 (4), S. 2029–2037. DOI: 10.1016/j.energy.2010.06.003.
- SimPro (2016): SimaPro Database Manual. Methods Library. Unter Mitarbeit von Pré. Hg. v. PRé Consultants.
- Statistik Austria (2014): Energiebilanzen Bundesländer. Vorarlberg 1988-2014. Hg. v. Bundesanstalt Statistik. Online verfügbar unter [http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_NATIVE\\_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=065508](http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=065508), zuletzt geprüft am 10.11.2016.
- SynCraft (2015): Messbericht Abgasmessung, BHKW CW700 Hatlerdorf. Unter Mitarbeit von Georg Kreutner. Hg. v. Syncraft Engineering GmbH. Dornbirn.
- SynCraft (2016): Holzgaskraftwerke. Der Brennstoff macht den Unterschied. Hg. v. SYNCRAFT Automation GmbH. Online verfügbar unter <http://www.syncraft.at/index.php/de/menu-products/menu-holzgaskraftwerk>.
- Umweltinstitut Vorarlberg (2015): Analyseprotokoll Biokohle. Hg. v. Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abteilung Vle - Abfallwirtschaft (1006-0/2015-UI).
- 2009-11: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006.
- WEC (2004): Comparison of energy systems using life cycle assessment. London: World Energy Council.

## Anhang

### - Weitere Ergebnisse der Wirkungsabschätzung – Phase Konstruktion

#### Alle Anlagenkomponenten ohne Berücksichtigung der Nutzungszeit

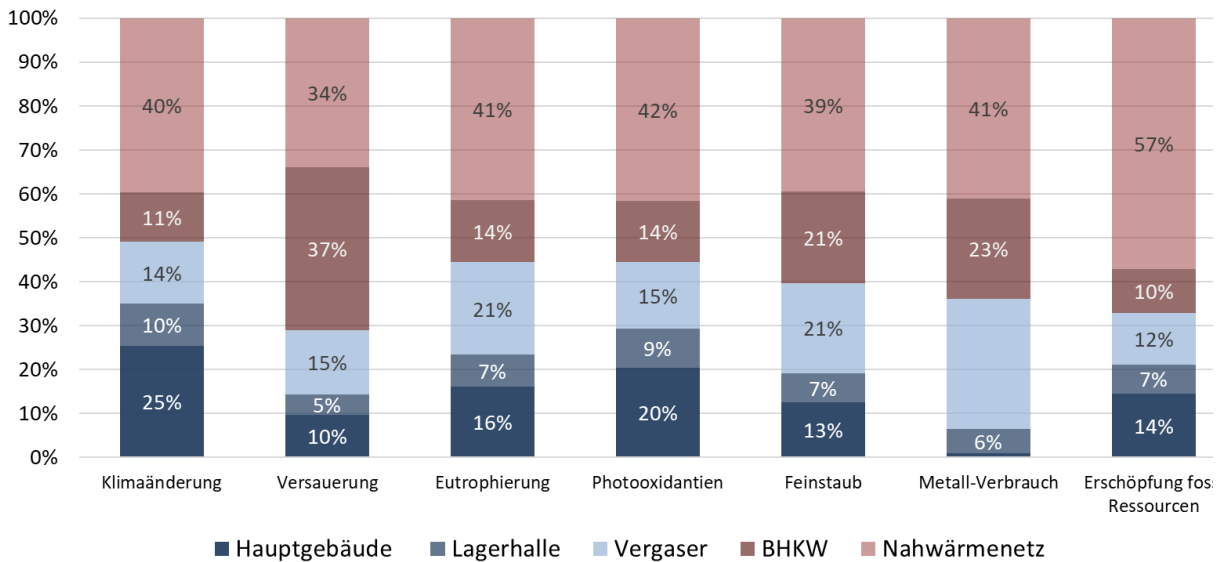


Abbildung 27: Anhang Wirkungsabschätzung Konstruktion: Prozentuelle Anteile Anlagenkomponenten ohne Berücksichtigung Nutzungszeit

Tabelle 32: Anhang Wirkungsabschätzung Konstruktion: Absolutwerte Anlagenkomponenten ohne Berücksichtigung Nutzungszeit

Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Hauptgebäude	Lagerhalle	Vergaser	BHKW	Nahwärmenetz
<b>Klimaänderung</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	469.547	119.038	44.951	66.215	53.374	185.970
<b>Versauerung</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	3.044	295	142	444	1.132	1.031
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	96	15	7	20	14	40
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	1.821	372	160	278	252	760
<b>Feinstaub</b>	kg PM <sub>10</sub> eq	1.573	197	103	324	327	621
<b>Metall-Verbrauch</b>	kg Fe eq	297.260	2.546	16.415	88.311	67.709	122.279
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	kg oil eq	131.709	19.057	8.796	15.427	13.172	75.257

## Hauptgebäude

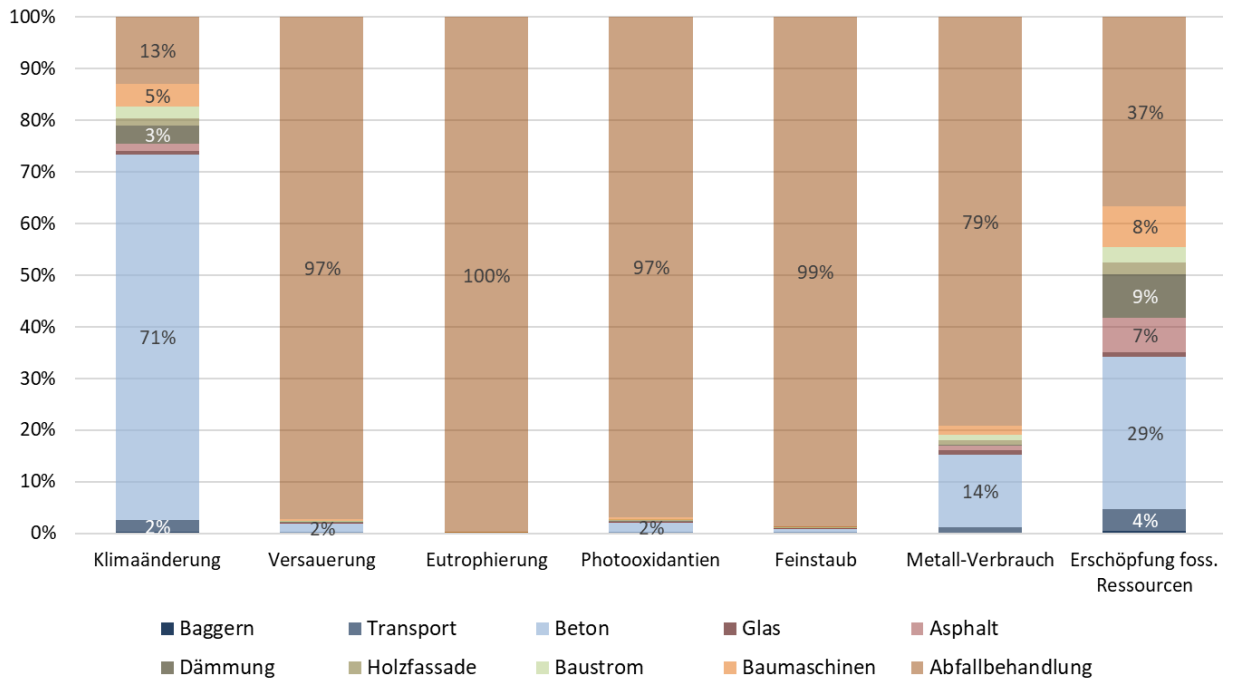


Abbildung 28: Anhang Wirkungsabschätzung Hauptgebäude: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse

Tabelle 33: Anhang Wirkungsabschätzung Hauptgebäude: Absolutwerte der Unterprozesse

Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Baggern	Transport	Beton	Glas
<b>Klimaänderung</b>	kg CO2 eq	1,22E+5	2,58E+2	2,93E+3	8,60E+4	8,89E+2
<b>Versauerung</b>	kg SO2 eq	9,04E+3	2,03E+0	6,51E+0	1,58E+2	7,66E+0
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	8,81E+3	1,19E-1	2,34E-1	8,62	2,23E-1
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	9,08E+3	3,44E+0	6,48E+0	1,75E+2	4,32E+0
<b>Feinstaub</b>	kg PM10 eq	8,91E+3	1,06E+0	3,70E+0	7,10E+1	2,46E+0
<b>Metall-Verbrauch</b>	kg Fe eq	1,11E+4	1,53E+1	1,20E+2	1,55E+3	9,35E+1
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	kg oil eq	2,41E+4	8,84E+1	1,04E+3	7,09E+3	2,27E+2

Fortsetzung Tabelle 33:

Wirkungskategorie	Asphalt	Dämmung	Holz-fassade	Baustrom	Bau-maschinen	Abfall-behandlung
<b>Klimaänderung</b>	1,69E+3	4,18E+3	1,73E+3	2,69E+3	5,47E+3	1,57E+4
<b>Versauerung</b>	8,28E+0	1,43E+1	9,97E+0	6,58E+0	2,70E+1	8,80E+3
<b>Eutrophierung</b>	2,84E-1	4,12E-1	5,46E-1	7,14E-1	1,50E+0	8,80E+3
<b>Photooxidantien</b>	6,49E+0	2,30E+1	1,31E+1	4,92E+0	4,35E+1	8,80E+3

<b>Feinstaub</b>	3,01E+0	5,47E+0	7,06E+0	2,67E+0	1,25E+1	8,80E+3
<b>Metall-Verbrauch</b>	9,64E+1	2,73E+1	9,47E+1	1,31E+2	1,79E+2	8,80E+3
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	1,57E+3	2,06E+3	5,34E+2	7,28E+2	1,89E+3	8,82E+3

### Lagerhalle

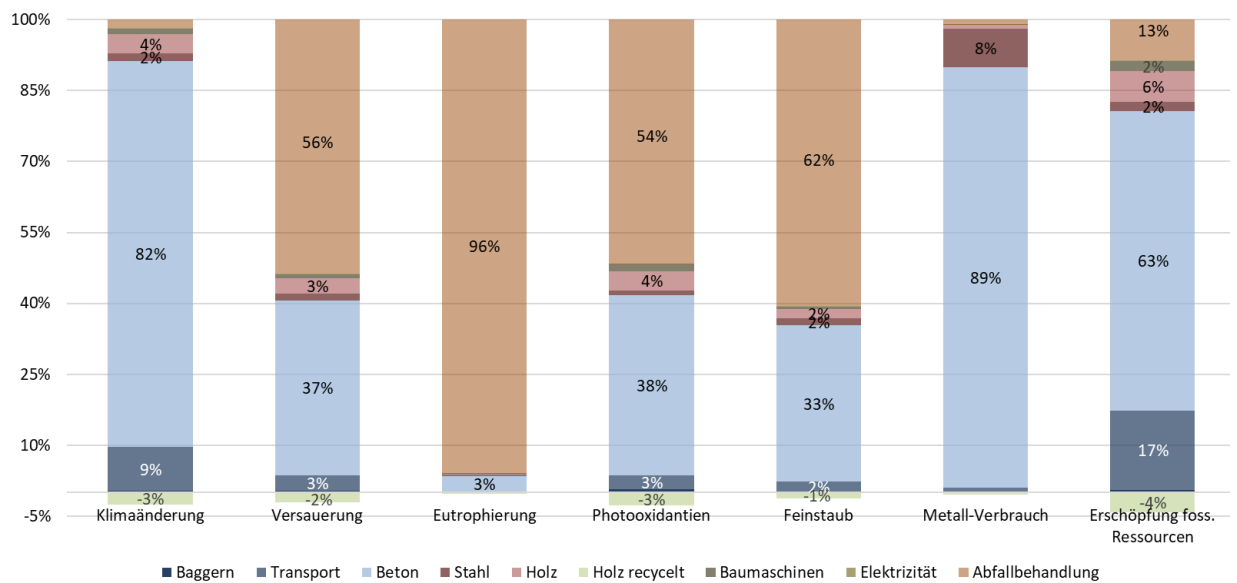


Abbildung 29: Anhang Wirkungsabschätzung Lagerhalle: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse

Tabelle 34: Anhang Wirkungsabschätzung Lagerhalle: Absolutwerte der Unterprozesse

Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Baggern	Transport	Beton	Stahl
<b>Klimaänderung</b>	kg CO2 eq	9,01E+4	3,00E+2	8,41E+3	7,35E+4	1,47E+3
<b>Versauerung</b>	kg SO2 eq	5,87E+2	2,36E+0	1,87E+1	2,17E+2	7,92E+0
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	3,18E+2	1,38E-1	6,73E-1	1,02E+1	2,96E-1
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	6,24E+2	4,00E+0	1,86E+1	2,38E+2	5,56E+0
<b>Feinstaub</b>	kg PM10 eq	5,11E+2	1,23E+0	1,06E+1	1,68E+2	8,06E+0
<b>Metall-Verbrauch</b>	kg Fe eq	3,30E+4	1,77E+1	3,43E+2	2,93E+4	2,72E+3
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	kg oil eq	1,78E+4	1,03E+2	3,00E+3	1,13E+4	3,46E+2

Wirkungskategorie	Holz	Holz recycelt	Bau-maschinen	Elektrizität	Abfall-behandlung
<b>Klimaänderung</b>	3,56E+3	-2,32E+3	1,09E+3	1,80E+2	3,86E+3
<b>Versauerung</b>	1,90E+1	-1,24E+1	5,41E+0	4,38E-1	3,28E+2

<b>Eutrophierung</b>	1,04E+0	-6,78E-1	3,01E-1	4,76E-2	3,06E+2
<b>Photooxidantien</b>	2,58E+1	-1,69E+1	8,70E+0	3,28E-1	3,39E+2
<b>Feinstaub</b>	1,02E+1	-6,62E+0	2,50E+0	1,78E-1	3,16E+2
<b>Metall-Verbrauch</b>	2,21E+2	-1,44E+2	3,58E+1	8,71E+0	4,88E+2
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	1,15E+3	-7,50E+2	3,78E+2	4,85E+1	2,27E+3

## Vergaser

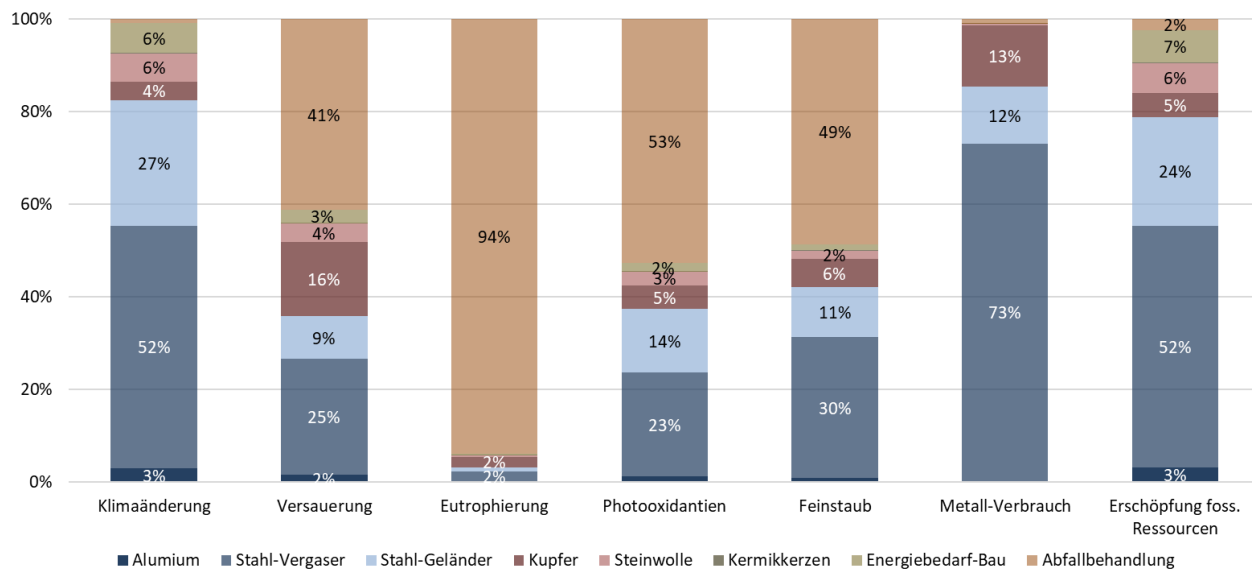


Abbildung 30: Anhang Wirkungsabschätzung Vergaser: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse

Tabelle 35: Anhang Wirkungsabschätzung Vergaser: Absolutwerte der Unterprozesse

Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Aluminium	Stahl-Vergaser	Stahl-Geländer
<b>Klimaänderung</b>	kg CO2 eq	6,62E+4	2,00E+3	3,46E+4	1,79E+4
<b>Versauerung</b>	kg SO2 eq	7,46E+2	1,19E+1	1,87E+2	6,79E+1
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	3,24E+2	5,87E-1	6,96E+0	2,72E+0
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	5,80E+2	7,02E+0	1,31E+2	7,90E+1
<b>Feinstaub</b>	kg PM10 eq	6,27E+2	5,88E+0	1,91E+2	6,78E+1
<b>Metall-Verbrauch</b>	kg Fe eq	8,85E+4	2,51E+2	6,44E+4	1,09E+4
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	kg oil eq	1,56E+04	4,88E+2	8,14E+3	3,66E+3

Fortsetzung Tabelle 35:

Wirkungskategorie	Kupfer	Steinwolle	Kermikerzen	Energiebedarf-Bau	Abfallbehandlung
-------------------	--------	------------	-------------	-------------------	------------------

<b>Klimaänderung</b>	2,70E+3	4,05E+3	6,73E+1	4,22E+3	5,94E+2
<b>Versauerung</b>	1,20E+2	3,00E+1	3,58E-1	2,19E+1	3,07E+2
<b>Eutrophierung</b>	7,46E+0	8,65E-1	1,51E-2	1,02E+0	3,05E+2
<b>Photooxidantien</b>	2,98E+1	1,68E+1	2,18E-1	1,05E+1	3,06E+2
<b>Feinstaub</b>	3,80E+1	1,14E+1	9,08E-1	7,01E+0	3,06E+2
<b>Metall-Verbrauch</b>	1,18E+4	1,77E+2	1,31E+1	1,16E+2	8,31E+2
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	8,05E+2	1,01E+3	1,91E+1	1,08E+3	377,308838

### BHKW

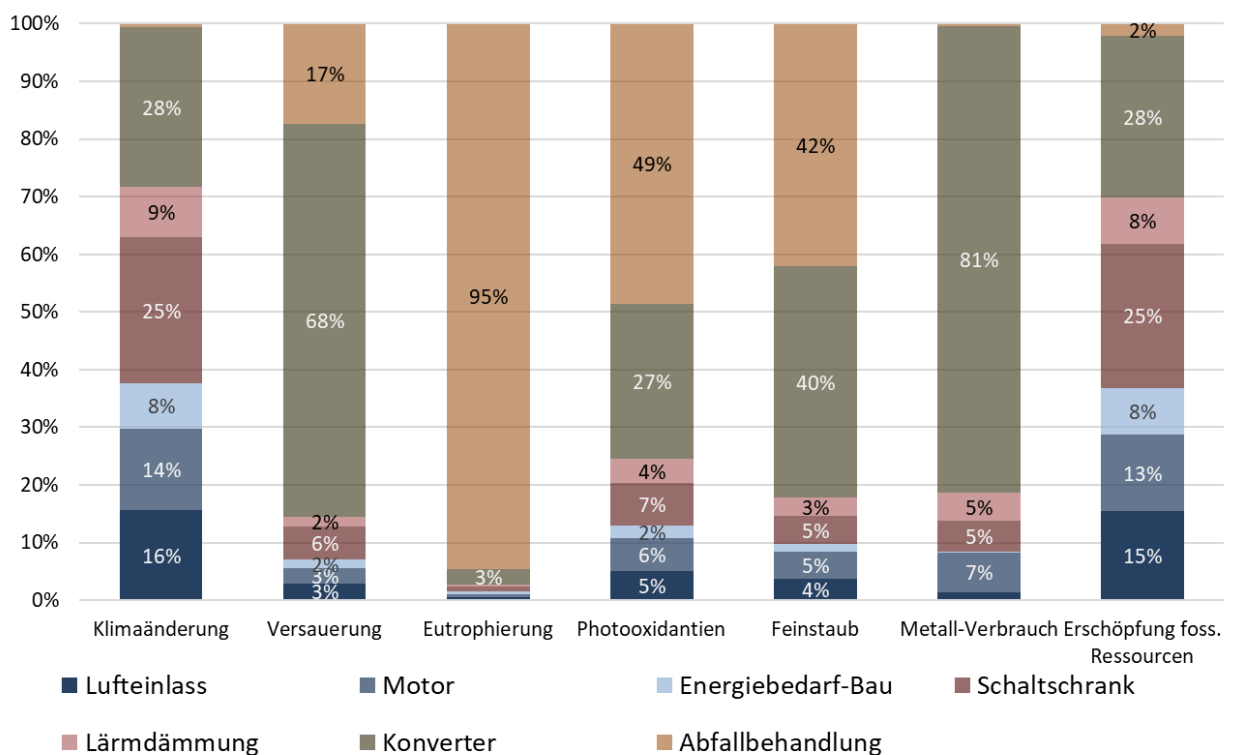


Abbildung 31: Anhang Wirkungsabschätzung BHKW: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse

Tabelle 36: Anhang Wirkungsabschätzung BHKW: Absolutwerte der Unterprozesse

Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Lufteinlass	Motor	Energiebedarf-Bau
<b>Klimaänderung</b>	kg CO2 eq	5,34E+4	8,32E+3	7,58E+3	4,22E+3
<b>Versauerung</b>	kg SO2 eq	1,37E+3	4,04E+1	3,54E+1	2,19E+1
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	2,51E+2	1,49E+0	1,27E+0	1,02E+0
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	4,90E+2	2,46E+1	2,82E+1	1,05E+1



<b>Feinstaub</b>	kg PM10 eq	5,64E+2	2,11E+1	2,67E+1	7,01E+0
<b>Metall-Verbrauch</b>	kg Fe eq	6,80E+4	9,69E+2	4,63E+3	1,16E+2
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	kg oil eq	1,34E+4	2,07E+3	1,80E+3	1,08E+3

Fortsetzung Tabelle 36:

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>Schaltschrank</b>	<b>Lärmdämmung</b>	<b>Konverter</b>	<b>Abfallbehandlung</b>
<b>Klimaänderung</b>	1,35E+4	4,68E+3	1,48E+4	2,92E+2
<b>Versauerung</b>	7,85E+1	2,13E+1	9,34E+2	2,38E+2
<b>Eutrophierung</b>	2,24E+0	8,51E-1	6,62E+0	2,37E+2
<b>Photooxidantien</b>	3,61E+1	2,06E+1	1,32E+2	2,38E+2
<b>Feinstaub</b>	2,82E+1	1,73E+1	2,27E+2	2,37E+2
<b>Metall-Verbrauch</b>	3,63E+3	3,29E+3	5,50E+4	2,68E+2
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	3,36E+3	1,07E+3	3,77E+3	2,60E+2

## Nahwärmenetz

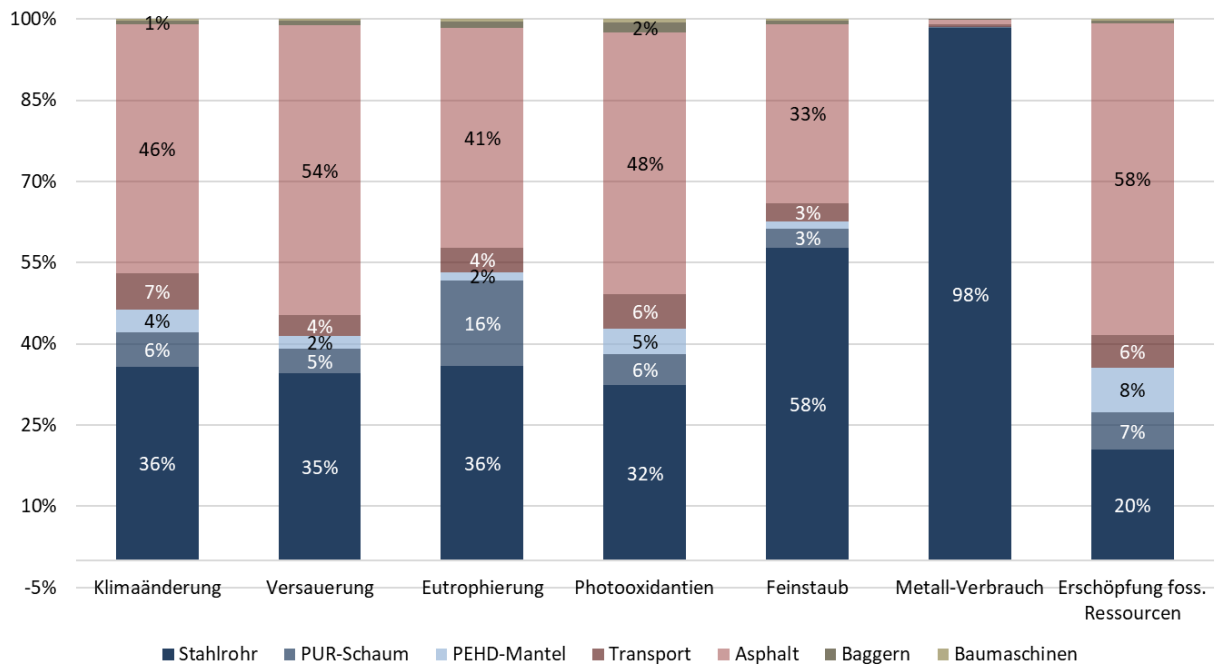


Abbildung 32: Anhang Wirkungsabschätzung Nahwärmenetz: Prozentuelle Anteile der Unterprozesse

Tabelle 37: Anhang Wirkungsabschätzung Nahwärmenetz: Absolutwerte der Unterprozesse

Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Stahlrohr	PUR-Schaum	PEHD-Mantel
<b>Klimaänderung</b>	kg CO2 eq	1,21E+2	4,34E+1	7,70E+0	5,06E+0
<b>Versauerung</b>	kg SO2 eq	6,71E-1	2,32E-1	3,05E-2	1,61E-2
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	2,58E-2	9,26E-3	4,07E-3	3,94E-4
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	4,94E-1	1,60E-1	2,86E-2	2,32E-2
<b>Feinstaub</b>	kg PM10 eq	4,04E-1	2,34E-1	1,41E-2	5,57E-3
<b>Metall-Verbrauch</b>	kg Fe eq	7,96E+1	7,83E+1	1,11E-1	1,34E-2
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	kg oil eq	4,90E+1	1,00E+1	3,41E+0	4,07E+0

Wirkungskategorie	Einheit	Transport	Asphalt	Baggern	Baumaschinen
<b>Klimaänderung</b>	kg CO2 eq	8,21E+0	5,57E+1	6,44E-1	4,47E-1
<b>Versauerung</b>	kg SO2 eq	2,54E-2	3,60E-1	5,07E-3	2,21E-3
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	1,16E-3	1,05E-2	2,98E-4	1,23E-4
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	3,12E-2	2,39E-1	8,60E-3	3,55E-3
<b>Feinstaub</b>	kg PM10 eq	1,33E-2	1,34E-1	2,64E-3	1,02E-3
<b>Metall-Verbrauch</b>	kg Fe eq	3,33E-1	7,51E-1	3,81E-2	1,46E-2
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	kg oil eq	2,91E+0	2,82E+1	2,21E-1	1,54E-1

- Weitere Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

Tabelle 38: Anhang Sensitivitätsanalysen: Absolutwerte EU-Standardszenario

Wirkungskategorie	Einheit	Summe	Konstruktion	BS-Bereitstellung	Betrieb	Delta zu Basis 1
Klimaänderung	kg CO2 eq	7,18E-2	5,46E-3	8,59E-3	5,77E-2	+156%
Versauerung	kg SO2 eq	8,34E-4	5,52E-5	2,97E-5	7,49E-4	+19%
Eutrophierung	kg N eq	8,63E-5	1,21E-6	5,18E-6	7,99E-5	+7%
Photooxidantien	kg NMVOC	1,21E-3	2,22E-5	8,30E-5	1,10E-3	+8%
Feinstaub	kg PM10 eq	3,25E-4	2,24E-5	1,50E-5	2,88E-4	+13%
Metall-Verbrauch	kg Fe eq	6,55E-3	4,47E-3	3,17E-4	1,76E-3	+7%
Erschöpfung foss. Ressourcen	kg oil eq	2,18E-2	1,42E-3	2,55E-3	1,78E-2	+177%

Tabelle 39: Anhang Sensitivitätsanalysen: Gesamtdarstellung aller Wirkungskategorien in der ReCiPe Midpoint (h) Methode

Wirkungskategorien ReCiPe Midpoint	Einheit	Summe
Climate change (Klimaänderung)	kg CO2 eq	2,81E-2
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	3,48E-9
Marine Eutrophication (Versauerung)	kg SO2 eq	7,03E-4
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,76E-5
Eutrophierung	kg N eq	8,07E-5
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,17E-2
Photochemical oxidant formation (Photooxidantien)	kg NMVOC	1,12E-3
Particulate matter formation (Feinstaub)	kg PM10 eq	2,88E-4
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	8,23E-6
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1,27E-3
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1,14E-3
Ionising radiation	kBq U235 eq	1,90E-3
Agricultural land occupation	m2a	2,87E-3
Urban land occupation	m2a	6,22E-4
Natural land transformation	m2	7,44E-6
Water depletion	m3	1,38E-4
Metal depletion (Metall-Verbrauch)	kg Fe eq	6,12E-3
Fossil depletion (Erschöpfung foss. Ressourcen)	kg oil eq	7,86E-3

Tabelle 40: Anhang Sensitivitätsanalysen: Gesamtdarstellung aller Wirkungskategorien in der IMPACT 2002+ Methode

Wirkungskategorien IMPACT2002+	Einheit	Summe
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	5,10E-4
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	1,98E-3
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	2,74E-4
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	1,92E-1
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	3,44E-9

Respiratory organics	kg C2H4 eq	1,44E-5
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	3,56E+0
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	3,23E+0
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	1,07E-2
Land occupation	m2org.arable	1,24E-3
Aquatic acidification	kg SO2 eq	1,45E-3
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	6,47E-6
Global warming	kg CO2 eq	2,67E-2
Non-renewable energy	MJ primary	3,65E-1
Mineral extraction	MJ surplus	8,15E-3

*Tabelle 41: Anhang Sensitivitätsanalysen: Gesamtdarstellung aller Wirkungskategorien in der ILCD 2011 Methode*

<b>ILCD 2011</b>	<b>Einheit</b>	<b>Summe</b>
Climate change	kg CO2 eq	4,30E-2
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	3,44E-9
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	3,09E-8
Human toxicity, cancer effects	CTUh	3,83E-9
Particulate matter	kg PM2.5 eq	3,46E-5
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq	1,90E-3
Ionizing radiation E (interim)	CTUe	9,62E-9
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,66E-3
Acidification	molc H+ eq	1,56E-3
Terrestrial eutrophication	molc N eq	8,25E-3
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,76E-5
Marine eutrophication	kg N eq	7,55E-4
Freshwater ecotoxicity	CTUe	7,64E-1
Land use	kg C deficit	2,28E-1
Water resource depletion	m3 water eq	-2,21E-5
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq	2,13E-6

*Tabelle 42: Anhang Sensitivitätsanalysen: Absolutwerte der Gesamtanlage inklusive Abriss und Entsorgung Nahwärmenetz*

<b>Wirkungs-kategorie</b>	<b>Einheit</b>	<b>Szenario Summe</b>	<b>Kon- struktion</b>	<b>BS- Bereitstellung</b>	<b>Betrieb</b>	<b>Delta zu Basis 1</b>
<b>Klimaänderung</b>	kg CO2 eq	2,89E-2	6,23E-3	9,50E-3	1,31E-2	+3%
<b>Versauerung</b>	kg SO2 eq	7,07E-4	5,92E-5	3,43E-5	6,13E-4	+1%
<b>Eutrophierung</b>	kg N eq	8,09E-5	1,34E-6	1,86E-6	7,77E-5	0%
<b>Photooxidantien</b>	kg NMVOC	1,13E-3	2,52E-5	4,80E-5	1,05E-3	0%
<b>Feinstaub</b>	kg PM10 eq	2,89E-4	2,39E-5	1,61E-5	2,50E-4	+1%
<b>Metall- Verbrauch</b>	kg Fe eq	6,13E-3	4,49E-3	3,88E-4	1,26E-3	0%
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	kg oil eq	8,19E-3	1,74E-3	3,29E-3	3,16E-3	+4%

- Weitere Ergebnisse des Literaturvergleichs

*Tabelle 43: Anhang Literaturvergleich: Absolutwerte der Gesamtanlage ohne Netzbau und Netzverluste bezogen auf Basisszenario 1 (ohne CO<sub>2</sub>-Bindung)*

<b>Wirkungs- kategorie</b>	<b>Summe</b>	<b>Konstruktion</b>	<b>BS- Bereitstellung</b>	<b>Betrieb</b>	<b>Delta zu Basis 1</b>
<b>Klimaänderung</b>	2,51E-2	3,86E-3	8,92E-3	1,23E-2	-10,5%
<b>Versauerung</b>	6,52E-4	4,46E-5	3,22E-5	5,76E-4	-7,2%
<b>Eutrophierung</b>	7,55E-5	8,61E-7	1,74E-6	7,29E-5	-6,5%
<b>Photooxidantien</b>	1,05E-3	1,58E-5	4,50E-5	9,89E-4	-6,6%
<b>Feinstaub</b>	2,66E-4	1,68E-5	1,51E-5	2,34E-4	-7,6%
<b>Metall- Verbrauch</b>	4,92E-3	3,38E-3	3,64E-4	1,18E-3	-19,6%
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	6,89E-3	8,37E-4	3,09E-3	2,97E-3	-12,4%

*Tabelle 44: Anhang Literaturvergleich: Absolutwerte der Gesamtanlage ohne Netzbau und Netzverluste bezogen auf Basisszenario 2 (mit CO<sub>2</sub>-Bindung)*

<b>Wirkungs- kategorie</b>	<b>Summe</b>	<b>Konstruktion</b>	<b>BS- Bereitstellung</b>	<b>Betrieb</b>	<b>Delta zu Basis 1</b>
<b>Klimaänderung</b>	-3,57E-2	3,86E-3	8,92E-3	-4,85E-2	-2,8%
<b>Versauerung</b>	6,52E-4	4,46E-5	3,22E-5	5,76E-4	-7,2%
<b>Eutrophierung</b>	7,55E-5	8,61E-7	1,74E-6	7,29E-5	-6,5%
<b>Photooxidantien</b>	1,05E-3	1,58E-5	4,50E-5	9,89E-4	-6,6%
<b>Feinstaub</b>	2,66E-4	1,68E-5	1,51E-5	2,34E-4	-7,6%
<b>Metall- Verbrauch</b>	4,92E-3	3,38E-3	3,64E-4	1,18E-3	-19,6%
<b>Erschöpfung foss. Ressourcen</b>	6,89E-3	8,37E-4	3,09E-3	2,97E-3	-12,4%

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Dornbirn, am 28. August 2017

Elena Käßler