



Universität für Bodenkultur Wien

Department für Biotechnologie

Institut für Angewandte Mikrobiologie

Vorstand: Ao. Univ. Prof. Dr. Karola Vorauer-Uhl,

Betreuer: Ao. Univ. Prof. DI Dr. Peter Holubar

Öko-Strom aus Biomasse

Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Biomasse- Technologien zur Stromerzeugung mittels Lebenszyklusanalysen

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von
DI Sonja Siegl

Wien, November 2010

Danksagung

Dass es so weit gekommen ist, dass ich nun die Danksagung meiner Dissertation verfassen darf, habe ich vielen Personen zu verdanken.

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Peter Holubar dafür bedanken, dass er mir durch seine Offenheit neuen Thematiken gegenüber die Arbeit an der vorliegenden Dissertation ermöglicht hat. In der Folge bedanke ich mich für die Betreuung und die fachlichen Ratschläge.

Bei Prof. Rudolf Braun und Prof. Hermann Hofbauer möchte ich mich für das Mitwirken im Beratungsteam meines „Projektes Dissertation“ sowie ihre Anmerkungen und Ratschläge im Zuge der Zwischenbesprechungen bedanken.

Ganz besonderer Dank gilt Michael Laaber, der mir, die von ihm in einem Projekt des IFA Tulln („Aufbau eines Bewertungssystems für Biogasanlagen – „Gütesiegel Biogas“.“ gefördert durch das BMVIT in der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft) erhobenen Daten, zur weiteren Bearbeitung zu Verfügung gestellt hat und auch danach immer offen für alle meine Fragen war.

Bei Roland Kirchmayr und Günther Bochmann (IFA Tulln) möchte ich mich dafür bedanken, dass sie mir die Mitarbeit in dem Projekt „Ökobilanz Biogas - Erfolgsfaktoren zur nachhaltigen Nutzung der Biogastechnologie am Beispiel ausgewählter Biogasanlagen“ (gefördert durch den Klima- und Energiefond in der Programmlinie Energie der Zukunft) ermöglicht haben, welche mir neue Denkanstöße in Bezug auf die Methodik der Ökobilanz durch das Fachwissen von Gerfried Jungmeier und Johanna Pucker (Joanneum Research), sowie in Bezug auf die Emissionen durch das Gärrestmanagement durch das Fachwissen von Erich M. Pötsch, Franz-Josef Ebner-Ornig (LFZ Raumber-Gumpenstein) und Arnold Stuhlbacher (Joanneum Research), gebracht hat.

Im familiären Umfeld möchte ich mich bei meinen Eltern Walter und Emmi dafür bedanken, dass sie es immer als selbstverständlich angesehen haben, meinen doch recht langen Ausbildungsweg auf allen Ebenen zu unterstützen.

Bei meinen Schwiegereltern Uwe und Lisi möchte ich mich für die Übernahme der Haupt-Kinderbetreuungs-Aufgabe bedanken, ohne die das Zustandekommen dieser Dissertation wahrscheinlich nur sehr schwer möglich gewesen wäre. Als weitere Unterstützer bei der Kinderbetreuung möchte ich mich bei Andrea und Astrid sowie Walter und Mona für das spontane Einspringen bedanken.

Bei meinen Kindern Ben und Lia möchte ich mich dafür bedanken, dass sie bei den ambitionierten Plänen ihrer Mama so weit möglich immer verständnisvoll mitgespielt haben.

Und „last but not least“ möchte ich mich bei meinem Mann, Arno für die liebevolle Unterstützung in allen Bereichen von der Kinderbetreuung bis hin zu fachlichen, persönlichen und haushaltstechnischen Belangen ganz ganz herzlich bedanken.

Wien, im November 2010

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Umweltauswirkungen der Stromproduktion aus Biomasse durch bio-chemische Umwandlung (Vergärung von Energiepflanzen, Wirtschaftsdüngern und organischen Reststoffen zu Biogas mit anschließender Verstromung in einem BHKW = Biogas-System) bzw. thermo-chemische Umwandlung (Verbrennung fester Biomasse mit anschließender Stromproduktion durch einen Dampfturbinenprozess sowie Vergasung fester Biomasse und anschließende Verstromung des Produktgases in einem Gasmotor = Holz-System) mit Hilfe der Lebenszyklusanalyse untersucht.

Bei der Erstellung der Lebenszyklusanalyse wurde nach der ISO-Norm 14040:2006 (Umweltmanagement – Ökobilanz) vorgegangen. Für die Allokation der Umweltwirkungen auf Koppelprodukte wurde die Methode der Systemerweiterung verwendet (z.B. Gutschriften für Wärme und Dünger). Für die eingesetzten Inputs Fläche, Wirtschaftsdünger und Reststoffe wurden Gutschriften für Referenznutzungen, die die Verwendung dieser Inputs für die Situation ohne die untersuchten Anlagen beschreiben, verrechnet. Die Sachbilanz wurde auf Basis von regionalen Daten (erhoben in persönlichen Interviews mit Anlagenbetreibern), Literaturdaten sowie Berechnungsmodellen aus der Literatur und globalen Daten (Ecoinvent Datenbank) erstellt. Für die Wirkungsabschätzung wurde der Base-Line-Ansatz der international gebräuchlichen Methode CML 2001 verwendet.

Insgesamt ergeben sich für das Biogas-System Einsparungen in den Wirkungskategorien ADP, GWP, AP, EP, ODP, LUC, und TAETP. In den Wirkungskategorien POCP, HTP, FAETP und MAETP kommt es auch nach Abzug der Gutschriften zu Emissionen. Die Lebenszyklusabschnitte mit der größten Umweltrelevanz sind je nach Wirkungskategorie die Verbrennung des Biogases im BHKW (POCP), die Gärrestausbringung (AP; EP; LUC) sowie die Bereitstellung der Infrastruktur (Toxizitätspotentiale).

Für das Holz-System ergeben sich insgesamt Einsparungen in den Wirkungskategorien ADP, GWP, POCP, ODP, HTP, TAETP und MAETP. In den Wirkungskategorien AP, EP, LUC und FAETP kommt es nach Abzug der Gutschriften zu Emissionen. Die Lebenszyklusabschnitte mit der größten Umweltrelevanz sind je nach Wirkungskategorie die Produktion der Biomasse (ADP, GWP, ODP, LUC) sowie der Betrieb der Anlage (AP, EP, FAETP).

Bei beiden Systemen haben die Gutschriften einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Während sich im Biogas-System das Treibhauspotential zu ca. je einem Drittel aus CH₄-, N₂O- und CO₂-Emissionen fossilen Ursprungs zusammensetzt, wird es beim Holz-System überwiegend (92%) durch CO₂-Emissionen fossilen Ursprungs verursacht. Für die versauernde Wirkung sind im Biogas-System überwiegend NH₃ – Emissionen aus der Gärrestlagerung und –ausbringung (77%) und im Holz-System überwiegend NO_x-Emissionen aus der Verbrennung (70%) verantwortlich.

Im Vergleich mit anderen erneuerbaren und fossilen Stromerzeugungstechnologien liegen beide Biomasse-Technologien unter Berücksichtigung der Gutschriften nach der Stromproduktion aus Wasserkraft an 2. (Biogas) und 3. Stelle (Holz) des Rankings, vor Windkraft und Photovoltaik. Ohne Berücksichtigung der Gutschriften würde das Holz-System an 9. Stelle (hinter Strom aus Erdgas) und das Biogas-System an 12. Stelle (von 13 betrachteten Technologien) hinter Steinkohle und dem UCTE-Mix, aber vor Strom aus Erdöl liegen.

Auf Basis der Ergebnisse konnten Optimierungspotentiale für beide Biomasse-Technologien abgeleitet werden.

Abstract

In the present paper the environmental impacts of electricity production from biomass through bio-chemical conversion (anaerobic digestion of energy crops, manure and organic residues and following electricity production in a CHP = biogas-system) and thermo-chemical conversion (combustion of solid biomass with following electricity production in a steam turbine process or gasification of solid biomass and following electricity production in a gas engine = wood-system) have been investigated by means of life cycle assessment.

The life cycle assessment was performed according to the international standard (ISO 14040:2006). For the allocation of environmental burdens to different co-products the system-expansion method was used (e.g. credits for heat and fertilizer). For the main-inputs agricultural land, manure and residues a credit for the reference use of these inputs in the situation without the biomass conversion plants has been given. The inventory analysis is based on local data (from personal interviews with plant operators), literature data and calculation models from literature and global data (from the ecoinvent database). For the impact assessment the base-line approach of the international known CML 2001 method has been used.

The results show, that in total, the electricity-production in the biogas-system leads to emission-savings in the impact categories ADP, GWP, AP, EP, ODP, LUC, and TAETP. In the impact categories POCP, HTP, FAETP and MAETP emissions remain even after deduction of credits. The life cycle stages with the highest environmental impacts are the combustion of the biogas in the CHP (POCP), the spreading of digestate (AP, EP, LUC) and the provision of the infrastructure (toxicity potentials).

Electricity-production in the wood-system shows emission-savings in the impact categories ADP, GWP, POCP, ODP, HTP, TAETP and MAETP. In the impact categories AP, EP, LUC and FAETP emissions remain even after deduction of credits. The life cycle stages with the highest environmental impacts are the production of biomass (ADP, GWP, ODP, LUC) and the operation of the plant (AP, EP, FAETP).

In both systems the given credits show high influence on the overall results.

For the biogas-system the GWP is made up of approximately one third from CH₄-, N₂O- and CO₂-emissions from fossil origins each while in the wood-system 92% originate from CO₂-emissions from fossil origins. For the AP the originating substances are different for the two technologies too: in the biogas-system the main part (77%) originates from NH₃ – emissions from the storage and spreading of digestate while in the wood system the main part (70%) originates from NO_x-emissions from combustion.

In comparison to other renewable and fossil electricity generation systems it showed that both technologies (with consideration of the credits) are ranked 2nd (biogas-system) and 3rd (wood-system) after hydro-power but before wind-power and photovoltaic-power. Without consideration of the credits the wood-system would be on 9th place after electricity from natural gas and the biogas-system on 12th place after electricity from hard coal and the UCTE-production-mix but before electricity from petroleum.

On basis of the results potentials of improvement for each biomass-technology could be deducted.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1.	Ökostromgesetz	2
1.2.	Umweltwirkung Erneuerbarer Energien	4
1.3.	Möglichkeiten der Energiegewinnung aus Biomasse	6
1.4.	Bio-chemische Umwandlung: Vergärung	8
1.5.	Thermo-chemische Umwandlung: Verbrennung und Vergasung	13
1.6.	Lebenszyklusanalyse.....	18
1.7.	Stand der Bewertung von Umweltauswirkungen erneuerbarer Energiesysteme	24
2.	Problemstellung	27
3.	Methoden	28
3.1.	Ziel und Untersuchungsrahmen	28
3.1.1.	Funktionelle Einheit.....	28
3.1.2.	Beschreibung der untersuchten Systeme sowie der Systemgrenzen und Allokationsmethoden.....	28
3.1.3.	Wirkungsabschätzungsmethode	33
3.2.	Sachbilanz	37
3.2.1.	Pflanzenproduktion	42
3.2.2.	Hackschnitzelproduktion	44
3.2.3.	Gas- bzw. Zündstrahlmotoren	47
3.2.4.	Hackschnitzel-Verbrennung bzw. Vergasung.....	50
3.2.5.	Emissionen durch das Gärrestmanagement	51
3.2.6.	Infrastruktur.....	59
3.2.7.	Emissionen bei der Kompostierung und Ausbringung des Kompostes.....	60
3.2.8.	Bereitstellung von Wärme mit dem österr. Wärmemix 2005.....	62
3.3.	Wirkungsabschätzung und Auswertung	63
4.	Ergebnisse und Diskussion.....	64
4.1.	Biogas-System	64
4.1.1.	Betriebsparameter der untersuchten Anlagen des Biogas-Systems.....	64
4.1.2.	Ergebnisse der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des Biogas-Systems für alle Wirkungskategorien.....	64
4.1.3.	Gesamtergebnisse des Biogas-Systems für alle Wirkungskategorien.....	86
4.1.4.	Sensitivitätsanalysen Biogas-System.....	89
4.1.5.	Verbesserungspotentiale Biogas-System.....	96

4.2.	Holz-System	99
4.2.1.	Betriebsparameter der untersuchten Anlagen des Holz-Systems.....	99
4.2.2.	Ergebnisse der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien:.....	99
4.2.3.	Gesamtergebnisse des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien.....	110
4.2.4.	Sensitivitätsanalysen Holz-System	113
4.2.5.	Verbesserungspotentiale Holz-System	118
4.3.	Vergleich der Ergebnisse mit Literaturdaten	119
4.4.	Vergleich: Biogas- und Holz-System.....	127
4.5.	Belastbarkeit der Ergebnisse	130
4.6.	Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener erneuerbarer und fossiler Technologien zur Stromerzeugung	132
4.7.	Optimierungspotentiale der Biomasse-Technologien	140
5.	Zusammenfassung	143
5.1.	Ergebnisse	144
5.2.	Vergleich zwischen Biogas- und Holz-System sowie mit anderen Stromerzeugungstechnologien	147
5.3.	Optimierungspotentiale	150
6.	Literaturverzeichnis.....	153
7.	Tabellenverzeichnis	162
8.	Abbildungsverzeichnis	165
9.	Anhang	170
10.	Abkürzungsverzeichnis	184
11.	Lebenslauf/CV	185

1. Einleitung

Die derzeitigen weltweiten Trends von Energieversorgung und -verbrauch sind eindeutig nicht zukunftsfähig, in ökologischer ebenso wie wirtschaftlicher oder sozialer Hinsicht. Laut World Energy Outlook 2008 der International Energy Agency (IEA 2008) hängt das zukünftige Wohlergehen der Menschheit davon ab, wie gut es gelingt, die zwei zentralen Energieherausforderungen der heutigen Zeit zu bewältigen: Sicherung einer verlässlichen und erschwinglichen Energieversorgung und rasche Umstellung auf ein CO₂-armes, leistungsfähiges und umweltschonendes Energiesystem. Langfristig stellt erneuerbare Energie die einzige Option der Energieaufbringung dar. Die Entwicklung der erneuerbaren Energieaufbringung ist daher neben der Entwicklung der Energieeffizienz und der Reduktion der konsumierten Energiedienstleistungen besonders wichtig. Österreich hat auf dem Weg zu einem nachhaltigen Energie- und Gesellschaftssystem internationale Verpflichtungen wie das Kyoto-Protokoll oder das EU Klima- und Energiepaket 2020 unterzeichnet. Gemäß dieses Energie- und Klimapakets der EU (Richtlinie 2009/28/EG) ist Österreich dazu verpflichtet den Anteil Erneuerbarer Energieträger am Bruttoendenergieverbrauch bis 2020 auf 34 Prozent (am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor auf 10 Prozent) zu erhöhen sowie seine Treibhausgasemissionen um mindestens 16 Prozent bezogen auf die Emissionen des Jahres 2005 zu reduzieren (ohne Emissionshandel).

Österreich gehört zu den Ländern mit den höchsten Anteilen Erneuerbarer Energien in Europa. (Einen höheren Anteil haben nur Schweden, Lettland und Finnland.) Zu den für Österreich relevanten Quellen für Erneuerbare Energie zählen Wasserkraft, Wind- und Sonnenenergie, Umgebungswärme, Biomasse, Deponie-, Klär- und Biogas. Unter den Begriff Biomasse fallen laut Definition der EU-Richtlinie neben fester Biomasse (Brennholz, Hackschnitzel, Holzpellets, Stroh etc.) auch Abfälle und Reststoffe der Landwirtschaft mit biologischem Ursprung (einschließlich pflanzlicher und tierischer Stoffe), der Forstwirtschaft und damit verbundener Wirtschaftszweige, sowie der biologisch abbaubare Teil von Abfällen aus Industrie und Haushalten (BMWFJ 2010). Abbildung 1 zeigt die Anteile der verschiedenen Sparten erneuerbarer Energie am energetischen Endverbrauch Österreichs für das Jahr 2008.

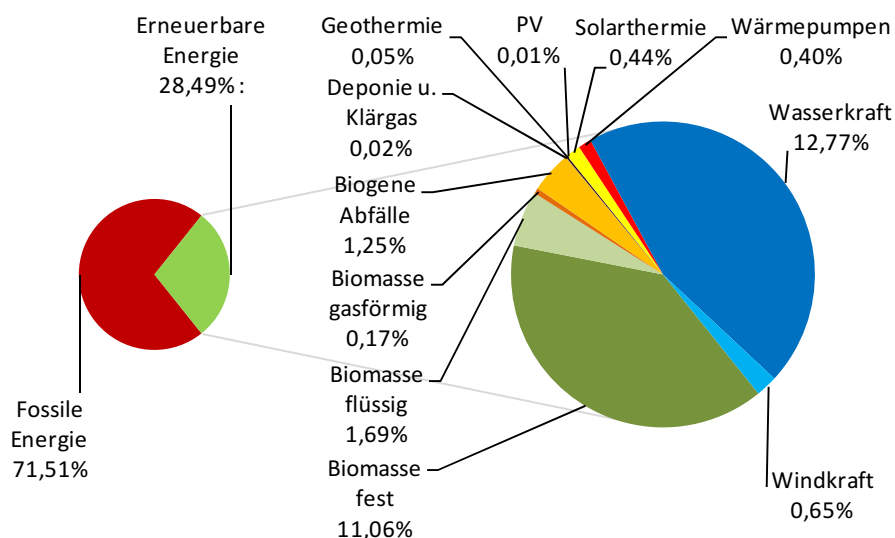


Abbildung 1: Anteile der verschiedenen Sparten erneuerbarer Energie an der Endenergie in Österreich 2008 (eigener Entwurf nach BMLFUW 2009).

Die größten Anteile erneuerbarer Energie stammen aus der Nutzung der Wasserkraft und der Biomasse. Im Jahr 2008 betrug der Anteil erneuerbarer Energie bezogen auf die Stromerzeugung (Gesamtaufbringung von elektrischem Strom) 55,4%, bezogen auf die Wärmeerzeugung (Endenergieverbrauch für Wärme) 34,0% und bezogen auf die Mobilität (Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr) 5,3%, wobei Biodiesel, Bioethanol und Pflanzenöl zum Einsatz kamen.

1.1. Ökostromgesetz

Um die Ökostromproduktion in Österreich zu steigern und die in den EU-Richtlinien vorgegeben Zielwerte erreichen zu können, wurde mit dem Ökostromgesetz 2002 (BGBl. I Nr. 149/2002) ein gesetzliches Förderregime geschaffen. Dieses fördert die Stromproduktion aus Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik, fester, flüssiger oder gasförmiger Biomasse, Deponie- bzw. Klärgas und Geothermie. Da größere Wasserkraftwerke zu konkurrenzfähigen Preisen produzieren können, werden Wasserkraftanlagen nur bis zu einer Engpassleistung von 20 MW durch dieses Gesetz gefördert.

Ziel des ersten Ökostromgesetzes war es, „den Anteil der Erzeugung der elektrischen Energien in Anlagen auf Basis erneuerbarer Energieträger in einem Ausmaß zu erhöhen, dass im Jahr 2010 der in der EU Richtlinie 2001/77/EG als Referenzwert angegebene Zielwert von 78,1 % erreicht wird.“

Die Förderung erfolgt über jährlich mittels Verordnung festgesetzte Einspeisetarife in Cent pro kWh. Diese werden je nach Anlagentyp, -größe und gegebenenfalls eingesetzter Substrate festgelegt und gelten für einen Zeitraum von zumeist 13 bis 15 Jahren. Nur Wasserkraftanlagen werden durch einen im Gesetz festgelegten Investitionszuschuss unterstützt, welcher je nach Anlagengröße zwischen 10 und 30% liegt.

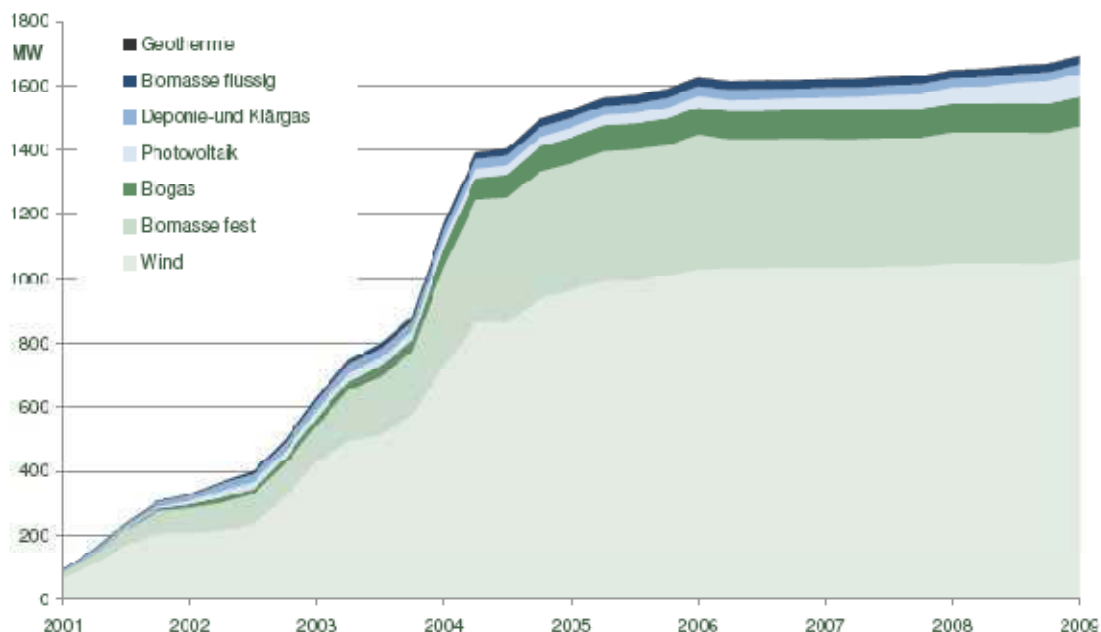


Abbildung 2: Entwicklung der anerkannten¹ Ökostromanlagen (ohne Kleinwasserkraft) von 2002 bis 2009 (Stand jeweils 31.12.) (Energie-Control 2010)

¹ Im Ökostrombericht 2010 wird zwischen anerkannten und in Betrieb befindlichen Anlagen unterschieden. Anerkannte Anlagen sind jene, die zwar per Bescheid als Ökostromanlagen anerkannt, jedoch noch nicht notwendigerweise Fertiggestellt oder zur Gänze in Betrieb sind.

Das Ökostromgesetz 2002 löste einen Investitionsboom in Ökostromanlagen aus. Zwischen 2003 und 2006 stieg die Engpassleistung der sich in Betrieb befindlichen Ökostromanlagen (ohne Kleinwasserkraft) von 491,4 MW auf 1318,5 MW (siehe Abbildung 2).

2006 erfolgte eine Novelle des Ökostromgesetzes (BGBl. I Nr. 105/2006), wodurch Einspeisetarife und Tarifaufzeiten gekürzt, das Förderbudget gedeckelt sowie weitere Bedingungen für die Gewährung der Förderung wie beispielsweise ein Brennstoffnutzungsgrad von mindestens 60% eingeführt wurden. Dadurch kam es ab 2006 annähernd zu einem Ausbaustopp bei Ökostromanlagen (siehe Abbildung 2). Die Steigerung der tatsächlich eingespeisten sonstigen Ökostrommengen bis Ende 2009 ist auf die Inbetriebnahme von Ökostromanlagen zurückzuführen, die bereits in den Jahren davor genehmigt wurden.

Die verstärkte Nachfrage nach Rohstoffen, die für die Gewinnung von Ökostrom aus flüssiger Biomasse und Biogasanlagen zum Einsatz kommen, hat weiters bewirkt, dass diese Rohstoffmärkte in kurzer Zeit von Überschussmärkten zu Mangelmärkten gedreht haben und etwa bei Rohmais, zwischen 2007 und 2008 Preissteigerungen um bis zu 100% zu beobachten waren. Die Preisentwicklungen auf diesen Rohstoffmärkten hatten zur Folge, dass Anlagen zur Erzeugung von Ökostrom aus Biogas und flüssiger Biomasse nicht kostendeckend betrieben werden konnten, was zur Existenzgefährdung von Betreibern von Ökostromanlagen führte. In dem 2008 durchgeführten „Biogas Branchenmonitor“ (Tragner et al. 2008) der durch die Befragung von 151 (von 340) Biogasanlagenbetreibern in Österreich entstand, gaben 48 % der Anlagenbetreiber an, im Vorjahr Verluste durch die Investition erlitten zu haben. 29 % der Betreiber realisierten, laut ihren Angaben, weder Gewinne noch Verluste. 32 % der Betreiber erwägen sogar eine Stilllegung der Anlage und über 60 % würden nicht wieder in eine Biogasanlage investieren.

Als Reaktion auf die steigenden Rohstoffpreise wurde in der Ökostromgesetz-Novelle 2008 (BGBl. I Nr. 44/2008) ein Rohstoffzuschlag von max. 4 Cent/kWh für die betroffenen Anlagen beschlossen. Auch 2009 wurde ein Rohstoffzuschlag von 3 Cent/kWh gewährt. In Abbildung 3 sind die durchschnittlichen Einspeisetarife für die Jahre 2003 bis 2009 dargestellt.

Mit der Novelle 2009 und der darauf basierenden Einspeisetarif-Verordnung 2010 (BGBl. II Nr. 42/2010) wurden die Rahmenbedingungen für Investoren wieder attraktiver gestaltet.

Ziel des aktuell geltenden Ökostromgesetzes ist es den Anteil an dem in diesem Gesetz geförderten Ökostrom bis 2015 in Österreich auf 15 Prozent des Stromverbrauches anzuheben. Dabei sollen in den kommenden Jahren vor allem Wind- und Wasserkraft mit jeweils 700 MW Leistung ausgebaut werden, bei entsprechender Rohstoffverfügbarkeit auch Biomasse bis 100 MW.

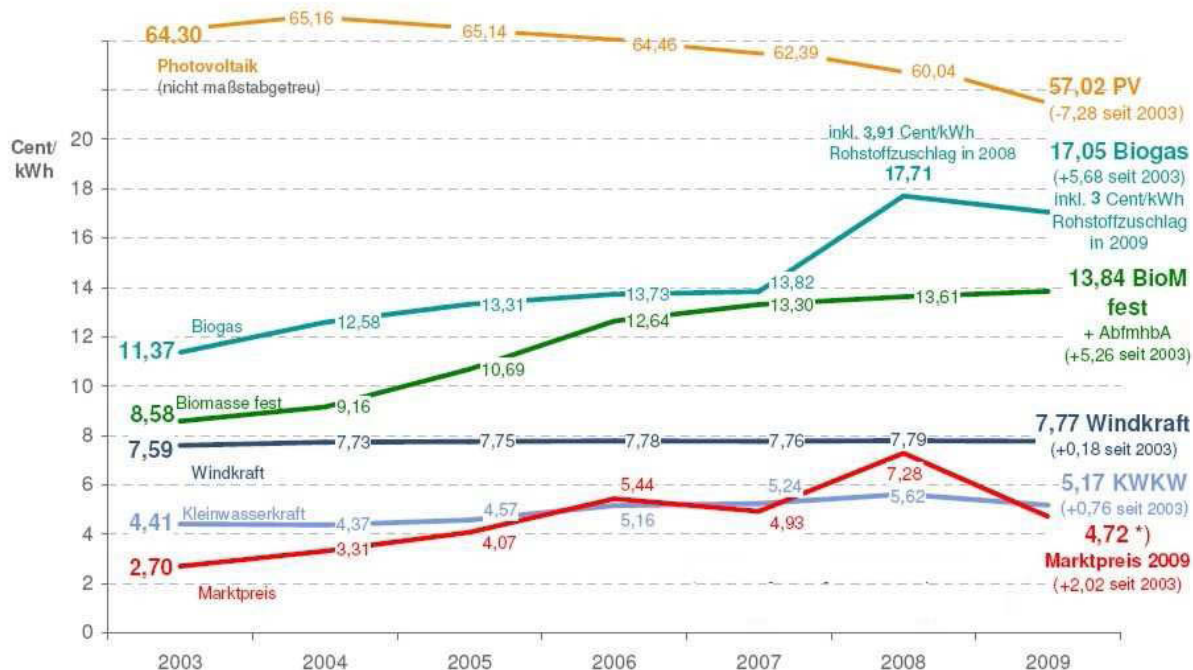


Abbildung 3: Durchschnittliche Einspeisetarife² im Rahmen des Ökostromgesetzes in den Jahren 2003 – 2009 (Energie-Control 2010)

1.2. Umweltwirkung Erneuerbarer Energien

Die Tatsache, dass erneuerbare Energien einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten ist unumstritten. In der wissenschaftlichen und öffentlichen Diskussion wird jedoch immer wieder folgende Frage in den Raum gestellt: Wie nachhaltig sind die einzelnen Technologien wirklich bzw. unter welchen Bedingungen können bestimmte Technologien den höchsten Nutzen für Umwelt und Gesellschaft bringen?

Jede Technologie zur Nutzung von Energie in verschiedenster Form hat bestimmte Auswirkungen auf unsere Umwelt. Um die Frage der „Klimaneutralität“ bzw. Nachhaltigkeit einer Energiebereitstellungstechnologie zu beantworten müssen auch Aufbau und Abbau der Anlagen sowie die Bereitstellung des Energieträgers betrachtet werden (Produktlebenszyklus). Das geeignete Instrument dazu ist die Ökobilanz bzw. Lebenszyklusanalyse.

Die verschiedenen Möglichkeiten erneuerbare Energien zu nutzen unterscheiden sich in vielen Aspekten. Ein wesentlicher Unterschied besteht zwischen Technologien, die einen Brennstoff verwerten und jenen, welche „fließende Energieressourcen“ (= direkte Sonnenstrahlung, Wind- oder Wasserkraft) verwenden. Aus bereits abgeschlossenen Studien geht hervor, dass die Lebenszyklusabschnitte, die den Großteil der Umweltauswirkungen verursachen, bei den zwei genannten Technologiegruppen unterschiedlich sind (Setterwall et al. 2004).

Wie in Abbildung 4 dargestellt, verursachen bei jenen Technologien, die fließende Energieressourcen umwandeln, die Lebenszyklusabschnitte „Herstellung der Baumaterialien“, „Bau der Anlage“ sowie teilweise „Abriss und Entsorgung der Infrastruktur“ den Hauptteil des

² Durchschnittsvergütung, die von der Ökostromabwicklungsstelle im jeweiligen Jahr bezahlt wurde.

Gesamtergebnisse während die Bereitstellung des Brennstoffes bzw. der Betrieb der Anlage „gratis“ sind. Bei den auf Brennstoffen basierenden Technologien dagegen, sind jedoch gerade diese Prozesse (Bereitstellung des Brennstoffes bzw. Betrieb der Anlage) hauptverantwortlich für die Umweltauswirkungen und der Bau bzw. Abriss der Anlage spielt nur eine untergeordnete Rolle. Daher ergeben sich für die zwei Technologiegruppen unterschiedliche Herangehensweisen beim Erstellen der Lebenszyklusanalyse.

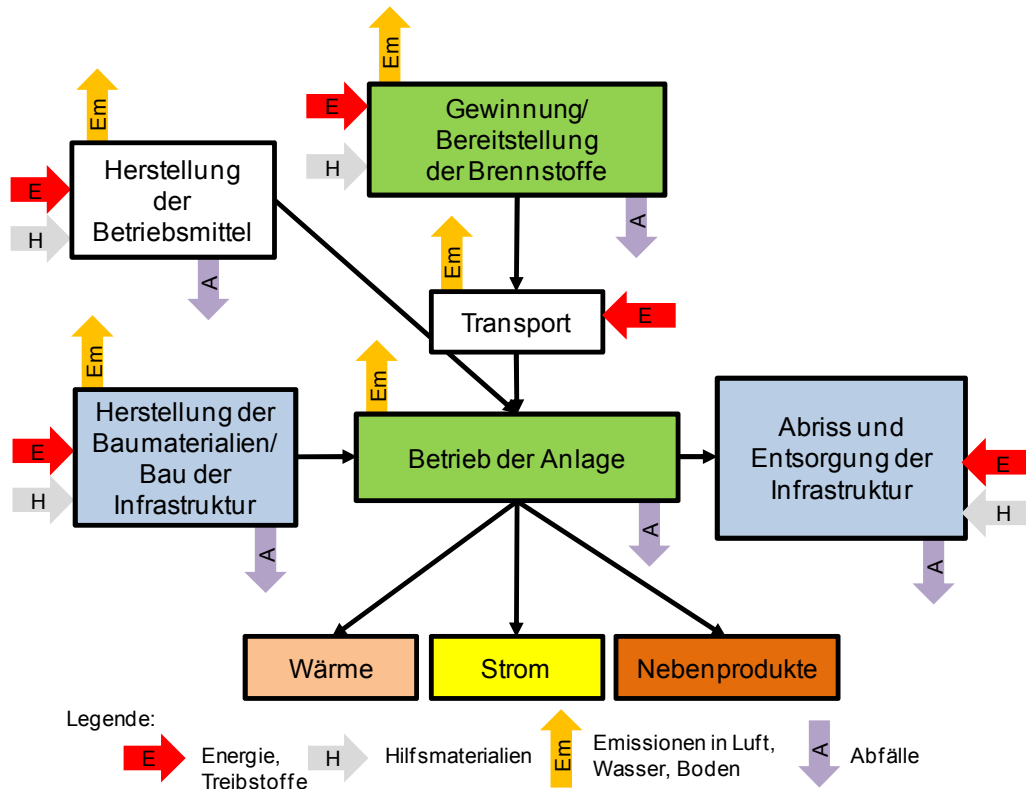


Abbildung 4: Lebenszyklusabschnitte, die innerhalb des Lebensweges der betrachteten Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung berücksichtigt werden (wichtige Phasen für Brennstoff-basierende Technologien sind grün unterlegt, für Energie-ressourcenfluss-basierende Technologien blau unterlegt).

Ein weiterer Unterschied der beiden Technologiegruppen besteht in der momentanen Marktreife. Laut Ökostrombericht 2010 (Energie-Control 2010) hat die Stromerzeugung aus Wasserkraft bzw. Klein-Wasserkraft die Marktreife bereits erreicht, Windkraftanlagen liegen momentan knapp über dem Niveau des Marktpreises, wobei ein Erreichen des Marktpreisniveaus für 2015 realistisch erscheint. Für Strom aus Photovoltaik-Anlagen sind die Preise derzeit noch am höchsten, es konnten jedoch hier in den letzten Jahren die größten Preissenkungen beobachtet werden, sodass das mittelfristig erwartete Preisniveau für die Eigenversorgung ohne Inanspruchnahme des öffentlichen Netzes einen wichtigen Schritt in Richtung Marktreife darstellt (siehe auch Abbildung 3).

Die Stromerzeugung aus Biomasse und Biogas dagegen hat laut Energie-Control 2010 die Marktreife noch nicht erreicht und es sind auch keine Annäherungen der Erzeugungskosten an das Marktpreisniveau zu beobachten. Die Gründe dafür liegen unter anderem am geringen elektrischen Wirkungsgrad und dem Unvermögen diesen durch vermehrte Wärmenutzung auszugleichen (Standortwahl der Anlagen an Orten, an denen eine Wärmenutzung nicht möglich ist) sowie an den hohen Rohstoffpreisen. Die gegenwärtige Gesetzesregelung, dass Biomasse-Stromerzeugung in Neuanlagen nur dann einen kostendeckenden,

geförderten Einspeisetarif bekommen können, wenn zumindest die Rohstoffkosten durch „normale“ nicht geförderte Stromerlöse abdeckbar sind, erlaubt kaum Neuinvestitionen in diese Technologien. Sehr wohl zu beobachten sind Erweiterungen von bestehenden Biogasanlagen. Tragner et al. 2008 konnten für die Biogas-Technologie im Zuge der Erstellung eines Branchenmonitors viele ökologische und ökonomische Mängel im Anlagenbetrieb identifizieren, die auf unzureichende Kompetenzen oder veraltetes Wissen der Anlagenbetreiber und daher auch auf ein beachtliches ungenutztes Potential dieser Technologie schließen lassen.

Da bei der Stromerzeugung aus Biomasse und Biogas ein großes Potential zur Verbesserung der ökologischen als auch ökonomischen Performance in der Art der Bereitstellung des Brennstoffes, der Betriebsweise der Anlagen sowie der Gesamtbetrachtung der Technologie liegt, wurde in der vorliegenden Arbeit der Schwerpunkt auf die Analyse der Umweltwirkungen dieser Technologien gelegt. Dadurch werden die Identifikation der Schlüsselprozesse und das Aufzeigen von Optimierungspotentialen ermöglicht. Im letzten Kapitel erfolgt ein Vergleich mit weiteren Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auf Basis von Literaturdaten.

1.3. Möglichkeiten der Energiegewinnung aus Biomasse

Biomasse kann zur Deckung der End- bzw. Nutzenergienachfrage mit Hilfe einer Vielzahl unterschiedlichster Techniken und Verfahren eingesetzt werden. Grundsätzlich ist die thermo-chemische, physikalisch-chemische und bio-chemische Umwandlung der in der Biomasse enthaltenen Energie möglich (Kaltschmitt und Streicher 2009). Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Verfahren zur Stromproduktion sind in Abbildung 5 gelb dargestellt. Die verschiedenen Optionen unterscheiden sich dabei in Abhängigkeit von der eingesetzten Biomasse (z. B. Waldrestholz, Energieholz, Maissilage, Grassilage, organischen Reststoffe, etc.) und dem Verhältnis der produzierten Endenergieträger bzw. der gewünschten Nutzenergien (Strom und Wärme und eventuell auch Treibstoff) erheblich (FNR 2005a). Zusätzlich ist auch der Stand der Technik der für eine energetische Nutzung von Biomasse geeigneten Verfahren sehr unterschiedlich. Prinzipiell ist der Einsatz aller in Abbildung 5 dargestellten Verfahren technisch möglich, in der Praxis kommen jedoch die 4 gelb unterlegten Verfahren: Gas-Otto-Motor, Zündstrahlmotor, Dampfkraftanlage und ORC-Anlage am häufigsten zum Einsatz. Nachfolgend werden die Grundlagen sowie der Stand der Technik der in dieser Arbeit untersuchten Technologien näher erläutert.

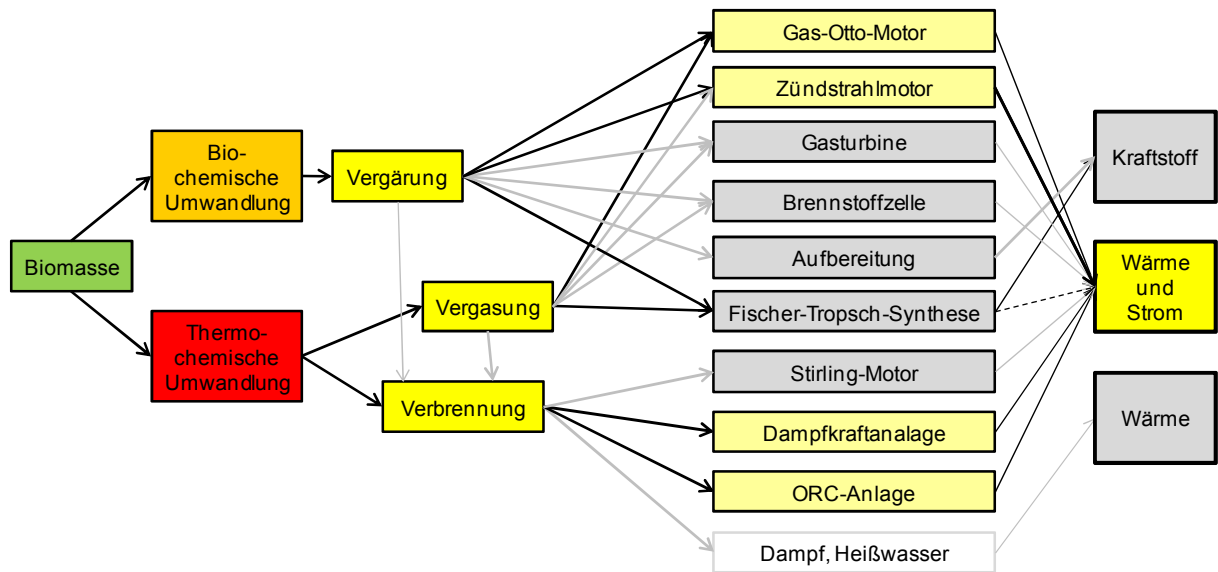


Abbildung 5: Verfahren zur Energiegewinnung aus Biomasse

1.4. Bio-chemische Umwandlung: Vergärung

Grundlagen

Vergärung oder auch anaerobe Fermentation bedeutet, dass unter Ausschluss von Sauerstoff organische Stoffe durch mikrobiologische Aktivität abgebaut werden. Das Endprodukt dieses Prozesses ist ein brennbares Gas, auch Biogas genannt, welches im Wesentlichen aus Methan und Kohlendioxid besteht. Im Gegensatz zu aeroben Zersetzungsprozessen, wie z.B. der Kompostierung, wird beim anaeroben Abbau kaum Wärme erzeugt. Die Energie bleibt in Form von Methan im Gas erhalten. Dieses Gas kann zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie nach einer weitergehenden Aufbereitung als Treibstoff genutzt werden.

Die Entstehung von Methan basiert auf einem natürlichen, biologischen Zersetzungsprozess, der in sauerstofffreien Systemen stattfindet. Methan entsteht beispielsweise im Verdauungstrakt von Wiederkäuern, in Sümpfen, Ozeanen, Seen und Reisfeldern oder auch in Wirtschaftsdüngerlagern. (BayLfU 2004).

Der Prozess der Biogasentstehung ist eine Folge von verketteten Teilschritten, bei denen das abbaubare Ausgangsmaterial fortlaufend zu kleineren Einheiten bis hin zum Methan und Kohlendioxid, den Hauptkomponenten des Biogases, abgebaut wird. Die Zusammensetzung kann abhängig vom Ausgangsmaterial, der Prozessführung (pH, Temperatur) und anderen Einflussgrößen schwanken. Daneben befinden sich im Biogas noch geringe Mengen an Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und anderen Spurengasen. An den einzelnen Phasen des Abbaus sind jeweils verschiedene Gruppen von Mikroorganismen beteiligt, welche die Produkte der vorangegangenen Schritte verwerten (siehe Abbildung 6).

In der Hydrolyse-Phase werden die komplexen, hochmolekularen, oft ungelösten Stoffe durch Enzyme in einfachere, organische Verbindungen (z. B. Aminosäuren, Zucker, Fettsäuren) zerlegt. In der Versauerungs-Phase (Acidogenese) werden daraus von verschiedenen fakultativ und obligat anaeroben Bakterienarten kurzkettige organische Säuren (z. B. Buttersäure, Propionsäure, Essigsäure), Alkohole, H_2 und CO_2 gebildet. Von diesen Zwischenprodukten können die Methanbakterien jedoch nur Essigsäure, H_2 und CO_2 direkt zu Methan umsetzen. Daher müssen die im 2. Abbauschritt gebildeten organischen Säuren und Alkohole in der Acetogenen-Phase zu Essigsäure umgebaut werden. Die acetogenen Bakterien müssen aus reaktionskinetischen Gründen eng mit den Methanbakterien vergesellschaftet sein. In der Methanogenen-Phase wird vornehmlich aus Essigsäure und aus H_2 und CO_2 Methan gebildet. (Bischofsberger et al. 2005)

Laufen die vier Abbauschritte gemeinsam in einem Fermenter ab, spricht man von einstufigen Anlagen. Die Bakterien der einzelnen Stufen haben jedoch unterschiedliche optimale Lebensbedingungen bezüglich Temperatur und pH-Wert. Da die Methanbakterien am empfindlichsten gegenüber Störungen sind und sich nur langsam vermehren, werden die Milieubedingungen in solchen Systemen normalerweise an sie angepasst. In zweistufigen Anlagen werden die Hydrolyse und die Acidogenese von den nachfolgenden Abbaustufen räumlich getrennt. Dadurch können die Umgebungsbedingungen besser an die Bakteriengruppen angepasst werden und es lassen sich höhere Abbauleistungen erreichen. (FNR 2006a) Der regelungstechnische und apparative Aufwand ist dabei jedoch höher und der Einsatz nur in Sonderfällen sinnvoll (Kaltschmitt und Streicher 2009).

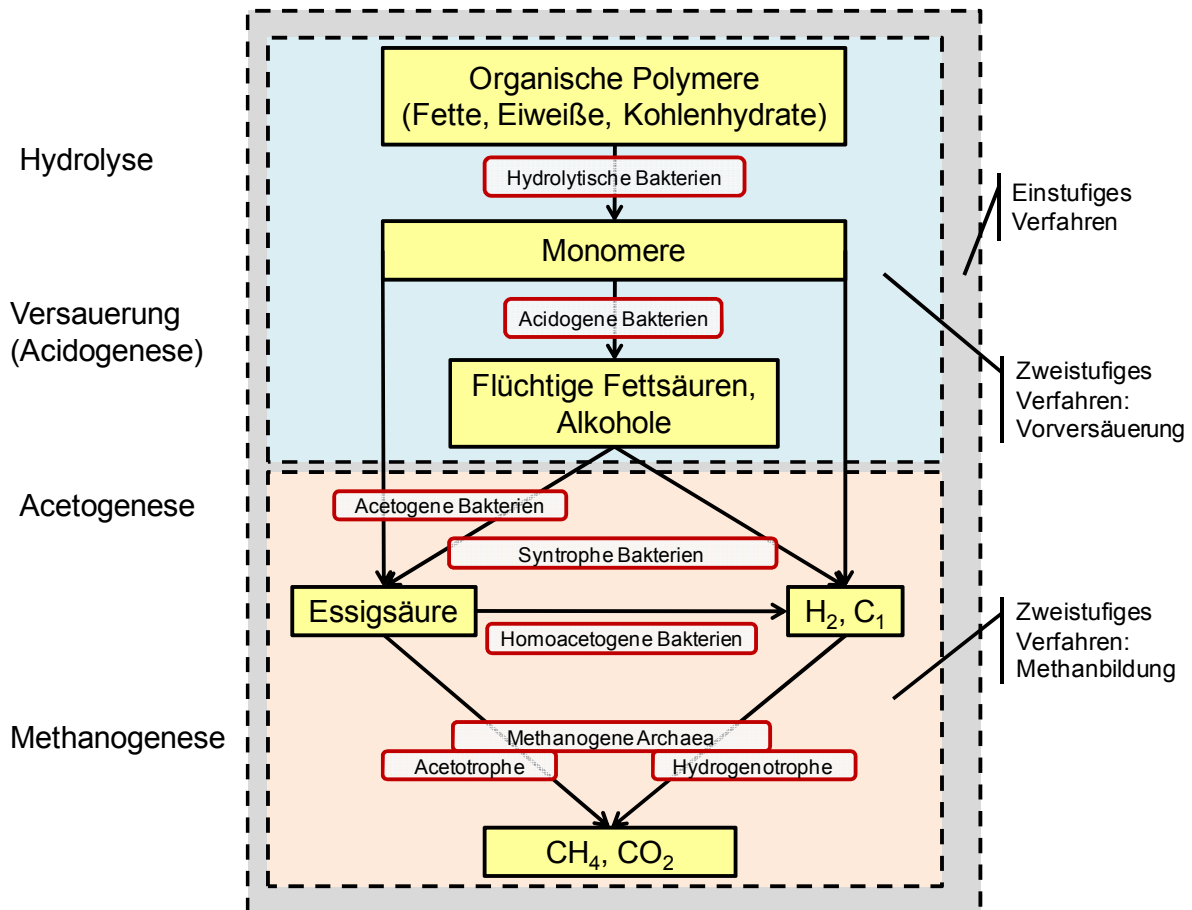


Abbildung 6: Schematische Darstellung des mehrstufigen anaeroben Abbaus (eigener Entwurf nach Bryant 1977, Braun 1982, BayLfU 2004)

Zur gezielten Biogaserzeugung sind für die Mikroorganismen geeignete Rahmenbedingungen zu schaffen. Das Wachstum und die Aktivität der Bakterien werden wesentlich durch Sauerstoffausschluss, Gärtemperatur, pH-Wert, Nährstoffangebot, Durchmischungsintensität und den Gehalt an Hemmstoffen beeinflusst. (BayLfU 2004)

Je nach Temperaturoptimum lassen sich die am Abbau beteiligten Bakterien in drei Gruppen unterteilen: psychrophil (unter 25°C), mesophil (32 -42°C) und thermophil (50-57°C). Im thermophilen Temperaturbereich ist die Hydrolyserate im Vergleich zum mesophilen Temperaturniveau erhöht, was zu einem Anstieg des Gehalts an organischen Säuren führt. Anlagen, die in diesem Bereich arbeiten zeigen höhere Gasausbeuten, es wird jedoch auch mehr Energie für das Aufheizen benötigt und der Prozess ist anfälliger gegenüber Störungen oder Unregelmäßigkeiten in der Substratzufuhr oder der Betriebsweise. Die meisten Anlagen zur landwirtschaftlichen Biogaserzeugung arbeiten im mesophilen Bereich. Dieser lässt eine relativ hohe Gasausbeute sowie eine gute Prozessstabilität erreichen. Im psychrophilen Temperaturbereich entfällt zwar die Energie für das Beheizen, die Abbauleistung und damit die Gasproduktion sind jedoch stark vermindert. (Kaltschmitt und Streicher 2009)

Für die Methanbildung gilt ein pH-Wert im schwach alkalischen Bereich bis 7,5 als optimal. Der pH-Wert innerhalb des Systems stellt sich meist durch die alkalischen und sauren Stoffwechselprodukte ein, die während des anaeroben Abbaus gebildet werden. Wie empfindlich jedoch dieses Gleichgewicht ist, zeigt folgende Kettenreaktion: Durch einen Anstieg der Propionsäure-Konzentration werden die Methanbakterien in ihrer Stoffwechselaktivität gehemmt und verwerten ihre Substrate langsamer. Dadurch kommt es zu einer weiteren An-

häufung der Säuren aus der Acidogenese, was den pH-Wert weiter absinken lässt. Der Prozess versauert und die Methanbakterien stellen ihre Arbeit ganz ein. Wird ein solches Absinken des pH-Wertes bemerkt, muss die Substratzufuhr sofort gedrosselt oder gestoppt werden, um den Methanbakterien Zeit zu geben, die vorhandenen Säuren abzubauen. (FNR 2006a)

Bei den Hemmstoffen, welche toxisch auf die Bakterien wirken, kann man zwischen jenen, die mit dem Substrat in den Fermenter gelangen (z.B. Schwermetalle, chlorierte Kohlenwasserstoffe, Pestizide, Antibiotika, Desinfektionsmittel) und jenen, die als Zwischenprodukt während des Abbaus gebildet werden (Ammoniak, Ammonium, Schwefelwasserstoff) unterscheiden. Ihre Hemmwirkung hängt dabei von der Konzentration, der Wechselwirkung mit anderen Stoffen und dem pH-Wert ab. (Kaltschmitt und Streicher 2009)

Weitere Prozesse, welche die Biogasentstehung nachteilig beeinflussen, sind z.B. Schwimmdecken, Sinkschichten, Abweichungen von der vorgegeben Solltemperatur im Fermenter sowie erhöhte Ammonium- oder Fettsäurekonzentrationen. Diesen Störeffekten kann mit technischen Maßnahmen wie Rührwerken, Beheizungseinrichtungen, Mess-, Steuerungs- und Regeltechnik und einer angepassten Substratzufuhr entgegengewirkt werden. (BayLfU 2004)

Substrate

Abbildung 7 zeigt einen Überblick über die zur Vergärung verwertbaren Formen der Biomasse.

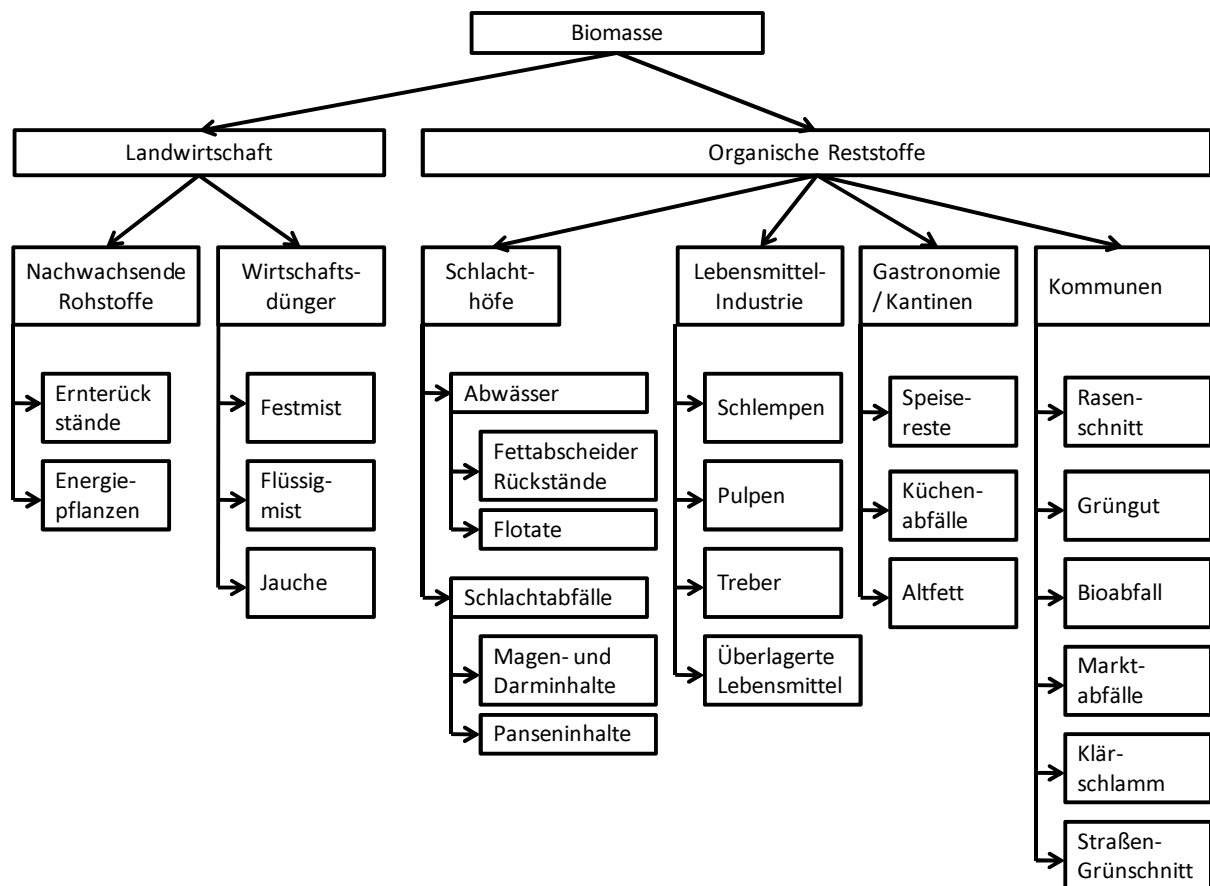


Abbildung 7: Für die Vergärung geeignete Biomasse-Substrate (eigener Entwurf nach Kaltschmitt und Streicher 2009)

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird als Grundsubstrat Wirtschaftsdünger verwendet. Von Kofermentation spricht man, wenn zusammen mit dem Wirtschaftsdünger andere organische Stoffe vergoren werden, um die Biogaserzeugung zu erhöhen.

Anlagentechnik

Die Systemelemente einer Biogasanlage sollen anhand der in Abbildung 8 dargestellten landwirtschaftlichen Biogasanlage erläutert werden.

Substratlager sind notwendig um Schwankungen bei der Bereitstellung und Anlieferung der verschiedenen Substrate auszugleichen. Wirtschaftsdünger werden meist in einer Güllegrube, organische Reststoffe ebenfalls in einem separaten Sammelbehälter (in Abbildung 8 nicht dargestellt) gesammelt, bevor sie in die Biogasanlage eingebracht werden. Nachwachsende Rohstoffe werden meist in Fahrsilos gelagert. Die Beschickung erfolgt in der Regel in mehreren Chargen über den Tag verteilt für pumpfähige Substrate mit Pumpen, für stapelfähige Substrate mit Ladern und in der weiteren Folge bei der automatisierten Beschickung mit Kratzböden, Overhead-Schubstangen oder Förderschnecken.

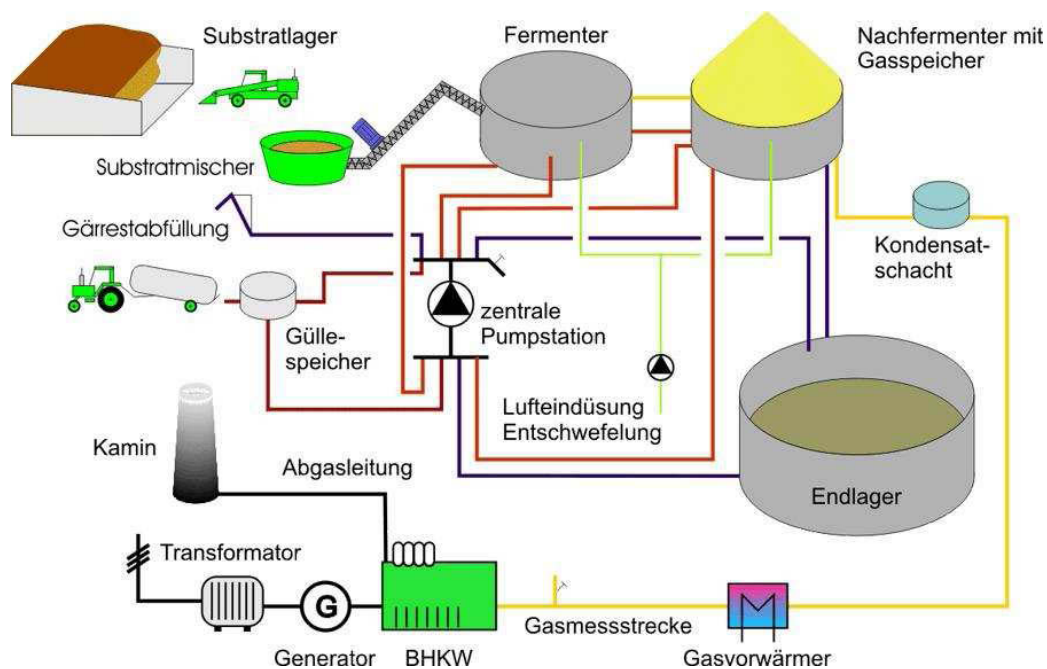


Abbildung 8: Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit Verwendung von Kosubstraten (Bios Bioenergiesysteme)

Je nach Beschaffenheit der Substrate können unterschiedliche Vorbehandlungen wie Sortierung und Störstoffabtrennung, Hygienisierung, Zerkleinerung oder Homogenisierung notwendig sein.

Die Produktion des Biogases findet im Fermenter statt, welcher somit das Kernstück der Biogasanlage ist. In der Praxis kommen Behälter unterschiedlichen geometrischen Aufbaus, liegend und stehend als Fermenter zum Einsatz. Diese können in sehr verschiedenen Varianten ausgeführt sein, die sich sowohl nach Art der Beschickung, Anzahl der Prozesssysteme bzw. Fermenter als auch in der Fermentertemperatur und dem Feststoffmassengehalt des Substrates unterscheiden. Einen Überblick über verschiedenste Fermenterarten gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Klassifizierungskriterien für Biogasfermenter nach BayLfU 2004

Beschickung	Anzahl Prozessstufen	Temperatur	TM Substrat
Batch	Einstufig	Psychrophil (<25°C)	Flüssigfermenter
Speicher	Zweistufig	Mesophil (32-42°C)	Feststofffermenter
Wechselbehälter	Mehrstufig	Thermophil (50-57°C)	
Durchfluss			
Durchfluss-Speicher			

Wichtig ist eine gute Durchmischung des Fermenterinhaltens um Wärme und Nährstoffe gleichmäßig zu verteilen, Sink- und Schwimmschichten zu vermeiden bzw. zu zerstören sowie ein gutes Ausgasen des Biogases aus dem Gärsubstrat zu ermöglichen. Dazu werden mechanische (Tauchmotor- und Paddelrührwerke), hydraulische und pneumatische Rührwerke verwendet.

Der Fermenter selbst besteht meist aus Stahl-Beton oder auch nur Stahl, wobei auf den Korrosionsschutz besonderer Wert gelegt werden muss.

Für die Sammlung und Verwertung des Biogases müssen weiters der Wasserdampf (Kondensatsammlung) sowie der Schwefelwasserstoff (bakterielle Entschwefelung durch Lufteintrag) entfernt werden. Die Gasspeicherung kann über dem Fermenter (Folienhaube) oder extern als Nieder-, Mittel- oder Hochdruckspeicher erfolgen. Am häufigsten sind Niederdruckspeicher (z.B. Folienkissenspeicher oder Doppelmembranspeicher).

Die Zwischen- bzw. Endlagerung des ausgegorenen Substrates (=Gärrestes) ist notwendig, da die Ausbringung witterungsbedingt nicht immer erlaubt ist. In Österreich ist zur Einhaltung der EU Nitratrichtlinie 91/676/EWG für Biogasanlagen eine Lagerkapazität von mindestens 180 Tagen vorgeschrieben (BMLFUW, 2004). Als werden hauptsächlich stehende Rundbehälter verwendet. Prinzipiell sind offene und gasdicht geschlossene Bauweisen möglich (FNR 2006a).

Das gewonnene Biogas bietet eine Vielzahl von Nutzungsmöglichkeiten (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Verwertungsmöglichkeiten von Biogas nach BayLfU 2004.

Verstromung	Wärmenutzung	Einspeisung	Transport
Verbrennungsmotoren	Trocknung landwirtschaftl. Prod.	Mikrogasnetzte	
Stirlingmotor	Wärmespeicherung	nach Aufbereitung	
Brennstoffzelle	Kälteerzeugung	Erdgasnetz	Erdgasautos
Mikrogasturbine	ORC-Prozess		

Für den Fall, dass die eigentliche Biogasnutzung aufgrund von Wartungsarbeiten oder technischen Defekten nicht möglich ist, ist bei allen Biogasanlagen eine Fackel installiert, die die sichere und umweltschonende Verbrennung des Biogases gewährleisten soll.

Die häufigste Verwertungsmöglichkeit ist die Strom- und Wärmeproduktion in einem mit einem Verbrennungsmotor betriebenen BHKW. In Österreich wurde 2008 das Biogas aus knapp 80% der Anlagen so verwertet (Tragner et al. 2008). Das BHKW-Modul besteht neben dem Verbrennungsmotor und einem darauf abgestimmten Generator aus Wärmetauschersystemen zur Rückgewinnung der Wärmeenergie aus dem Abgas, einem Kühlwasser- und Schmierölkreislauf, hydraulischen Einrichtungen zur Wärmeverteilung und elektrischen Schalt- und Steuereinrichtungen zur Stromverteilung und zur BHKW-Steuerung (FNR 2006a). Der so produzierte Strom wird überwiegend als Ökostrom ins öffentliche Stromversorgungsnetz eingespeist. Die Netzanbindung erfolgt bis 1 MW über das Niederspannungsnetz.

1.5. Thermo-chemische Umwandlung: Verbrennung und Vergasung

Die thermo-chemische Umwandlung der in der Biomasse enthaltenen Energie erfolgt entweder durch Verbrennung oder durch vorhergehende Umwandlung in Sekundärenergieträger (Vergasung), die in einem weiteren Schritt vollständig aufoxidiert werden können. Dabei sind die zugrunde liegenden Mechanismen für beide Verfahren gleich.

Bei der Verbrennung der Biomasse wird die gespeicherte chemische Energie durch vollständige Oxidation in einem Schritt als Wärme freigesetzt. Der mit der Verbrennungsluft zugeführte Sauerstoff reicht aus, um das gesamte oxidierbare organische Material vollständig auf zu oxidieren (d.h. die Luftüberschusszahl ist größer oder gleich eins). Der in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff wird in Kohlendioxid umgesetzt. Bei der Vergasung dagegen wird die in der Biomasse gespeicherte Energie durch partielle Oxidation mit Hilfe eines Vergasungsmittels (z. B. Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid) in ein Brenngas umgewandelt, welches in einem zweiten, getrennten Umwandlungsschritt unter Energieabgabe weiter aufoxidiert werden kann. Dabei wird der Brennstoff unter Sauerstoffmangel (d.h. die Luftüberschusszahl ist kleiner eins und größer null) in ein Rohgas, welches die brennbaren Gase Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Methan sowie langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen enthält, überführt.

Bei der Verbrennung wie auch der Vergasung laufen dabei beim Umwandlungsprozess die gleichen Phasen: „Aufheizung und Trocknung“, „pyrolytische Zersetzung“, „Vergasung“ sowie „Oxidation“ ab. Bei der Vergasung läuft die letzte Phase jedoch räumlich und zeitlich getrennt von den anderen ab. (Kaltschmitt und Streicher 2009). Abbildung 9 zeigt die bei der thermo-chemischen Umwandlung von Biomasse auftretenden Phasen.

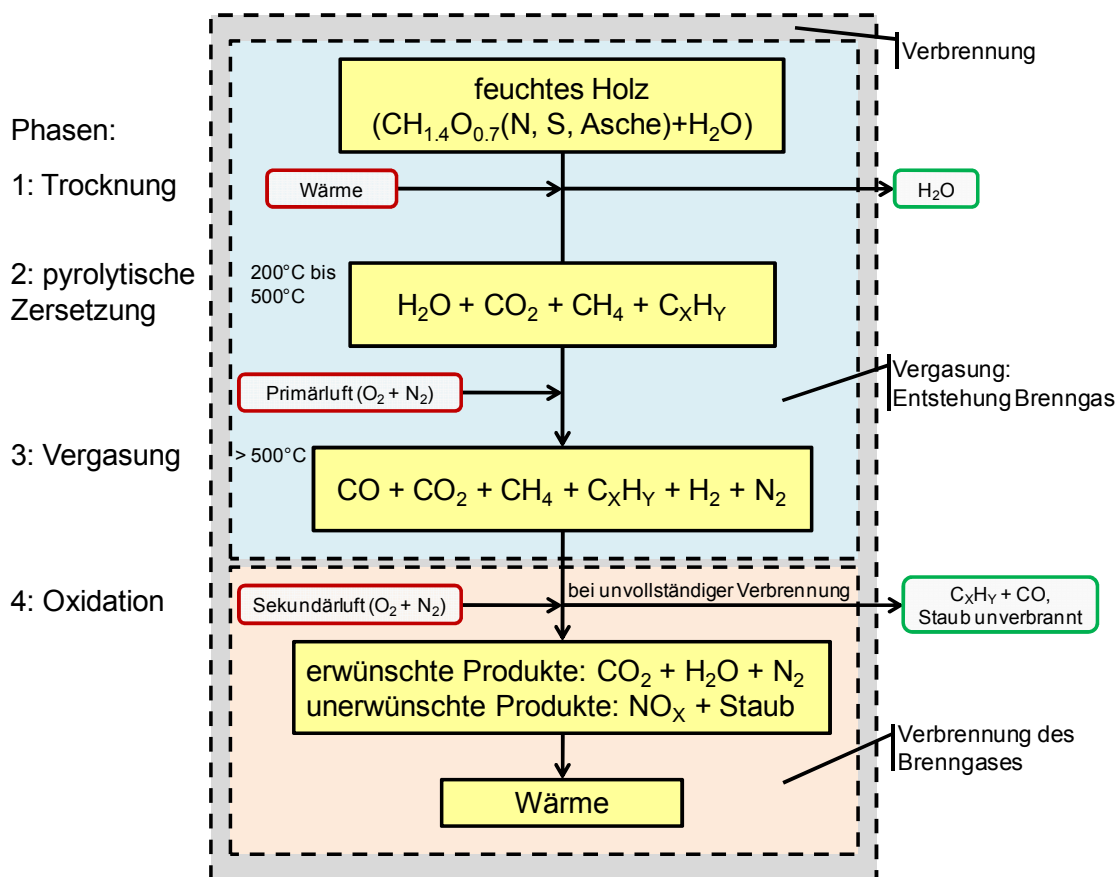


Abbildung 9: Schematische Darstellung der thermo-chemischen Umwandlung (eigener Entwurf nach Kaltschmitt und Streicher 2009, Bauer 2007)

Substrate

Abbildung 10 zeigt einen Überblick über die zur Verbrennung bzw. Vergasung verwertbaren Formen der Biomasse.

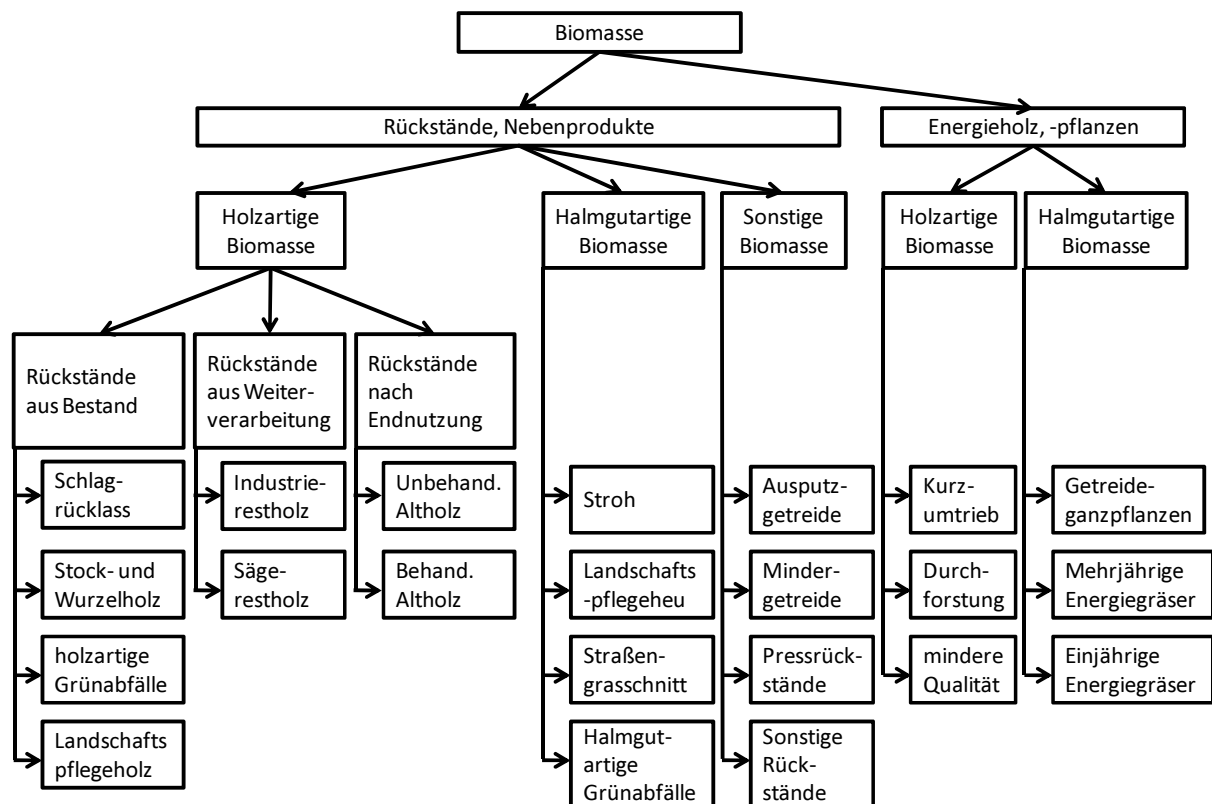


Abbildung 10: Für die Verbrennung bzw. Vergasung geeignete Biomasse (eigener Entwurf nach FNR 2005a).

Für die Stromproduktion aus fester Biomasse wird in Österreich derzeit vorwiegend Energieholz (unbehandeltes Waldhackgut) verwendet, da bei ausschließlicher Verwendung dieses Substrates nach dem Ökostromgesetz ein höherer Einspeisetarif vergütet wird.

Anlagentechnik Verbrennung

Die Systemelemente einer Verbrennungsanlage sollen anhand der in Abbildung 11 dargestellten Anlage erläutert werden.

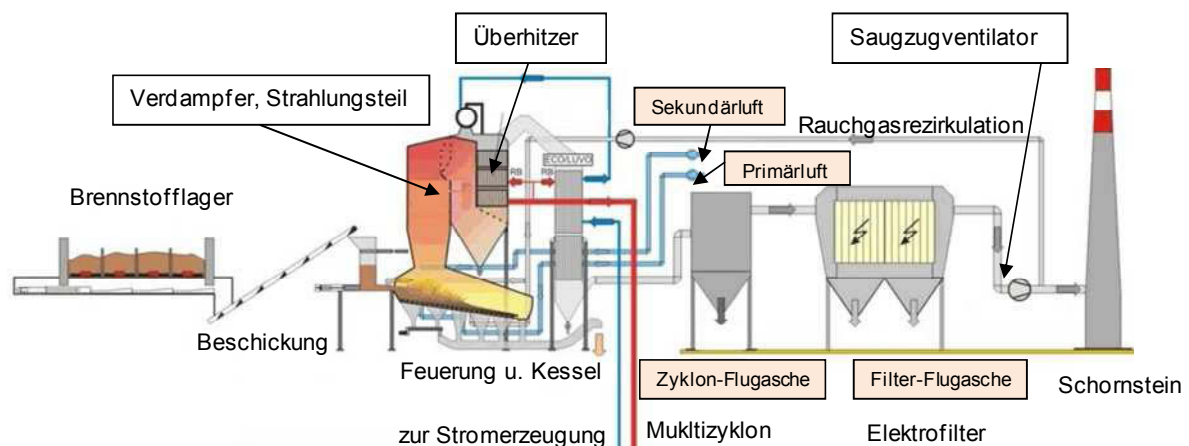


Abbildung 11: Schema einer Verbrennungsanlage (Bios Bioenergiesysteme)

Die Brennstofflager einer Verbrennungsanlage können bei Verwendung von Hackgut als Rundsilos und offene oder geschlossene Lagerhallen ausgeführt sein. Im Allgemeinen sollten diese so dimensioniert sein, dass zumindest eine Brennstoffversorgung der Energieanlage an anlieferungsfreien Tagen gewährleistet ist. Der Lageraustrag kann mittels Ladern oder automatisch mit Hilfe von Schnecken- (z.B. Drehschnecke, Wanderschnecke) oder Schubbodenausstrag erfolgen. Die automatische Beschickung der Feuerungsanlage erfolgt weitgehend kontinuierlich über Fördereinrichtungen wie z.B. Querförderschnecken, Trog- oder Kratzkettenförderer, Schwingförderer (z.B. Vibrorinne), Förderbänder oder auch Fördergebläse (FNR 2005a). Dadurch lässt sich ein gleichbleibender Feuerungsbetrieb mit konstanter Leistung einstellen.

In der Feuerungsanlage wird der Brennstoff vollständig ausgebrannt, sodass idealerweise ein hoher Wirkungsgrad und gleichzeitig niedrige Schadstoffemissionen realisiert werden. Da Biomasse einen relativ hohen Anteil an flüchtigen Substanzen enthält findet meist die Feststoffumsetzung (Phasen 1-3 der thermo-chemischen Umwandlung; Primärluftzuführung im Glutbett) räumlich getrennt vom Gasausbrand (Phase 4 der thermo-chemischen Verbrennung; Sekundärluftzufuhr in der Nachbrennkammer) statt. Die Primärluft beeinflusst die Feuerungsleistung, die Sekundärluft die vollständige Oxidation der brennbaren Gase. Die Feuerungen können entsprechend den Brennstoffeigenschaften (Größe, Asche- und Wassergehalt) nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten. Man unterscheidet Festbett- (Vorofen-, Unterschub- und Rostfeuerungen), Wirbelschicht- (stationär und zirkulierend) und Flugstromfeuerungen. (Kaltschmitt und Streicher 2009)

Der Feuerung ist ein Kessel nachgeschaltet, in welchem der Wärmeaustausch zwischen dem Rauchgas und dem Wärmeträger stattfindet. Als Wärmeträgermedium wird meist Wasser verwendet, das gegebenenfalls verdampft wird. In Einzelfällen kommt auch Thermoöl (ORC-Prozess³) zum Einsatz. Nach dem Bauprinzip wird zwischen Rauchrohr- und Wasserrohrkesseln unterschieden. Wasserrohrkessel bestehen aus Rohrsystemen, die mit einer Dampftrommel verbunden sind, in der die Trennung der beiden Phasen Wasser und Dampf erfolgt. Bei den Rauchrohrkesseln sind die Funktionen Wärmeübertragung und Phasentrennung kombiniert: Die Dampftrommel enthält waagrechte Rauchrohre, die vom Rauchgas durchströmt werden. (FNR 2005a)

Die in der Biomassefeuerungsanlage freiwerdende Wärme kann mit Hilfe einer Vielzahl unterschiedlicher Technologien zur Stromerzeugung genutzt werden (Abbildung 12). Der Wirkungsgrad der Umwandlung hängt von der Anlagentechnik und dem, durch den Brennstoff vorgegeben, oberen und unteren Temperaturniveau ab (Kaltschmitt und Streicher 2009).

³ Der ORC-Prozess („Organic Rankine Cycle“) basiert auf einem dem Wasser-Dampf-Prozess ähnlichen Verfahren mit dem Unterschied, dass anstelle von Wasser ein organisches Arbeitsmedium verwendet wird, welches günstigere Verdampfungseigenschaften bei tieferen Temperaturen und Drücken besitzt. (Bios Bioenergiesysteme)

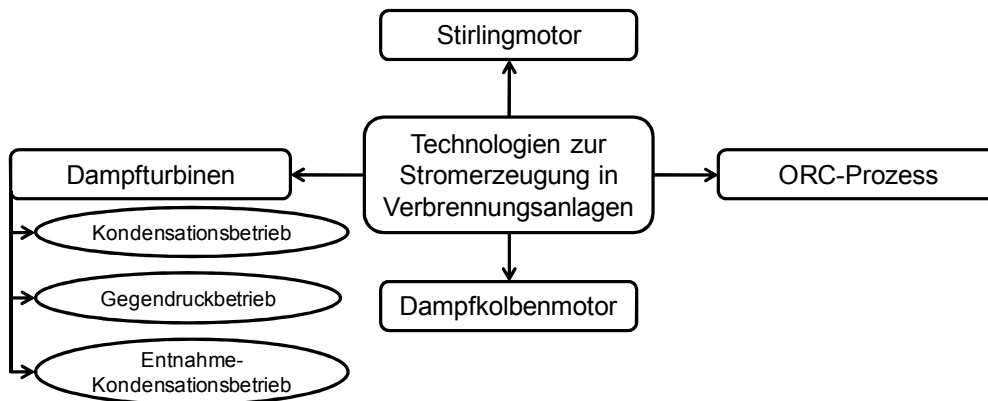


Abbildung 12: Technologien zur Stromerzeugung in Verbrennungsanlagen

In der Regel sind der Verbrennung in der Feuerungsanlage verschiedene Maßnahmen zur Rauchgasreinigung nachgeschaltet. Zur Entstaubung können in Abhängigkeit von der Größe der abzuscheidenden Partikel beispielsweise Zyklone, Gewebefilter sowie Nass- und Trocken - Elektrofilter zum Einsatz kommen. Zusätzlich kann Staub auch durch Abgaswäscher oder Abgaskondensationsanlagen abgeschieden werden, welche jedoch primär zur Abscheidung saurer Schadgase (HCl , SO_2) oder zur Wärmerückgewinnung dienen. Eine Reduktion der NO_x -Emissionen (die bei der Biomasseverbrennung hauptsächlich vom N-Gehalt des Brennstoffes abhängen) kann durch die Entstickung erfolgen. Dabei wird zwischen Primärmaßnahmen, die in den Verbrennungsablauf eingreifen (Abgasrückführung, gestufte Brennerluft- und Brennstoffzufuhr) und Sekundärmaßnahmen, die NO_x aus dem Rauchgas entfernen (selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR) oder selektive katalytische Reduktion (SCR)) unterschieden.

Als Abfall- bzw. Nebenprodukt der Verbrennung fallen verschiedene Fraktionen von Asche an. Der Aschegehalt der einzelnen Biomasse-Brennstoffe liegt zwischen 0,5 Gew.-% der Trockensubstanz (TS) für Weichholz und 5 bis 8 Gew.-% der TS für Rinde. Die anfallende Asche setzt sich normalerweise aus drei unterschiedlichen Fraktionen zusammen: Grob- oder Rostasche fällt im Verbrennungsteil der Feuerungsanlage als überwiegend mineralischer Rückstand der eingesetzten Biomasse an. Zyklonflugasche besteht aus in den Rauchgasen mitgeführten feinen Partikeln und fällt in Fliehkraftabscheidern (Zyklonen) an. Als Feinstflugasche wird die in Elektro- oder Gewebefiltern bzw. als Kondensatschlamm in Rauchgaskondensationsanlagen anfallende Flugaschefraktion bezeichnet. Während die letzte Fraktion aufgrund möglicher Belastungen mit Schwermetallen grundsätzlich entsorgt werden sollte, können die ersten beiden Fraktionen in unterschiedlichen Bereichen verwertet werden: als Bodenverbesserungs- und Düngemittel in Land- und Forstwirtschaft, als Zusatz zu mineralischen Baustoffen, als Kofferungsmaterial im Wege- und Straßenbau, als Streumaterial im Winter, als Schleif- und Strahlmittel sowie als Füllstoff im Bergversatz. (FNR 2005a).

Anlagentechnik Vergasung

Die Systemelemente Brennstofflager bzw. Beschickung, Rauchgasreinigung sowie Ascheverwertung decken sich bei Vergasungsanlagen mit jenen für Verbrennungsanlagen. Unterschiedlich bzw. neu sind jedoch die Systemelemente Vergasung, Gasreinigung und oder – konditionierung sowie die Gasnutzung (und optional auch die Synthese von Treibstoffen).

Die Vergasungsverfahren unterscheiden sich bezüglich Reaktorart, Art der Wärmebereitstellung, Art und Menge des Vergasungsmittels sowie dem Druckniveau. In Abbildung 13 ist das Schema einer in Güssing betriebenen Vergasungsanlage dargestellt.

Die Vergaser können je nach Art des Kontaktes des Oxidationsmittels mit dem Brennstoff in Festbettvergaser, Wirbelschichtvergaser und Flugstromvergaser unterschieden werden. Da die chemischen Reaktionen bei der Vergasung endotherm verlaufen, ist eine Wärmezufuhr notwendig. Dabei kann man zwischen autothermen Vergasern (Wärme wird direkt durch Teilverbrennung der Einsatzstoffe bereitgestellt) und allothermen Vergasern (Wärme wird indirekt durch Wärmeübertrager oder umlaufendes Bettmaterial bereitgestellt) unterscheiden.

Die Gasreinigung stellt das Bindeglied zwischen der Gaserzeugung und der Gasnutzung dar. Meistens erzeugen Vergasungsreaktoren eine Produktgasqualität, die sich nicht für eine direkte Gasnutzung zur Stromerzeugung eignet. Der Aufwand der Gasreinigung hängt sehr stark von dem eingesetzten Brennstoff, dem Vergasungsverfahren, den Prozessparametern und der nachgeschalteten Gasnutzung ab. Abzutrennende Verunreinigungen können Partikel, Teer, Stickstoff-, Schwefel-, und Halogenverbindungen sowie Alkalien sein. Die Reinigung erfolgt meist mittels verschiedensten Filtern und Wäschern. (FNR 2006b)

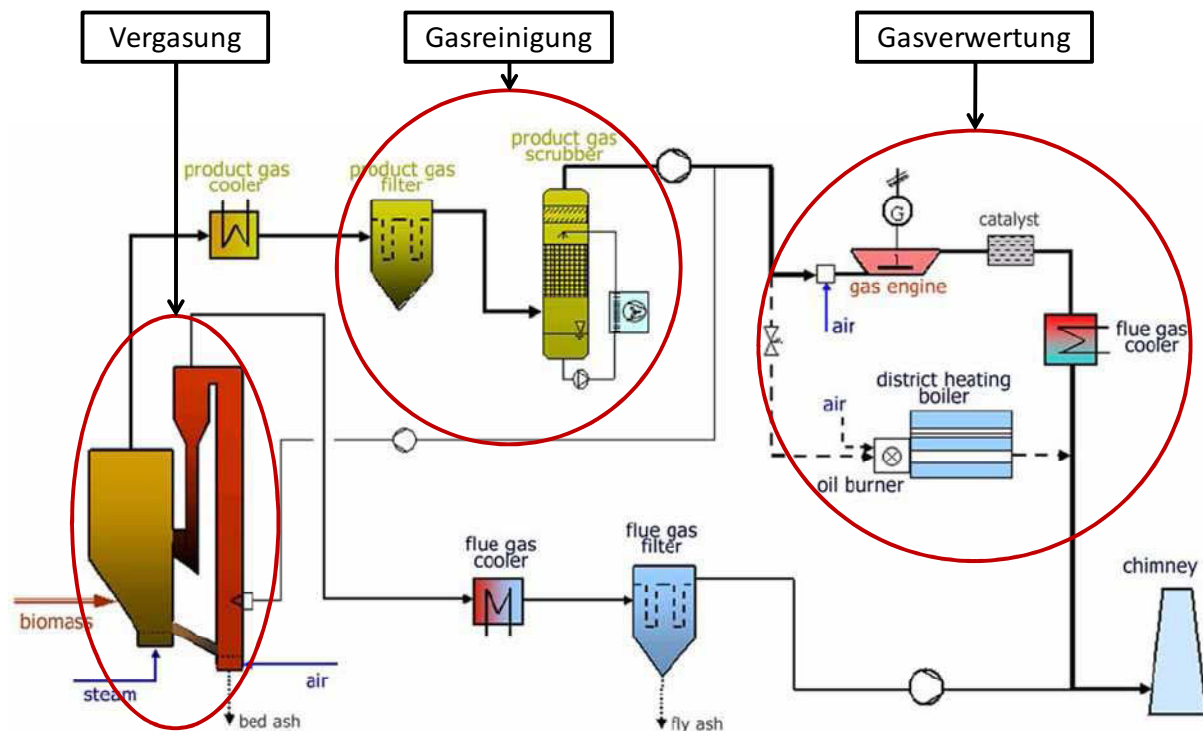


Abbildung 13: Schema einer Vergasungsanlage (Hofbauer et al. 2005)

Das gebildete Brenn- oder Produktgas kann nach der Reinigung zur Verbrennung zur Strom und Wärmeproduktion (in Stirlingmotoren, Brennstoffzellen, Gasmotoren oder –turbinen), als Chemierohstoff oder Ausgangsprodukt für flüssige Treibstoffe (Fischer-Tropsch-Synthese, BtL – Biomass to Liquid) verwendet werden. Die momentan häufigste Verwendung ist die Verbrennung in Gasmotoren oder –turbinen.

1.6. Lebenszyklusanalyse

Das gestiegene Bewusstsein über die Bedeutung des Umweltschutzes und möglicher Umweltwirkungen, die mit der Produktion und Anwendung von Produkten im Zusammenhang stehen, hat das Interesse an der Entwicklung von Methoden erhöht, die zum besseren Verständnis und zur Berücksichtigung dieser Wirkungen dienen. Eine der dafür entwickelten Methoden ist die Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse. Die Lebenszyklusanalyse bezieht sich auf die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung; d.h. „von der Wiege bis zur Bahre“. (ISO 14040:2006)

Eine Ökobilanz lässt sich gemäß ISO 14040:2006 grob in vier Phasen unterteilen:

(1) Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, (2) Sachbilanz, (3) Wirkungsabschätzung und (4) Auswertung (siehe Abbildung 14).

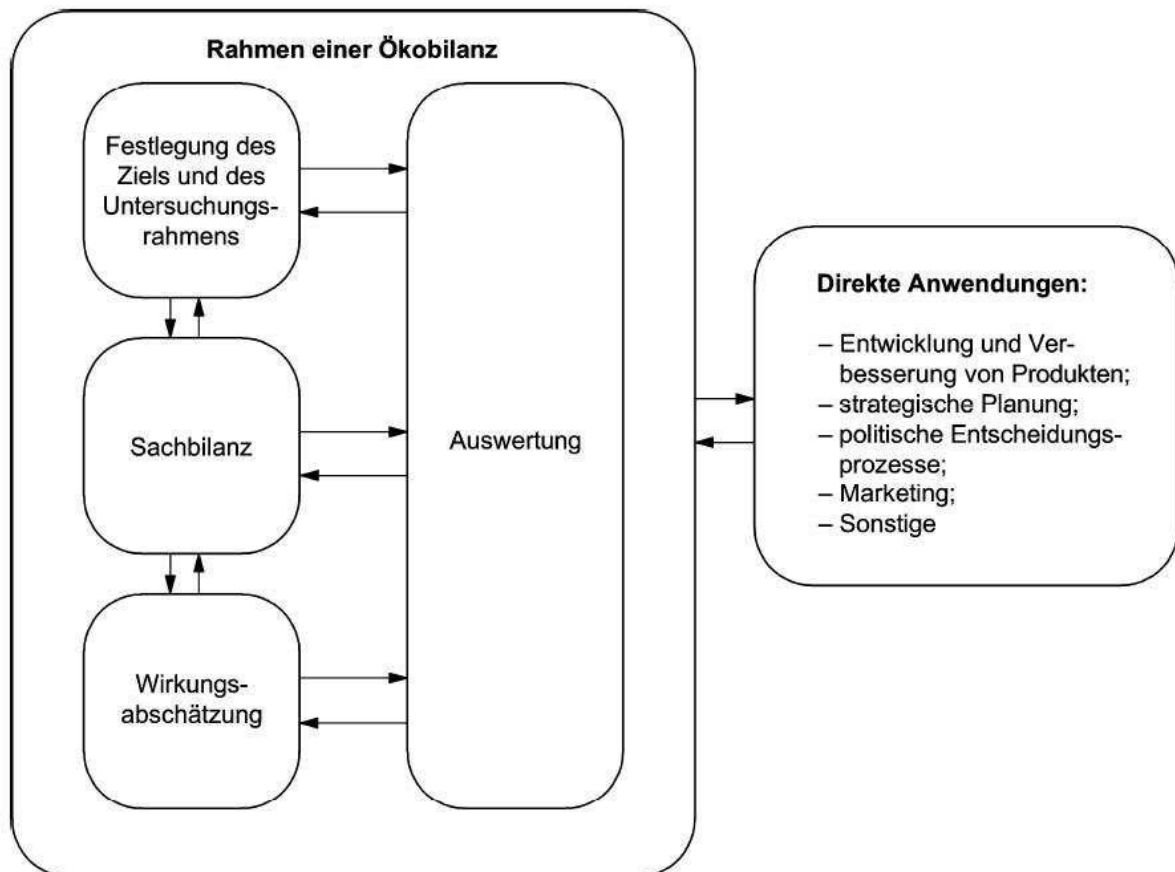


Abbildung 14: Phasen einer Ökobilanz nach ISO 14040

Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

In der Zieldefinition werden die beabsichtigte Anwendung sowie die Gründe für die Durchführung der Studie dargestellt und die angesprochene Zielgruppe sowie eine eventuelle Veröffentlichung der Ergebnisse festgelegt.

Die Festlegung des Untersuchungsrahmens enthält die Beschreibung des zu untersuchenden Produktsystems sowie dessen Funktion.

Die funktionelle Einheit wird definiert. Sie ist ein Kernstück jeder Ökobilanz, da sie die Bezugs- und auch Vergleichseinheit ist, auf die alle Umweltbelastungen umgelegt werden. ISO 14040:2006 definiert die funktionelle Einheit als quantifizierten Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit.

Ein weiterer wichtiger Punkt dieser Phase der Ökobilanz ist die Festlegung der Systemgrenze. Reale Produktsysteme enthalten Prozesse, die entweder weit in der Vergangenheit liegen (z.B. Bau von Staudämmen) oder weit in der Zukunft liegen (z.B. Sickerwässer von Deponien) dazu über die ganze Welt verteilt sind und eine Vielzahl verschiedener Technologien darstellen. Da jedoch die Mehrheit dieser „Vorprozesse“ für das betrachtete System von untergeordneter Bedeutung sind, ist es wichtig mit der Systemgrenze festzulegen, welche der Einzelprozesse (Prozessmodule) zu berücksichtigen sind. Dazu werden sogenannte Abschneidekriterien definiert (z.B. ein festgelegter Anteil an Masse, Energie, oder Umweltbelastung des Gesamtinputs).

Im Allgemeinen bringen die meisten Produktsysteme mehr als ein Produkt (Koppelprodukte) hervor und setzen als Rohstoffe auch Zwischenprodukte oder Rückstände anderer Produktsysteme ein. Unter Allokation versteht man nun die Zuordnung der In- oder Outputs eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen (ISO 14040:2006). Die möglichen Allokationsverfahren werden unter dem Punkt Sachbilanz genauer beschrieben. Welche Allokationsverfahren verwendet werden, wird jedoch schon im Untersuchungsrahmen definiert.

Ebenfalls schon bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens werden die Methode der Wirkungsabschätzung sowie die ausgewählten Wirkungskategorien festgelegt. Eine genauere Beschreibung von verschiedenen Wirkungsabschätzungsmethoden erfolgt unter dem Punkt Wirkungsabschätzung.

Weitere Punkte, die in der Rahmenfestlegung behandelt werden, sind die Anforderungen an die Datenqualität (Genauigkeit, Vollständigkeit, Repräsentativität, Konsistenz, Nachvollziehbarkeit) sowie die Festlegung getroffener Annahmen und Einschränkungen. Die Festlegung der Rahmenbedingungen und Art einer kritischen Prüfung (Die Durchführung einer kritischen Prüfung ist nach ISO 14040:2006 nur dann zwingend, wenn die Anwendung von Ergebnissen einer Ökobilanz für extern kommunizierte, vergleichende Aussagen verwendet wird. Ansonsten kann eine kritische Prüfung zum besseren Verständnis beitragen und die Glaubwürdigkeit von Ökobilanz-Studien erhöhen.) sowie Art und Verfahren der Berichterstattung.

Sachbilanz

Die Sachbilanz umfasst die Datenerhebung und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter In- und Outputs eines Produktionssystems (ISO 14040:2006). Der Prozess der Erstellung einer Sachbilanz ist iterativ, d.h. während der Datensammlung können neue Datenanforderungen oder Einschränkungen erkannt werden, die eine Änderung der Verfahren zur Datenerhebung oder sogar eine Änderung des Ziels oder des Untersuchungsrahmens notwendig machen.

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende Produktsystem entworfen, welches wie bereits erwähnt aus einer Vielzahl von Einheitsprozessen besteht. Die Datenerhebung umfasst für jeden Einzelprozess Energie-, Rohstoff-, Betriebsstoff und andere physikalische Inputs; Produkte, Koppelprodukte und Abfall; Emissionen in Luft, Wasser und

Boden sowie gegebenenfalls weitere Umweltaspekte (z.B. Flächenbedarf). In der folgenden Datenberechnung erfolgt die Validierung der gesammelten Daten und der Bezug auf Prozessmodule bzw. die funktionelle Einheit.

Das Ergebnis der Sachbilanz ist eine sehr umfassende Liste aller In- und Outputs des betrachteten Systems. Oft erzeugt das System jedoch wie bereits erwähnt nicht nur ein Produkt (z.B.: Strom) sondern auch Wärme oder andere Koppelprodukte (Gärrest, Asche), die ebenfalls einen quantifizierbaren Nutzen bringen. Daher stellt sich die Frage, wie die berechneten Umweltbelastungen auf die verschiedenen Produkte aufgeteilt (alloziert) werden. In diesen Fällen lassen sich mehrere sogenannte Allokationsverfahren nach ISO 14041 anwenden:

Wenn möglich, sollte eine Allokation durch a) Teilung der betroffenen Einheitsprozesse (in zwei oder mehrere Teilprozesse und Erfassen der Energie- und Stoffströme bezogen auf diese Teilprozesse) oder b) Erweiterung des Produktsystems (durch Aufnahme zusätzlicher Systeme, die die Funktionen der Koppelprodukte abdecken) vermieden werden. Bei der Systemerweiterung werden dabei die Aufwendungen und Emissionen des zusätzlichen Systems von denjenigen des betrachteten Prozesses subtrahiert.

Wenn eine Allokation nicht vermieden werden kann, sollten die Energie- und Stoffströme zwischen den Koppelprodukten oder -funktionen so zugeordnet werden, dass die zugrunde liegenden physikalischen Beziehungen zwischen ihnen widerspiegelt werden. Ist dies nicht möglich, so können auch andere z.B. ökonomische Allokationsfaktoren herangezogen werden.

Bei der Verwendung von Allokationsfaktoren kann entweder das ganze System als eine „Blackbox“ angesehen werden oder die energetischen und stofflichen Ströme werden soweit möglich den einzelnen Produkten zugeordnet und nur für Komponenten, die nicht eindeutig zuordenbar sind, werden die Allokationsfaktoren angewandt.

Bei der Berechnung der Umweltauswirkungen von beispielsweise Blockheizkraftwerken können die Ergebnisse stark von der Allokationsmethode abhängen, wie Abbildung 15 zeigt.

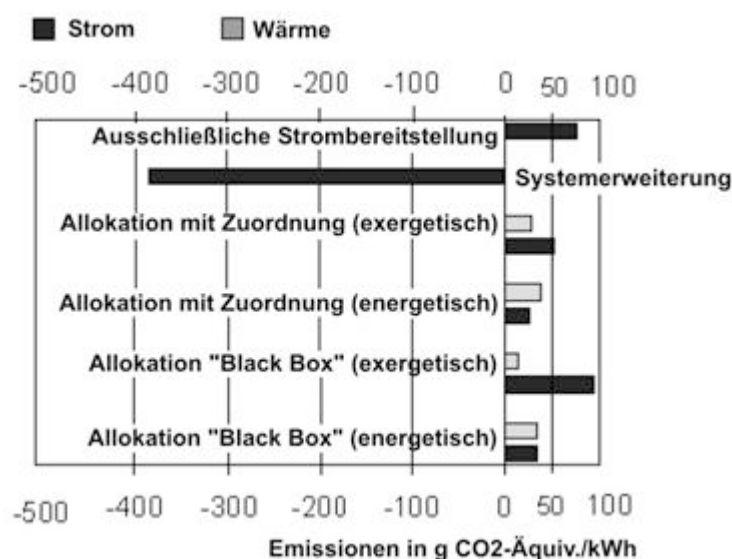


Abbildung 15: Einfluss des Allokationsverfahrens auf die Ergebnisse der Treibhausgasemissionen für ein geothermales BHKW (Rogge 2003)

Die Energieallokation wird von der EU-Kommission in der EU-Richtlinie für Erneuerbare Energien für die Berechnung der durch die Herstellung und Verwendung von Kraft- und Brennstoffen verursachten Treibhausgasemissionen für Regulierungszwecke empfohlen, da sie leicht anzuwenden und im Zeitablauf vorhersehbar ist (Europäische Kommission 2008).

Wirkungsabschätzung

Im folgenden Schritt der Wirkungsabschätzung geht es darum, die Informationen aus der Sachbilanz für die Kommunikation und/ oder die Entscheidungsunterstützung auf wenige (Umwelt-)Parameter zu verdichten. Dies erfolgt durch die Herstellung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen den Daten der Sachbilanz und den Umweltauswirkungen. Als Umweltwirkung wird dabei eine Veränderung der natürlichen Umwelt definiert, welche auf Basis von Wirkungsmodellen erfasst wird.

Die Norm ISO 14040:2006 schreibt folgende verbindliche Schritte der Wirkungsabschätzung vor:

- Auswahl von Wirkungskategorien (=Klassen, die wichtige Umweltthemen repräsentieren), Wirkungsindikatoren (quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie) und Charakterisierungsmodellen
- Klassifizierung: Zuordnung der Ergebnisse der Sachbilanz zu den relevanten Wirkungskategorien

Beispiel: Die Substanzen CO₂ und CH₄ sind treibhauswirksam, beide werden der Klasse Treibhauseffekt zugeordnet. CH₄ fördert weiters die Photooxidantienbildung und wird deshalb auch der Wirkungsklasse "Sommersmog" zugeordnet.

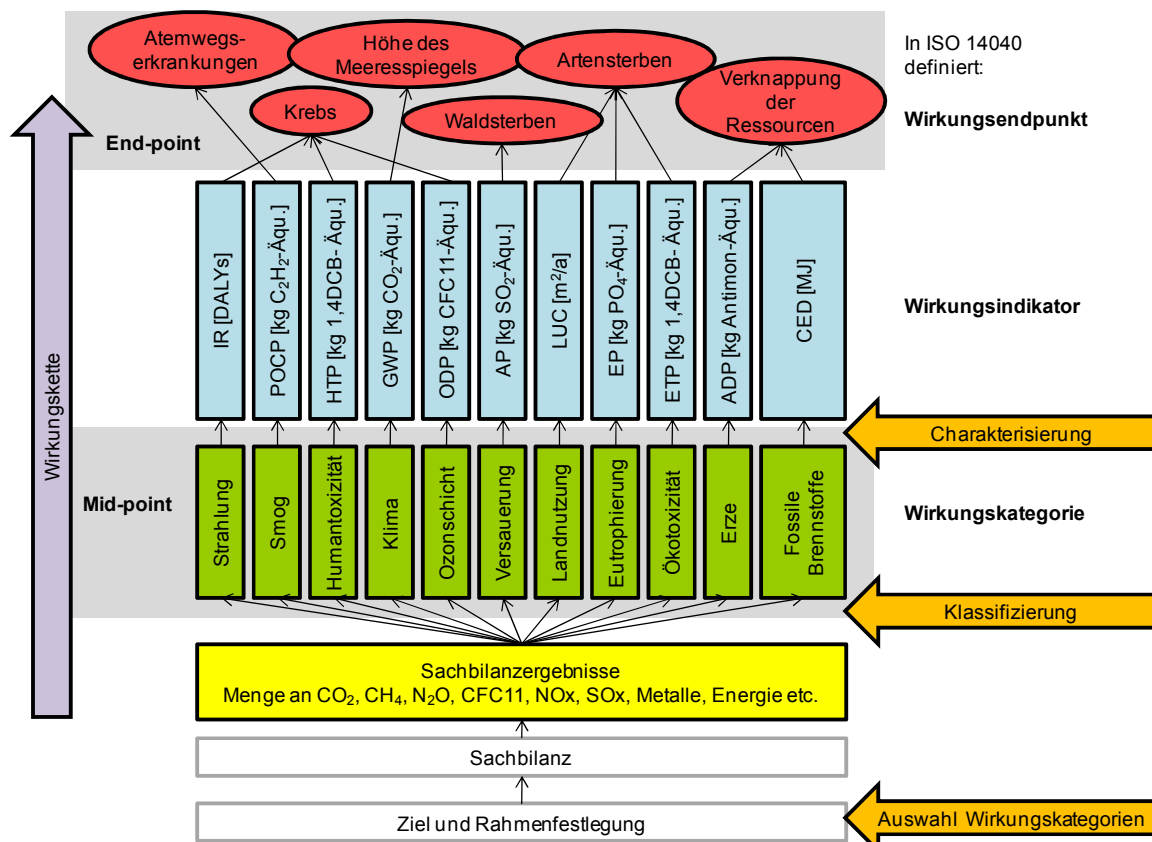
- Charakterisierung: Um verschiedene Substanzen mit gleicher Umweltwirkung vergleichen zu können, werden sie entsprechend ihrer Wirkung gewichtet. Dazu wird eine Referenzsubstanz bestimmt, bezüglich derer die Wirksamkeit der andern Schadstoffe ermittelt wird (= Wirkungsindikator). Die Berechnung des Wirkungsindikators erfolgt für jede Wirkungskategorie mithilfe entsprechender Charakterisierungsfaktoren, die aus naturwissenschaftlichen Charakterisierungsmodellen abgeleitet wurden.

Beispiel: Die Umweltwirkung Treibhauseffekt wird auf der Basis der Treibhauspotenziale (*global warming potential, GWP*) quantifiziert. Referenzsubstanz ist CO₂, daher ist die Einheit [kg CO₂-Äquivalent]. CH₄ hat gemäß (CML 2001) eine 23-mal größere Treibhauswirkung als CO₂. (Frischknecht 2006)

Diesen verbindlichen Schritten können folgende optionale Schritte folgen:

- Normierung: Berechnung der Höhe der Wirkungsindikator-Ergebnisse im Verhältnis zu einem oder mehreren Referenzwert(en). Dazu werden die Umweltwirkungen des Untersuchungsgegenstandes zu den gesamten Umweltauswirkungen einer Region absolut oder pro Kopf der Bevölkerung (z.B. der Welt, Europas oder eines Landes) in Bezug gesetzt. Das Resultat der Normierung sind standardisierte, dimensionslose Wirkungsindikator-Ergebnisse. (Frischknecht 2006).
- Ordnung: Die normierten Auswirkungswerte pro Wirkungskategorie können nun sortiert und möglicherweise klassiert werden.
- Gewichtung: Um ein Gesamtergebnis in Form einer einzelnen Kennzahl zu erhalten, kann die Gewichtung der normierten Wirkungsindikatorergebnisse durchgeführt werden.

Wie aus den genannten Schritten der Wirkungsabschätzung ersichtlich wird, können die Umweltwirkungen an verschiedenen Stellen innerhalb der Wirkungskette erfasst werden, woraus sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Konzepte für Bewertungsmethoden ergeben. Werden die Wirkungen in der Mitte der Wirkungskette definiert, spricht man von sogen. Mid-point-Methoden. Die Wirkung ist als direkt messbarer Indikator auf Basis abgesicherter naturwissenschaftlicher Modelle (z.B. CO₂-Äquivalente) definiert. Werden die Wirkungen am Ende der Wirkungskette definiert spricht man von End-point-Methoden, bei denen die Definition von Wirkung als tatsächlicher Schaden (z.B. Verlust menschlicher Gesundheit) erfolgt. Mid-point-Methoden weisen generell weniger Unsicherheiten auf, da nur ein kleiner Teil der gesamten Wirkungskette modelliert werden muss, während End-point-Methoden zwar generell leichter verständlich sind, aber signifikante Unsicherheiten aufweisen können. In Abbildung 16 ist das Schema der Wirkungsabschätzung skizziert.



IR ... Ionising Radiation; POCP ... photochemical Ozone Creation Potential; HTP ... Human Toxicity Potential; GWP ... Global Warming Potential; ODP ... Ozone Depletion Potential; AP ... Acidification Potential; LUC ... Land Use (Competition); EP ... Eutrophication Potential; ETP ... Eco Toxicity Potential; ADP ... Abiotic Depletion Potential; CED ... Cumulative Energy Demand

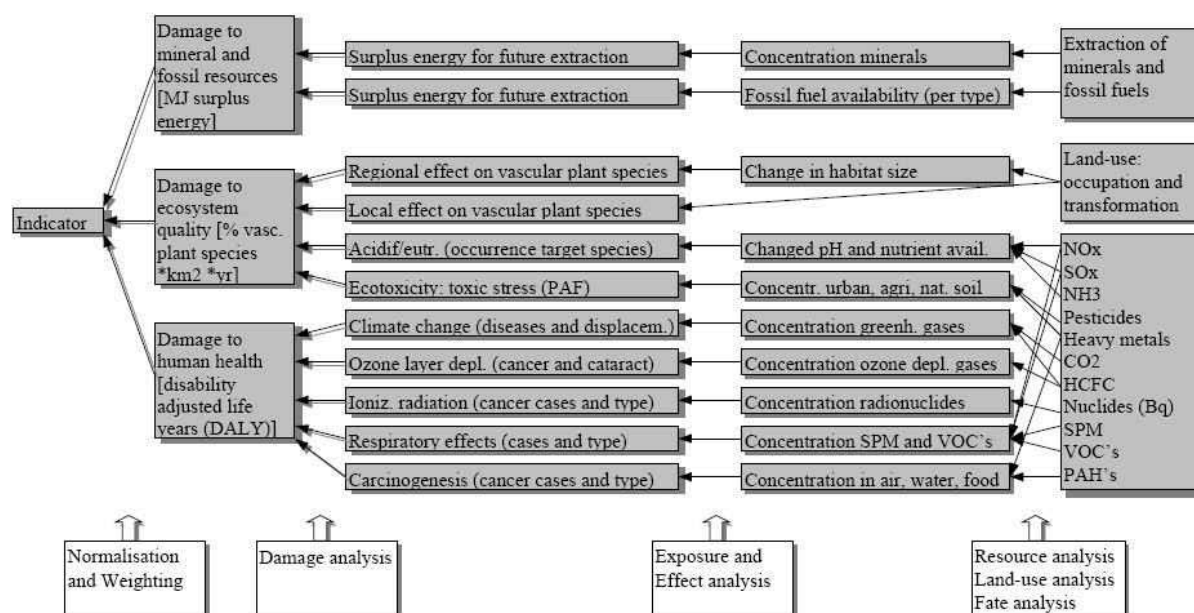
Abbildung 16: Schema der Wirkungsabschätzung (eigener Entwurf nach Schebek 2006, Pré Consultants 2006, ISO 14040:2006)

Ein Beispiel für eine Mid-point-Methode ist die wirkungsorientierte Charakterisierung nach CML (auch CML 2001). Das Modell wurde am Centrum voor Milieukunde (CML) in Leiden, Holland entwickelt und 1992 erstmals publiziert (Heijungs et al. 1992). Das von Heijungs et al. 1992 entwickelte Konzept wurde 2001 aktualisiert und erweitert (Guinée et al. 2001). In der aktualisierten Publikation werden Bewertungsansätze zu 16 als wichtig erachteten Wirkungskategorien vorgestellt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Liste anerkannter Umweltprobleme nach Guinée et al. 2001

Erschöpfung	Verschmutzung		Schädigung
Abiotische Ressourcen	Klimawandel	Überdüngung	Landnutzung
Landnutzung (Wettbewerb)	Ozonschichtabbau	Radioaktive Strahlung	Austrocknung
	Humantoxizität	Abwärme	Unfallopfer
	Ökotoxizität	Gestank	
	Versauerung	Lärm	
		Photochemische Oxidantienbildung	

Ein bekanntes Beispiel für eine End-point-Methode ist die von Goedkoop & Spriensma 2000 entwickelte Methode des „Eco-Indicator 99“. Bei dieser Bewertungsmethode werden den Stoff- und Energieströmen der Sachbilanz Wirkungsendpunkte der Umweltschädigung zugeordnet. Als Wirkungsendpunkte oder auch Schutzgüter werden die menschliche Gesundheit, die Ökosystemqualität und der Ressourcenverbrauch betrachtet. Um zu einem Gesamtergebnis zu gelangen, sind abschließend die Ergebnisse der einzelnen Wirkungsendpunkte zu gewichten. Die Gewichtungsfaktoren sind subjektiv und sollen die Einstellung einer Gruppe oder einer Gesellschaft repräsentieren. Die Standardgewichtungsfaktoren der Methode Eco-Indicator 99 wurden über eine Befragung von 82 Experten aus dem Bereich der Ökobilanzierung ermittelt. Danach werden die Wirkungsendpunkte menschliche Gesundheit und Ökosystemqualität mit je 40% und der Wirkungsendpunkt Ressourcenverbrauch mit 20% gewichtet (Goedkoop & Spriensma 2000). Ausgehend von diesen drei Schutzgütern werden Umweltschadensmodelle für die als wichtig erachteten Umweltwirkungen entwickelt um damit eine Anbindung an die Sachbilanzergebnisse zu ermöglichen. Abbildung 17 zeigt die verschiedenen Modellierungsschritte (weiß) und (Zwischen-) Resultate (grau hinterlegt) der Methode.


Abbildung 17: Allgemeine Darstellung der Eco-Indicator 99 – Wirkungsabschätzungsmethode. (Goedkoop & Spriensma 2000)

Auswertung

In der Auswertung (Phase 4) werden die Resultate der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung entsprechend dem festgelegten Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz zusammengefasst (ISO 14040:2006). Es erfolgt die Identifizierung der signifikanten Parameter sowie die Beurteilung der Ergebnisse mittels Berücksichtigung von Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen. Es werden Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen formuliert.

1.7. Stand der Bewertung von Umweltauswirkungen erneuerbarer Energiesysteme

Die energetische Nutzung von Biomasse durch bio-chemische bzw. thermo-chemische Umwandlung wurde bereits in zahlreichen Arbeiten und Studien ökologisch bewertet.

Jungmeier et al. 1998 untersuchten die Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus einer Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage. Bewertet wurden Emissionen in die Luft (CO₂, SO₂, NO_x, CO, NMVOC, N₂O, Partikel etc.), ins Wasser, in den Boden, sowie weitere Umweltwirkungen wie Lärm, Unfallrisiko oder die Benutzung von Straßen. Die Umweltwirkungen wurden dabei auf die Jahre der Nutzung des Kraftwerks aufgeteilt, wodurch sich beispielsweise für die CO₂-Emissionen in den Jahren der Errichtung der Anlage höhere Emissionen als für die Jahre des reinen Betriebs ergeben. Ergebnisse der Studie sind, dass die Umweltwirkungen stark von der Lebenszyklus-Phase, in der sich die Anlage befindet abhängen (Errichtung, Betrieb, Abriss). Die NO_x- und CO-Emissionen stammen vorwiegend aus dem Betrieb der Anlage wohingegen die CO₂-Emissionen vorwiegend aus der Errichtung (Herstellung von Stahl und Beton) stammen. Weiters wird bereits in dieser Studie darauf hingewiesen, dass die verschiedenen Allokationsoptionen zwischen Strom und Wärme zu einer Vielzahl möglicher Ergebnisse führen können.

Eine erste vergleichende Studie stammt von Calzoni et al. 2000, in welcher verschiedene Bioenergieträger zur Produktion unterschiedlicher Arten von Endenergie (Strom, Wärme, Transport) untereinander und mit fossilen Energieträgern verglichen werden. Bewertet werden die Wirkungskategorien Verbrauch fossiler Treibstoffe, Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung und Sommersmog. Ein Ergebnis der Studie ist, dass die Bioenergieträger in den Wirkungskategorien Verbrauch fossiler Treibstoffe, Treibhauspotential und Sommersmog besser als die fossilen Energieträger abschneiden, in den Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung jedoch schlechter.

Eine weitere Arbeit zur ökologischen Bewertung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen stammt von Edelmann et al. 2001. Sie verwendet die in der Schweiz übliche Eco-Indicator 99 Methode für die Wirkungsabschätzung und betont bereits die Relevanz der Methan- und Lachgasemissionen der Gülle- und Gärrestlagerung sowie die Ammoniakemissionen der Gülleausbringung auf das ökologische Gesamtergebnis.

Die Vergärung von Bioabfällen wurde für die Schweiz im Vergleich zur Kompostierung oder Verbrennung mit der Methode Eco-Indicator 99 ökologisch bewertet (Edelmann u. Schleiss, 2001). Von diesen drei Formen der Bioabfallbehandlung zeigt die Vergärung aufgrund der energetischen Nutzung des Biogases und der geschlossenen Betriebsweise in einem Reaktor die geringsten Umweltbelastungen.

Ebenfalls die Eco-Indicator 99 Methode wird in der Arbeit von Jungbluth et al. 2002 zur Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz verwendet. In dieser Arbeit wurden als wesentliche Einflussgrößen auf die Gesamtumweltwirkung die direkten Emissionen von Partikeln und NO_x identifiziert. Weiters die Jahresproduktion an Strom und Wärme mit dem damit zusammenhängenden Holzverbrauch, die Art der verwendeten Brennstoffe sowie die Aschemenge und die Art des genutzten Entsorgungsweges.

Landwirtschaftliche Biogasanlagen kleinerer Leistung werden in der Studie von Scholwin et al. 2006 mit Hilfe der CML-Methode ökologisch bewertet. Die ökologische Bewertung wird anhand der Wirkungskategorien Primärenergieeinsatz, Treibhauseffekt, Versauerungspotential und Eutrophierung durchgeführt. Die Studie kommt zu den Ergebnissen, dass bezogen auf die produzierte Strommenge reine NAWARO und reine Gülle Anlagen den höchsten kumulierten Primärenergieeinsatz aufweisen. Hinsichtlich der Treibhausgas-, versauernder und eutrophierender Emissionen ist die Stromerzeugung aus NAWAROs mit zusätzlichen Emissionen verbunden, während Co-Vergärung und reine Gülle-Vergärung Emissionssinken darstellen.

In der Arbeit von Skarka 2007 werden ausgewählte Verfahren zur Bereitstellung von Energie aus dem Grünland und aus umgebrochenen Flächen bezüglich der Wirkungskategorien Verbrauch nicht-erneuerbarer Energieträger, Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog sowie Feinstaub, CO_2 - und NO_x -Emissionen untersucht. Er stellt dabei fest, dass alle untersuchten Verfahren einen mehr oder weniger großen Beitrag zum Klimaschutz und zur Einsparung nicht-erneuerbarer Energieträger leisten. Probleme bestünden in den Bereichen Versauerung und Eutrophierung (v.a. Biogas), Sommersmog (v.a. Heu) und bei Feinstaubemissionen (thermische Nutzung).

Eine Studie von Vogt (2008) befasst sich nur mit den Treibhausgasbilanzen landwirtschaftlicher Biogasanlagen, wobei neben der Nutzung des Biogases im BHKW auch die Aufbereitung zu Biomethan bzw. Bio-CNG untersucht wird.

Eine umfassende Ökobilanz zur Bereitstellung und Nutzung von Biogas in Deutschland wurde von Gärtner et al. 2008 erstellt. Als Ergebnis wird abermals der Vorteil von Gülle gegenüber Maissilage bezüglich Treibhauspotential, Nährstoffeintrag und Versauerung dargestellt. Als Minderungsmaßnahmen für die Ammoniakemissionen werden die gasdichte Abdeckung des Vor- und Endlagers sowie die Optimierung der Ausbringung und Einarbeitung der Gärreste identifiziert.

Die sehr umfassenden Arbeit von Kaltschmitt und Streicher 2009 „Regenerative Energien in Österreich – Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potentiale, Nutzung“ beinhaltet unter anderem Ökobilanzen aller in Österreich nutzbaren Erneuerbaren Energien zur Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung. Darunter fallen auch die Stromproduktion aus Biogas und fester Biomasse, die in dieser Arbeit untersucht werden. Betrachtet werden der Energieaufwand, SO_2 -, NO_x - sowie CO_2 -eq.- und SO_2 -eq.- Emissionen.

In der Studie von Pucker et al. 2010 (Endbericht derzeit in Begutachtung) werden Erfolgsfaktoren zur nachhaltigen Nutzung der Biogastechnologie am Beispiel ausgewählter Biogasanlagen abgeleitet. Bewertet wurden die Wirkungskategorien fossiler Primärenergiebedarf, Treibhauseffekt, Versauerung, Staubemissionen und landwirtschaftlicher Flächenbedarf. Als Erfolgsfaktoren wurden der eingesetzte Rohstoff (NAWAROS schneiden schlechter ab als organische Reststoffe oder Gülle), die Gärrest-Ausbringtechnik (NH_3 -Minderungsmaßnahmen), die Wärmenutzung, ein geschlossenes

Endlager, Emissionsmindernde Maßnahmen für die Verbrennung im BHKW, sowie der Ersatz von fossilen Energieträgern identifiziert.

Auch unter den Ecoinvent-Berichten finden sich Ökobilanzen zu Holzenergie (Bauer et al. 2007) und Biogas (Spielmann et al. 2007), die die bisher genannten Ergebnisse bestätigen.

Allen Biogas-Ökobilanzen ist gemein, dass auf die Unsicherheit bezüglich der Emissionsfaktoren für gasförmige Emissionen durch das Gärrestmanagement hingewiesen wird.

Eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse der erwähnten Studien erfolgt im Zuge des Vergleiches mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit unter Punkt 4.3.

Die verschiedenen Studien können aufgrund der unterschiedlichen funktionellen Einheiten und Systemgrenzen schwer miteinander verglichen werden. Dieses Problem soll in der vorliegenden Arbeit durch eine einheitliche systematische Vorgehensweise für alle untersuchten Umwandlungstechnologien ausgeräumt werden.

2. Problemstellung

Ziel dieser Arbeit ist es mittels Lebenszyklusanalyse die gesamte Prozesskette zur Bereitstellung von Strom aus Biomasse durch bio-chemische und thermo-chemische Umwandlungstechnologien zu analysieren.

Als Basis für die Analyse sollen bestehende Ökostrom Anlagen dienen, wodurch sie sich von den meisten bereits vorhandenen Studien unterscheidet, in denen Modell-Anlagen für die Berechnungen herangezogen werden.

Biomassetechnologien weisen eine große Komplexität der Stoffströme auf:

- es kommen Reststoffe als Substrate zum Einsatz, die in der konventionellen Entsorgung/Verwertung hohe umweltbelastende Emissionen verursachen, welche durch die Verwendung im Biomasse-System vermieden werden;
- meist fallen mehrere Koppelprodukte an, deren Nutzen in einer adäquaten Form alloziert werden muss.

Ein wichtiger Punkt für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die verschiedenen Umwandlungstechnologien, ist daher die klare und einheitliche Definition der Systemgrenzen, der Allokationsmethoden sowie der, in die Analyse einbezogenen, Lebenszyklusabschnitte.

Durch die einheitliche, systematische Vorgehensweise in dieser Arbeit soll der Vergleich verschiedener Biomassetechnologien ermöglicht werden, was mit den Ergebnissen aus unterschiedlichen, bisher vorliegenden Studien nicht möglich ist.

Als Ergebnis der Prozesskettenanalyse sollen die umweltrelevanten Schlüsselprozesse, als Basis für Optimierungspotentiale, identifiziert werden. Die mit dem Betrieb der Anlagen verbundenen Be- bzw. Entlastungen für die Umwelt sollen quantifiziert und transparent dargestellt werden.

Neben dem Treibhauseffekt sollen auch weitere Auswirkungen auf das Ökosystem wie beispielsweise Versauerung, Überdüngung, Sommersmog, Abbau der Ozonschicht, Toxizitätspotentiale oder die Landnutzungsintensität berücksichtigt werden.

3. Methoden

Zum Vergleich der Energieaufwendungen und Umweltwirkungen verschiedener Technologien zur Stromerzeugung aus Biomasse in Österreich werden Lebenszyklusanalysen dieser Technologien in Anlehnung an ISO 140040ff (Umweltmanagement - Ökobilanzen/ Lebenszyklusanalysen) erstellt.

3.1. Ziel und Untersuchungsrahmen

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Vergleich der Umweltwirkungen, sowie die Identifikation der Schlüsselprozesse (und damit der Ansatzpunkt für Optimierungspotentiale) verschiedener bio-chemischer und thermo-chemischer Technologien zur Nutzung von Biomasse für die Bereitstellung von Strom in Österreich. Den geografischen Rahmen der Untersuchung stellt Österreich dar, den technischen Rahmen bilden aktuelle bzw. in der nahen Zukunft kommerziell einsetzbare Technologien.

3.1.1. Funktionelle Einheit

Die Basis für den Vergleich ist 1 kWh erzeugte elektrische Energie, da dies die gebräuchlichste Einheit für Strom ist, welche auch in vielen anderen Studien verwendet wird.

3.1.2. Beschreibung der untersuchten Systeme sowie der Systemgrenzen und Allokationsmethoden

3.1.2.1. Bio-chemische Umwandlung: Biogas-System

Das in dieser Arbeit untersuchte System zur Stromerzeugung durch Vergärung (= Biogas-System) wird in Abbildung 18 dargestellt.

Als Substrate für die Vergärung werden nachwachsende Rohstoffe (NAWAROs), Wirtschaftsdünger (WD) und organische Abfall- bzw. Reststoffe (AF) unterschieden. Die „Produktion nachwachsender Rohstoffe“ befindet sich innerhalb der Systemgrenzen und stellt somit den ersten Lebenszyklusabschnitt (NAWAROs) dar. Wirtschaftsdünger und Abfallstoffe hingegen werden als Reststoffe anderer Systeme angesehen, deren Produktion nicht innerhalb des Biogassystems liegt.

Der nächste Lebenszyklusabschnitt, der für alle Substrate berücksichtigt wird, ist der „Transport“ der Substrate zur Biogasanlage.

Der „Betrieb der Biogasanlage“ umfasst die Lagerung und Einbringung der Substrate sowie die Biogasproduktion im Fermenter und die Speicherung des Biogases.

Der folgende Lebenszyklusabschnitt ist die Verwertung des Biogases im BHKW zur Stromerzeugung (BHKW).

Die Energieaufwendungen bzw. Emissionen, die durch die Herstellung der Baumaterialien, den Bau sowie den Abriss der Anlage und die Entsorgung der Baumaterialien entstehen werden in einem eigenen Lebenszyklusabschnitt „Infrastruktur“ bilanziert.

Weitere Lebenszyklusabschnitte sind die Lagerung des Gärrestes im Endlager (GR Lagerung) sowie die Ausbringung des Gärrestes (GR Ausbringung).

Für die drei Inputs Fläche, WD und AF wird eine Referenznutzung definiert. Dadurch wird berücksichtigt was mit diesen Reststoffen und der Fläche passieren würde, wenn diese nicht für das Biogas-System genutzt würden. Der Energieaufwand und die Emissionen, die mit dieser Referenznutzung verbunden sind, werden dem Biogas-System gutgeschrieben (Lebenszyklusabschnitte REF NAWAROs, REF WD und REF AF).

Das Hauptprodukt des Systems ist Strom, Koppel- oder Nebenprodukte sind Wärme und Dünger (Gärrest). Für diese Koppelprodukte wird das Allokationsverfahren der Systemerweiterung angewandt (siehe 1.6).

Für die produzierte und genutzte Wärme des BHKWs wird eine „Gutschrift Wärmenutzung“ (GS Wärme) erteilt, d.h. die Emissionen, die bei der Produktion der gleichen Menge an Wärme durch den österreichischen Wärmemix anfallen würden, werden vom Biogas-System subtrahiert.

Ähnlich wird für das Koppelprodukt „Dünger“ vorgegangen: nach der Erstellung einer Stickstoffbilanz (N im Gärrest abzüglich (N aus der Referenznutzung WD plus N aus der Referenznutzung AF)) werden die Energieaufwendungen bzw. Emissionen für die Herstellung von synthetischem Stickstoffdünger dem Biogas-System gutgeschrieben bzw. für den Fall, dass im Biogas-System weniger Dünger anfällt als durch die Referenznutzungen, angelastet (GS Dünger).

3.1.2.2. Thermo-chemische Umwandlung: Holz-System

Das in dieser Arbeit untersuchte System zur Stromerzeugung durch thermo-chemische Umwandlung der Biomasse (= Holz-System) wird in Abbildung 19 dargestellt.

Als Substrate bzw. Rohstoffe werden Waldhackgut und Sägenebenprodukte (SNP) berücksichtigt. Die Sägenebenprodukte gelten als Abfall eines anderen Prozesses, sodass deren „Produktion“ nicht innerhalb der Systemgrenzen liegt.

Die Produktion des Waldhackgutes liegt innerhalb der Systemgrenzen und bildet den ersten Lebenszyklusabschnitt (NAWAROs).

Der nächste Lebenszyklusabschnitt, der für alle Substrate berücksichtigt wird, ist der „Transport“ der Substrate zur Anlage.

Der „Betrieb der Anlage“ umfasst die Lagerung und Einbringung der Substrate sowie die Entsorgung der anfallenden Asche. Für Verbrennungs-Anlagen beinhaltet der Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Anlage weiters den Bedarf an Schmier- bzw. Hydrauliköl sowie die Emissionen aus der Verbrennung. Für Vergasungs-Anlagen beinhaltet dieser Lebenszyklusabschnitt den Bedarf an Vergasungsmittel bzw. Katalysatoren und ev. Inertgasen, Emissionen aus der Vergasung sowie der Verbrennung des Produktgases, Aufwendungen für die Gasreinigung sowie den Bedarf an Schmiermitteln für die Stromerzeugung und die Entsorgung der Asche.

Die Energieaufwendungen bzw. Emissionen, die durch die Herstellung der Baumaterialien, den Bau sowie den Abriss der Anlage und die Entsorgung der Baumaterialien entstehen werden in einem eigenen Lebenszyklusabschnitt „Infrastruktur“ bilanziert.

Neben dem Hauptprodukt Strom fallen die Koppelprodukte Wärme und Dünger an, wobei ebenfalls die Allokationsmethode der Systemerweiterung angewandt wird (GS Wärme, GS Dünger).

Für die System-Inputs Fläche und Sägenebenprodukte wird eine Referenznutzung definiert. Dadurch wird berücksichtigt was mit den Sägenebenprodukten und der Fläche passieren würde, wenn diese nicht für das Holz-System genutzt werden würden. Der Energieaufwand und die Emissionen, die mit dieser Referenznutzung verbunden sind, werden von den Emissionen des Holz-Systems subtrahiert (REF NAWAROs, REF SNP)

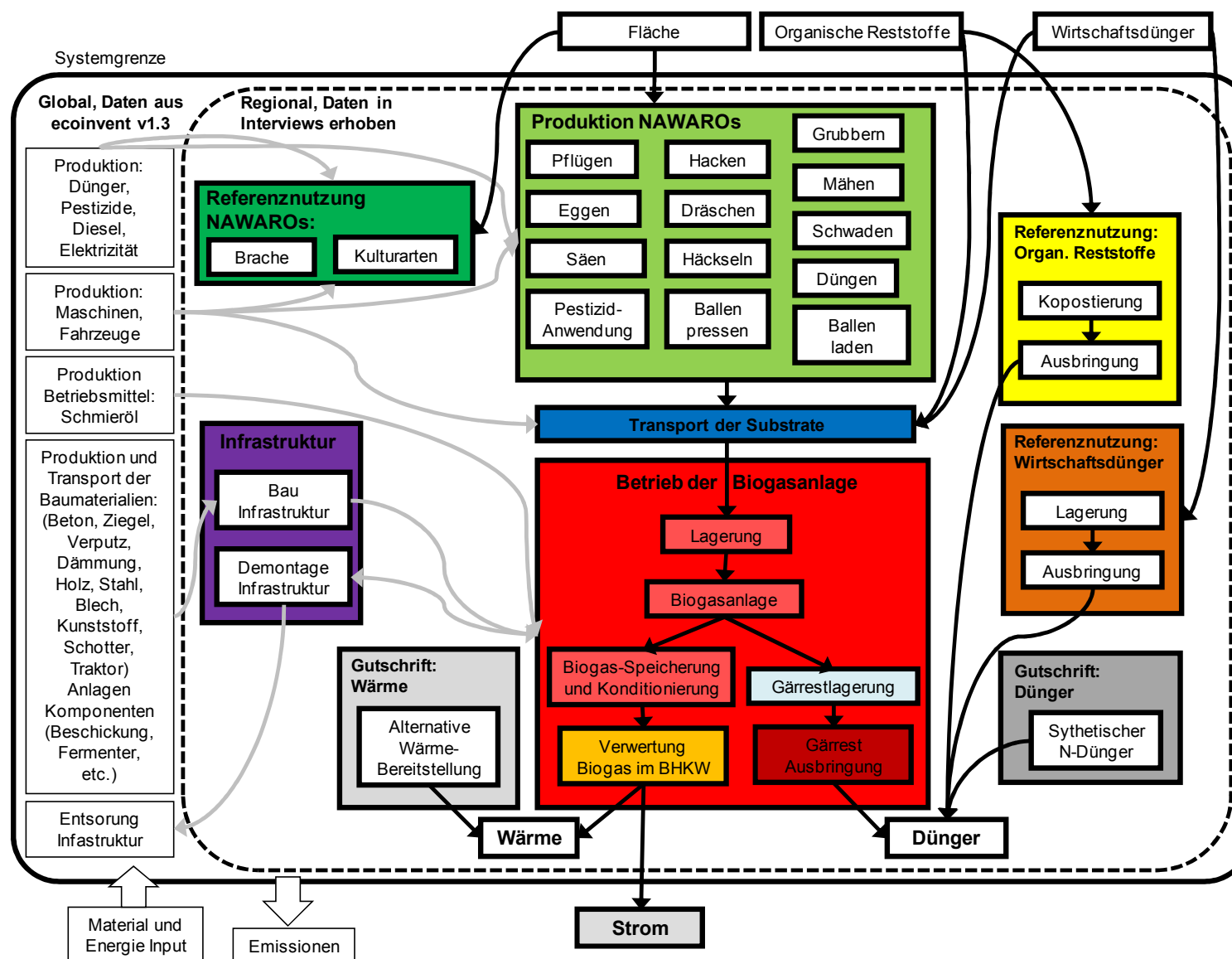


Abbildung 18: Darstellung des Biogas-Systems inklusive vorgelagerter Prozesse, Lebenszyklusabschnitte und Systemgrenze.

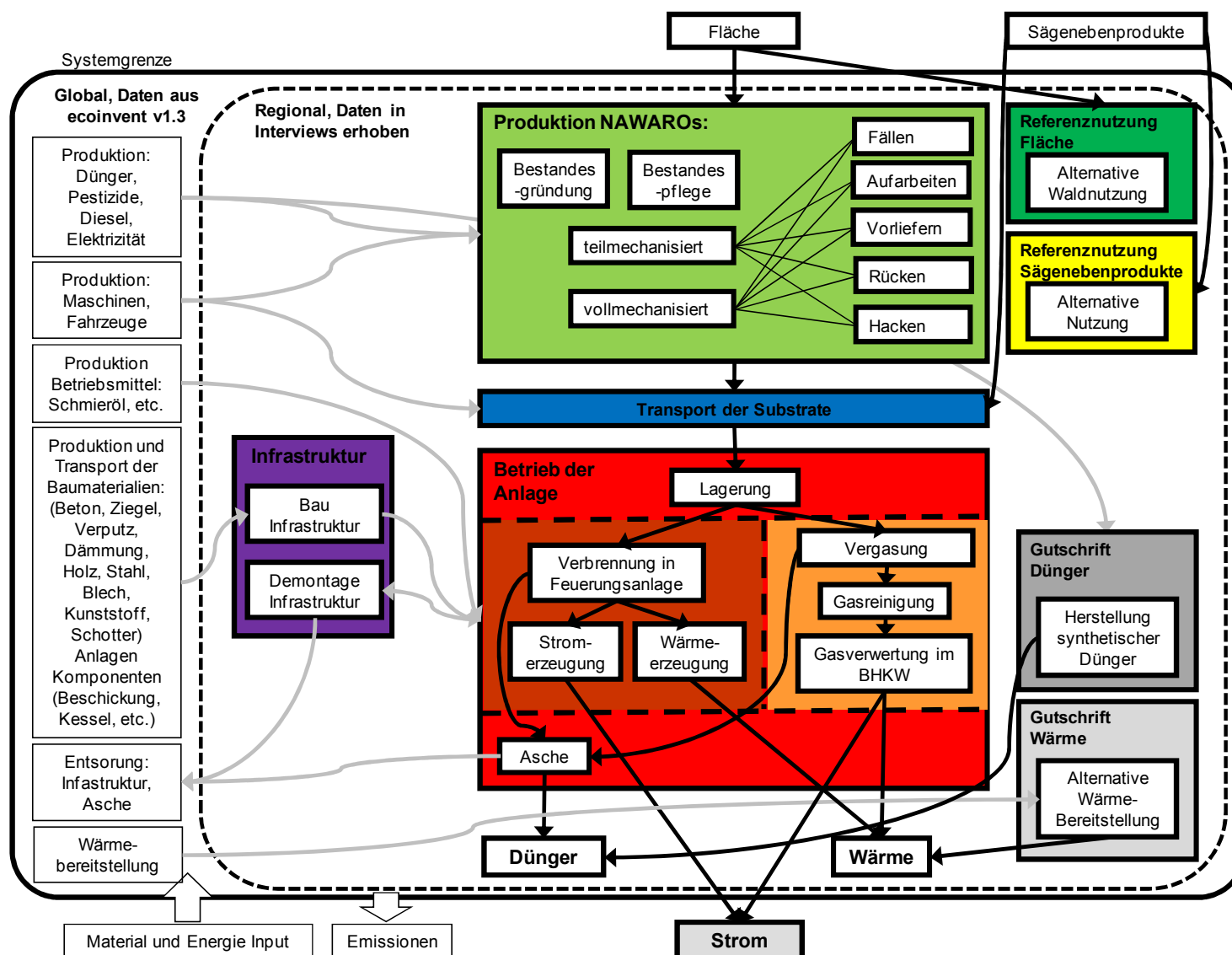


Abbildung 19: Darstellung des Holz-Systems inklusive vorgelagerter Prozesse, Lebenszyklusabschnitte und Systemgrenze (Verbrennung und Vergasung sind im Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Anlage getrennt dargestellt).

3.1.3. Wirkungsabschätzungsmethode

Zur Wirkungsabschätzung wird die international gebräuchliche Mid-point-Methode „CML 2001“ (Guinée et al. 2001) aufgrund ihrer wissenschaftlich fundierten Basis, dem breiten Spektrum an Wirkungskategorien und der weiten Verbreitung bei Lebenszyklusanalysen verwendet. Nachfolgend werden die für die Bewertung ausgewählten Wirkungskategorien des Baseline-Ansatzes (Guinée et al. 2001) genauer beschrieben.

Erschöpfung abiotischer Ressourcen, Abiotic Depletion Potential (ADP)

In dieser Wirkungskategorie wird der Verbrauch bzw. die Erschöpfung der nicht nachwachsenden Rohstoffe erhoben. Dabei handelt es sich um fossile Energieträger und mineralische Ressourcen (z.B. Sand oder Eisenerz). Alle Substanzen, die im Verlauf des gesamten Lebensweges benötigt werden, werden mit Hilfe von Charakterisationsfaktoren auf die Referenzsubstanz Antimon in kg Antimon (Sb) -Äquivalente umgerechnet. (Tabelle 4)

Tabelle 4: Charakterisationsfaktoren für die Erschöpfung abiotischer Ressourcen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001)

Substanz	Kompartiment	Einh.	kg Sb-eq	Substanz	Kompartiment	Einh.	kg Sb-eq
Aluminium	Ressource	kg	1,00E-08	Phosphor	Ressource	kg	8,44E-05
Chrom	Ressource	kg	8,58E-04	Uran	Ressource	kg	2,87E-03
Kobalt	Ressource	kg	2,62E-05	Erdgas	Ressource	Nm3	0,0187
Kupfer	Ressource	kg	1,94E-03	Erdöl	Ressource	kg	0,0201
Eisen	Ressource	kg	8,43E-08	Braunkohle	Ressource	kg	0,00671
Blei	Ressource	kg	1,35E-02	Steinkohle	Ressource	kg	0,0134

Treibhauspotential/ Klimawandel, Global Warming Potential (GWP)

Unter Klimawandel wird die Auswirkung der, aufgrund menschlicher Aktivitäten freigesetzten, Emissionen auf den sogen. Strahlungsantrieb der Atmosphäre bezeichnet. Dieser basiert darauf, dass bestimmte Spurengase der Erdatmosphäre die einfallende Sonnenstrahlung nahezu ungehindert durchlassen, aber einen großen Teil der von der Erde wieder ausgesandten Infrarotstrahlung absorbieren, wodurch sich die Troposphäre aufheizt (Treibhauseffekt). Diese Erwärmung hat nachteilige Auswirkungen auf die Gesundheit der Ökosysteme sowie des Menschen, als auch auf Materialien.

In CML 2001 wird das vom IPCC entwickelte Charakterisationsmodell verwendet, welches das Treibhauspotential verschiedener Gase in der Einheit Kohlendioxid (CO₂)-Äquivalente definiert. (Tabelle 5)

Tabelle 5: Charakterisationsfaktoren für das Treibhauspotential verschiedener Gase (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001)

Substanz	Komp.	Einh.	kg CO ₂ -eq	Substanz	Komp.	Einh.	kg CO ₂ -eq
CO ₂	Luft	kg	1	HCFC-124	Luft	kg	620
CO	Luft	kg	1,53	R-40	Luft	kg	16
N ₂ O	Luft	kg	296	CFC-10	Luft	kg	1800
CH ₄	Luft	kg	23	FC-14	Luft	kg	5700
HFC-134a	Luft	kg	1300	CFC-11	Luft	kg	4600
CFC-113	Luft	kg	6000	HFC-23	Luft	kg	12000
CFC-114	Luft	kg	9800	SF ₆	Luft	kg	22200

Versauerungspotential, Acidification Potential (AP)

Die Versauerung von Böden und Gewässern wird durch säurebildende Gase verursacht, die aus der Atmosphäre entweder trocken deponiert oder in Form von nasser Deposition (saurer Regen) auf die jeweiligen Systeme einwirken. Sie haben eine Vielfalt unterschiedlicher Auswirkungen auf Boden, Grundwasser, Oberflächenwasser, biologische Organismen, Ökosysteme und Materialien (Gebäude). Das Versauerungspotential beschreibt die Wirkung versauernder Emissionen, ausgedrückt in SO₂-Äquivalenten. Referenzsubstanz für die Bildung des Versauerungspotenzials ist SO₂ (Schwefeldioxid), auf das die Wirkung der anderen versauernd wirkenden Emissionen (wie z.B. NO_x, H₂S) bezogen wird.

Eutrophierungspotential, Eutrophication Potential (EP)

Unter Eutrophierung versteht man die Überdüngung von Gewässern durch Pflanzennährstoffe (vor allem Phosphor- und Stickstoff-Verbindungen) und die hierdurch verursachte Belastung bzw. Schädigung des Ökosystems. Dieser Vorgang kann natürlichen Ursprungs sein oder durch Verschmutzung (vor allem aus der Landwirtschaft) hervorgerufen werden. Die Überdüngung bewirkt dabei eine Verschiebung der Arten-Zusammensetzung sowie eine verstärkte Biomasseproduktion sowohl in aquatischen als auch terrestrischen Ökosystemen. Die Bezugsgröße für das Eutrophierungspotential ist Phosphat (PO₄³⁻). Andere eutrophierende Emissionen werden auf die wirkungsäquivalente Phosphatmenge bezogen.

Tabelle 6: Charakterisationsfaktoren für das Versauerungs- und Eutrophierungspotential verschiedener Substanzen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001)

Substanz	Komp.	Einh.	AP	EP
			kg SO ₂ -eq	kg PO ₄ -eq
Ammoniak	Luft	kg	1,88	0,35
Nitrat	Luft	kg		0,1
Stickoxide	Luft	kg	0,7	0,13
Phosphor	Luft	kg		3,06
Schwefeldioxid	Luft	kg	1	
Schwefelwasserstoff	Luft	kg	1,88	
Phosphor	Boden	kg		3,06
CSB (chem. Sauerstoffbedarf)	Wasser	kg		0,022
Nitrit	Wasser	kg		0,1
Stickstoff	Wasser	kg		0,42
Phosphat	Wasser	kg		1
Phosphor	Wasser	kg		3,06

Photochemisches Oxidantienbildungspotential, Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)

Photochemische Oxidantienbildung, auch Sommersmog, ist die Bildung reaktiver chemischer Verbindungen wie z.B. Ozon durch die Einstrahlung des Sonnenlichtes auf primäre, in der Luft vorhandene Schadstoffe (hauptsächlich flüchtige organische Verbindungen und CO in der Anwesenheit von NO_x). Diese Verbindungen können schädlich für die menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Feldfrüchte sein.

Das Ozonbildungspotential ist das massebezogene Äquivalent der Bildung von bodennahem (troposphärischen) Ozon durch Vorläufersubstanzen. Referenzsubstanz ist Ethen (C₂H₄).

Tabelle 7: Charakterisationsfaktoren für das Photochemische Oxidantienbildungspotential verschiedener Substanzen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001)

Substanz	Komp.	Einh.	kg C ₂ H ₄ -eq	Substanz	Komp.	Einh.	kg C ₂ H ₄ -eq
Benzen	Luft	kg	0,218	Propan	Luft	kg	0,176
Ethen	Luft	kg	1	Propen	Luft	kg	1,123
Methan	Luft	kg	0,006	Propionsäure	Luft	kg	0,15
Kohlenmonoxid	Luft	kg	0,027	Schwefeldioxid	Luft	kg	0,048
R-40	Luft	kg	0,005	Toluen	Luft	kg	0,637
Methanol	Luft	kg	0,14				

Ozonabbaupotential, Ozone Depletion Potential (ODP)

Ozon bildet in der Stratosphäre eine Schicht (Ozonschicht), die Pflanzen und Tiere vor einem Großteil der schädlichen UV-Strahlung der Sonne schützt. Die Ozonmenge ist bedingt durch CFCs und halogenierte Kohlenwasserstoffe, die in die Atmosphäre abgegeben wurden, zurückgegangen, wodurch ein größerer Teil der UV-Strahlung die Erdoberfläche erreicht, was schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen und Tieren, auf terrestrische und aquatische Ökosysteme, Biochemische Zyklen und Materialien hat.

Tabelle 8: Charakterisationsfaktoren für das Ozonabbaupotential verschiedener Substanzen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001)

Substanz	Kompartiment	Einh.	kg CFC-11-eq
CFC-113	Luft	kg	0,9
CFC-114	Luft	kg	0,85
HCFC-124	Luft	kg	0,026
R-40	Luft	kg	0,02
CFC-10	Luft	kg	1,2
CFC-11	Luft	kg	1

Flächenverbrauch, Land use, competition (LUC)

Gerade in Zeiten von steigender Nachfrage nach nachwachsenden Rohstoffen und damit einhergehend steigendem Flächenbedarf, ist es interessant zu wissen, wie viel Fläche die Bereitstellung von 1 kWh Strom aus NAWAROs benötigt. Diese Frage kann durch die Wirkungskategorie Flächenverbrauch (LUC) bei der die benötigten Flächen für die Produktion der Rohstoffe aber auch anteilig Infrastruktur und Produktionsstätten zur Herstellung vorgelagerter Produkte berechnet werden, beantwortet werden. Einheit dieser Wirkungskategorie ist m² pro Jahr.

Toxizitätspotentiale:

**Menschliche Gesundheit, Human Toxicity Potential (HTP),
Süßwasser-Ökosysteme, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP),
Marine Ökosysteme, Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (MAETP),
Terrestrische Ökosysteme, Terrestrial Ecotoxicity Potential (TAETP)**

Die Toxizitätspotentiale beschreiben die Wirkung toxischer Substanzen auf die menschliche Gesundheit sowie Ökosysteme. Sie berechnen sich durch Multiplikation der Menge der verschiedenen Emissionen in Luft, Wasser und Boden mit den jeweiligen Charakterisationsfaktoren. Referenzsubstanz und Einheit dieser Wirkungskategorie ist 1,4-Dichlorbenzen.

Tabelle 9: Charakterisationsfaktoren für die Toxizitätspotentiale verschiedener Substanzen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001)

Substanz	Komp.	Einh.	HTP	FAETP	MAETP	TAETP
			kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq
Ammoniak	Luft	kg	0,10	0	0	0
Arsen	Luft	kg	347699,70	49,50	231410,74	1609,10
Benzen	Luft	kg	1899,91	8,37E-05	2,80E-03	1,56E-05
Chrom VI	Luft	kg	3425330,24	7,69	20969,30	3031,12
Dioxine	Luft	kg	1933982792,23	2126816,61	296410657,97	11991,59
Quecksilber	Luft	kg	6008,16	316,79	1199665,68	28312,64
CFC-10	Luft	kg	220,43	2,52E-04	1,15	4,71E-04
Stickoxide	Luft	kg	1,20	0	0	0
Partikel	Luft	kg	0,82	0	0	0
Schwefeldioxid	Luft	kg	0,10	0	0	0
Toluen	Luft	kg	0,33	7,04E-05	6,99E-04	1,59E-05
Arsen	Boden	kg	31813,03	134,41	77078,26	3335,67
Chrom VI	Boden	kg	499,73	21,02	2617,31	6302,86
Blei	Boden	kg	293,31	6,53	753,36	32,52
Quecksilber	Boden	kg	5921,15	848,13	165517,28	55994,14
Zink	Boden	kg	63,74	47,75	7208,56	24,59
Arsen	Wasser	kg	950,62	206,75	118560,11	1,04E-17
Chrom VI	Wasser	kg	3,42	27,66	3443,74	2,27E-19
Blei	Wasser	kg	12,26	9,62	1109,73	4,77E-22
Quecksilber	Wasser	kg	1425,96	1717,14	214326,88	930,33
Zink	Wasser	kg	0,58	91,71	13846,77	2,53E-21

3.2. Sachbilanz

Im folgenden Abschnitt werden die Datenerhebung sowie die, für die Berechnung der Umweltwirkung der verschiedenen Technologien zur Stromerzeugung notwendigen Daten bzw. Berechnungsmodelle vorgestellt und diskutiert.

Regionale Daten der untersuchten Anlagen wurden in persönlichen Interviews mit den Anlagenbetreibern erhoben. Für Biogasanlagen erfolgte die Befragung der Anlagenbetreiber durch Michael Laaber zw. 2004 und 2007 im Zuge des Projektes „Aufbau eines Bewertungssystems für Biogasanlagen – „Gütesiegel Biogas“.“ (Laaber et al. 2007) Dieses Projekt wurde im Rahmen der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft im Auftrag des BMVIT vom Interuniversitären Forschungsinstitut für Agrarbiotechnologie (IFA Tulln) durchgeführt. Die Erhebung der Daten für Verbrennungs- und Vergasungsanlagen erfolgte durch Sonja Siegl zw. 2008 und 2010. Bei Bedarf wurden die erhobenen Daten durch chemische Analysen (IFA Tulln) und Literaturdaten ergänzt.

Globale Daten wie z.B. Emissionen der Düngerproduktion oder der Transportdienstleistung von 1 tkm, wurden der Ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent 2007) entnommen.

Die Ecoinvent-Datenbank wurde vom „Swiss Centre for Life Cycle Inventories“ (Schweizer Zentrum für Ökoinventare) einem Kompetenzzentrum verschiedener Institute und Abteilungen des ETH-Bereiches – dazu zählen Gruppen an den ETH in Zürich und Lausanne, dem Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen (AG), der Empa in Dübendorf und St. Gallen sowie die Ökobilanz-Gruppen der landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (Agroscope FAL Reckenholz und FAT Tänikon) – entwickelt. Nach einer mehrjährigen Vorbereitungs- und Entwicklungsphase wurde im Herbst 2003 die erste Version der schweizerischen Ökobilanz-Datenbank aufgeschaltet. Im Rahmen des Projekts sind mehr als 2700 Datensätze dieser und weiterer Institute neu erhoben, aufbereitet, vereinheitlicht und aufdatiert worden. Dadurch stehen für die Bereiche Energie, Transport, Entsorgung, Bauwesen, Chemikalien, Waschmittelinhaltsstoffe, Papiere und Landwirtschaft harmonisierte Sachbilanzdaten von hoher Qualität zur Verfügung. Die Daten beziehen sich auf die Produktions- und Versorgungssituation im Jahr 2000. Sie sind für schweizerische und west-europäische Verhältnisse gültig und folgen der Internationalen Norm für Ökobilanzen ISO 14040:2006.

Tabelle 10 gibt einen detaillierten Überblick über alle erhobenen Inputparameter für die Berechnung der Sachbilanz, sowie deren Quellen und die Verknüpfung zu den verwendeten Datensätzen der Ecoinvent-Datenbank.

Tabelle 10: Beschreibung der verwendeten Inputparameter, sowie deren Quellen und die Verknüpfung mit der Ecoinvent-Datenbank für die Berechnung der Sachbilanz. Nicht alle Module sind für alle Anlagen relevant!

Inputparameter	Quelle / Berechnung	Einheit a ⁻¹	Anmerkung / Verknüpfung zum Ecoinvent-Datensatz
Produktion NAWAROs: Pflanzenproduktion			
Gesamtmenge jeder Kulturart	Daten in Interviews erhoben, für eine Lister der versch. verwendeten Kulturarten siehe Tabelle 11	t	<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Eigenschaften jeder Kulturart	Daten in Interviews erhoben (TS, OTS, CSB, Anbauart, Ertrag)		<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Saatgut (für jede Kulturart)	Berechnet über Gesamtmenge nach Ecoinvent 2007 (Tabelle 11)	kg	„Saatgutproduktion“ (für jede Kulturart)
Fläche (für jede Kulturart)	Berechnet über Gesamtmenge und ø Erträge (Tabelle 11)	ha	Kombination „landwirtschaftlicher Arbeitsprozesse“ nach Tabelle 11 z.B. „Calcium Ammonium Nitrat, als N“, „Diammonium Phosphat, als N“
Dünger (für jede Kulturart)	Daten in Interviews erhoben	kg	
Pflanzenschutzmittel (für jede Kulturart)	Daten in Interviews erhoben	kg	z.B. „Pestizide, unspezifiziert“
Produktion NAWAROs: Hackschnitzelproduktion			
Gesamtmenge Hackgut	Daten in Interviews erhoben	Srm	Kombination aus Ecoinvent-Datensätzen siehe 3.2.2
Eigenschaften Hackgut	Daten in Interviews erhoben oder mit Hilfe von Expertenmeinung abgeschätzt (Ernteverfahren, Holzsortiment, TS, Dichte, Hu)		<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
weitere Substrate			
Gesamtmenge Wirtschaftsdünger	Daten in Interviews erhoben	t	<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Eigenschaften Wirtschaftsdünger	Daten in Interviews erhoben (TS, OTS, CSB, TKN, TAN)		<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Gesamtmenge organische Reststoffe	Daten in Interviews erhoben	t	<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Eigenschaften organische Reststoffe	Daten in Interviews erhoben (TS, OTS, CSB, TKN, TAN)		<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Transport Rohstoffe:			
Traktor	Daten in Interviews erhoben (Transportdistanz, Beladung, Auslastung)	tkm	„Transport Traktor und Anhänger“
LKW	Daten in Interviews erhoben (Transportdistanz, Beladung, Auslastung)	tkm	„Transport LKW, 16 t oder 32 t“
Betrieb: Allgemeines			
Anlagen Design	Daten in Interviews erhoben (allgemeine Information über den Anlagen-Typ, Baumaterialien, Isolierung, etc.)		<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Elektrischer Eigenbedarf	Daten in Interviews erhoben	kWh	Annahme: = Teil der produzierten Strommenge

Tabelle 10 (Fortsetzung)

Inputparameter	Quelle / Berechnung	Einheit a ⁻¹	Anmerkung / Verknüpfung zum Ecoinvent-Datensatz
Betrieb: Vergärung: Lagerung und Silierung			
Treibstoffbedarf Festfahren	Berechnet unter der Annahme von 0,15 kg Diesel pro t Rohstoff ⁴	kg	„Diesel in Baumaschine“, adaptiert
Silofläche	Berechnet über die Gesamtmenge und Daten über die Geometrie der Silos	m ²	<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Silage Folie	Berechnet aus der Silofläche unter der Annahme von 0,1375 kg/m ² ⁵	kg	„Polyethylen, HDPE, Granulat“ und „Extrusion Plastikfolie“
Treibstoffbedarf Beschickung	Daten in Interviews erhoben	kg	„Diesel in Baumaschine“, adaptiert
Betrieb: Prozessparameter Vergärung			
Biogasmenge	Daten in Interviews erhoben und aus vorigen Daten berechnet	Nm ³	<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Zusammensetzung Biogas	Daten in Interviews erhoben für CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, O ₂	%	<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Betrieb: Prozessparameter Vergasung			
Produktgasmenge	Daten in Interviews erhoben		<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Zusammensetzung Produktgas	Daten in Interviews erhoben für H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , N ₂		<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Verbrauch Hydrauliköl	Daten in Interviews erhoben	kg	„Schmieröl“
Verbrauch Katalysator	Daten in Interviews erhoben	kg	„Zink für Verzinkung, ab Lager“
Verbrauch N ₂	Daten in Interviews erhoben	kg	„Stickstoff, flüssig, ab Werk“
Verbrauch Olivin	Daten in Interviews erhoben	kg	„Quarzsand, ab Werk“
Verbrauch Kalkstein	Daten in Interviews erhoben	kg	„Kalk, gebrannt, gemahlen, lose, ab Werk“
Stromerzeugung			
El. Leistung	Daten in Interviews erhoben	kWh _{el}	inkludiert in Infrastruktur
Verbrauch Motoröl	Daten in Interviews erhoben oder berechnet, siehe 3.2.3	kg	„Schmieröl“
Verbrauch Zündöl	Daten in Interviews erhoben	kg	„Diesel“
Jährlich produzierte Strommenge	Daten in Interviews erhoben (oder durch die Vollaststunden und el. Leistung berechnet)	kWh _{el}	<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Jährlich eingespeiste Strommenge	berechnet (produzierte Strommenge minus el. Eigenbedarf)	kWh _{el}	<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
NO _x (als NO ₂) aus der Verbrennung	Daten in Interviews erhoben oder nach 3.2.3 bzw. 3.2.4 berechnet	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
NM VOC aus der Verbrennung	Daten in Interviews erhoben oder nach 3.2.3 bzw. 3.2.4 berechnet	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
CO aus Verbrennung	Daten in Interviews erhoben oder nach 3.2.3 bzw. 3.2.4 berechnet	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
CH ₄ aus Verbrennung	Daten in Interviews erhoben oder nach 3.2.3 bzw. 3.2.4 berechnet	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
SO ₂ aus Verbrennung	nach 3.2.3 bzw. 3.2.4 berechnet	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
Staub aus Verbrennung	Daten in Interviews erhoben oder nach 3.2.4 berechnet	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet

⁴ Handler und Rathbauer 2005; Resch 2006⁵ Das Gewicht der Silofolie beträgt 0,1375 kg/m² Silofläche (incl. 10 % Verlust) (Raiffeisen Lagerhaus Aschbach, 2006)

Tabelle 10 (Fortsetzung)

Inputparameter	Quelle / Berechnung	Einheit a ⁻¹	Anmerkung / Verknüpfung zum Ecoinvent-Datensatz
Asche-Entsorgung			
Aschemenge in Deponie	Daten in Interviews erhoben	kg	„Entsorgung, Holzasche gemischt, rein, 0% Wasser in Deponie“
Aschemenge auf Feld	Daten in Interviews erhoben	kg	„Entsorgung, Holzasche gemischt, rein, 0% Wasser auf Feld“
Transport Traktor	Daten in Interviews erhoben (Transportdistanz, Beladung)	tkm	„Transport Traktor und Anhänger“
Transport LKW	Daten in Interviews erhoben (Transport- distanz, Beladung)	tkm	„Transport LKW, 16 t oder 32 t“
Gärrest-Endlager			
CH ₄ - Emissionen	berechnet siehe 3.2.5.1	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
NH ₃ – Emissionen	berechnet siehe 3.2.5.1	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
N ₂ O - Emissionen	berechnet siehe 3.2.5.1	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
Ausbringung des Gärrestes			
Menge an Gärrest	Berechnet aus den eingesetzten Rohstoffen abzüglich der produzierten Biogasmenge	m ³	„Gülle ausbringen“
Art des Transportes und der Ausbringung	Daten in Interviews erhoben	tkm	„Transport Traktor und Anhänger“, „Ausbringung Güllefass“
CH ₄ - Emissionen	Berechnet siehe 3.2.5.2	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
NH ₃ – Emissionen	berechnet siehe 3.2.5.2	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
N ₂ O - Emissionen	berechnet siehe 3.2.5.2	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
Infrastruktur			
Baumaterialien, Traktor, Güllefass, Beschickungs- einrichtung, BHKW, Vergaser etc.	Daten in Interviews erhoben und aus Daten über das Anlagendesign berechnet/ abgeschätzt. Eine Lebensdauer der Ökostrom- Anlagen von 13 Jahren wurde angenommen.		Datensätze für Herstellung der Baumaterialien/Maschinen
Referenznutzung NAWAROs (Pflanzenproduktion)			
Fläche Brache	Annahme: 20% der im Biogassystem eingesetzten Fläche	ha	„Mulchen“
Fläche Kulturarten	Annahme: 80% der im Biogassystem eingesetzten Flächen mit jeweils der gleichen Kulturart	ha	Kombination „landwirtschaftlicher Arbeits- prozesse“ nach Tabelle 11
Synthetischer N-Dünger	Berechnung: für jeweilige Kulturart notwendige N-Düngung abzüglich N im Wirtschaftsdünger	kg	„Calcium Ammonium Nitrat, als N“ „Ausbringung synthetischer N-Dünger“

Tabelle 10 (Fortsetzung)

Inputparameter	Quelle / Berechnung	Einheit a ⁻¹	Anmerkung / Verknüpfung zum Ecoinvent-Datensatz
Referenznutzung NAWAROs (Hackschnitzelproduktion)			
Energieholz	Annahme: 50% blieben ungenutzt, 50% waldbauliche Maßnahmen	Srm	Kombination aus Ecoinvent-Datensätzen siehe 3.2.2
Schlagrücklass	Natürliche Oxidation (CO ₂ -neutral durch natürlichen C-Kreislauf)	Srm	
Rundholz	Industrielle Nutzung	Srm	Kombination aus Ecoinvent-Datensätzen siehe 3.2.2
Referenznutzung Wirtschaftsdünger			
Menge an Wirtschaftsdünger	Daten in Interviews erhoben	m ³	„Gülle ausbringen“
Eigenschaften Wirtschaftsdünger	Daten in Interviews erhoben (TS, oTS, TKN, TAN, pH, etc.)		<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Art des Transportes und der Ausbringung	Daten in Interviews erhoben	tkm	„Transport Traktor und Anhänger“
CH ₄ - Emissionen	berechnet siehe 3.2.5.3	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
NH ₃ – Emissionen	berechnet siehe 3.2.5.3	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
N ₂ O - Emissionen	berechnet siehe 3.2.5.3	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
Referenznutzung organische Reststoffe			
Menge organ. Reststoffe	Daten in Interviews erhoben	t	„Mist laden und ausbringen, mit Mistkran und Miststreuer“
Eigenschaften organ. Reststoffe	Daten in Interviews erhoben bzw. aus Literatur (TS, oTS, TKN)		<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
CH ₄ - Emissionen	berechnet siehe 3.2.7	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
NH ₃ – Emissionen	berechnet siehe 3.2.7	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
N ₂ O - Emissionen	berechnet siehe 3.2.7	kg	Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet
Gutschrift Wärmenutzung			
therm. Leistung	Daten in Interviews erhoben	kW	<i>für weitere Berechnungen benötigt</i>
Jährlich produzierte Wärmemenge	Daten in Interviews erhoben	kWh	„österr. Wärmemix 2005“ siehe 3.2.8
Gutschrift Dünger			
Menge an N	Berechnung: N im Gärrest abzüglich (N in Wirtschaftsdüngern d. Referenznutzung plus N in kompostierten, organischen Reststoffen der Referenznutzung)	kg	„Calcium Ammonium Nitrat, als N“ „Ausbringung synthetischer N-Dünger“
NH ₃ -Emissionen	Berechnung: 2% TKN ⁶	kg	<i>Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet</i>
N ₂ O-Emissionen	Berechnung: 0,0125 kg N ₂ O-N/kg N ⁷	kg	<i>Ergebnis wird direkt in der Sachbilanz verwendet</i>

⁶ SHL 2010⁷ UBA 2009

3.2.1. Pflanzenproduktion

Die Sachbilanzdaten der verschiedenen, für die Pflanzenproduktion notwendigen Arbeitsprozesse, wurden der Ecoinvent-Datenbank entnommen. Dort besteht jeder Arbeitsprozess aus Vorarbeiten am Hof, der Fahrt zum Feld, der Feldarbeit auf einer Fläche von 1 ha, der Fahrt zum Hof und Abschlussarbeiten. Dieser Ansatz wurde der reinen Bestimmung des Treibstoffverbrauchs und daraus resultierenden Emissionsberechnungen vorgezogen, da nach einer Studie von Rinaldi und Stadler 2002 das Abgasverhalten von Dieselmotoren vom Betriebspunkt, das heißt von Drehzahl und Belastung abhängt. Diese beiden Größen jedoch ändern sich bei der praktischen Arbeit dauernd, sodass eine bestimmte Arbeit mit einem sogenannten Lastkollektiv oder Lastspektrum gekennzeichnet werden muss. Das Lastspektrum ist eine mathematische Matrix, die angibt, wie lange der Motor während einer beobachteten Arbeit in einem bestimmten Lastpunkt gelaufen ist (Abbildung 20a). Für die Berechnung der Emissionen für die Sachbilanzdaten in Ecoinvent werden nun diese Lastspektre der unterschiedlichen Arbeitsprozesse mit Emissionsmodellen für HC, CO und NO_x-Emissionen (Abbildung 20b) kombiniert.

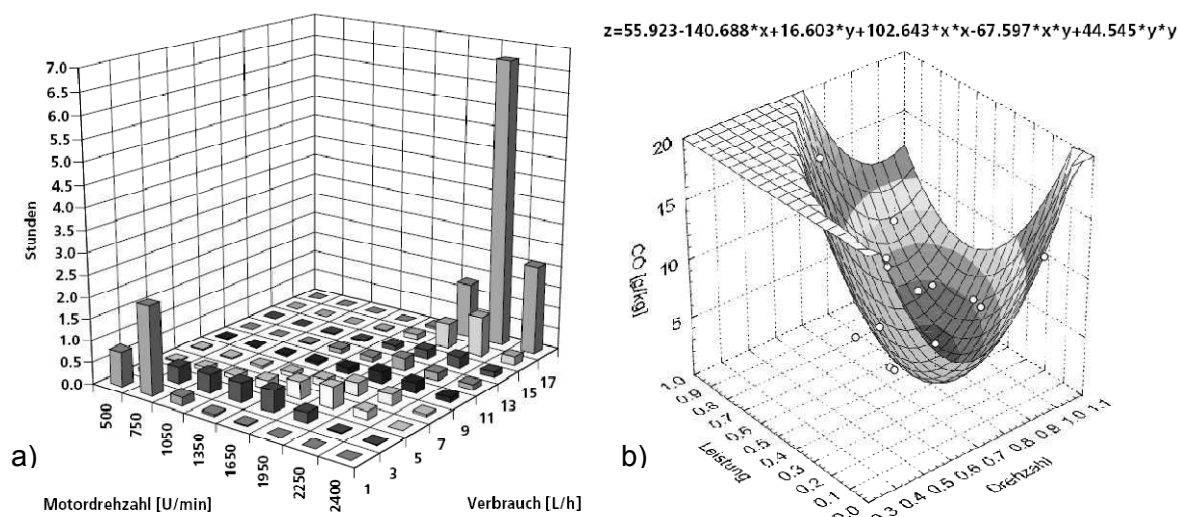


Abbildung 20: a) Lastspektrum beim Arbeiten mit der Kreiselegge; b) Emissionsmodell für CO- (Kohlenmonoxid) Emissionen in Abhängigkeit von Leistung und Drehzahl (beides aus Rinaldi und Stadler 2002).

Weitere berücksichtigte Inputs/Emissionen sind Infrastruktur (landwirtschaftliche Maschinen), Treibstoffverbrauch und davon abhängig CO₂-, SO₂-, Pb-, CH₄-, C₂H₆-, PM_{2,5}-, Cd-, Cr-, Cu-, N₂O-, Ni-, Zn-, Benzo(a)pyren-, NH₃-, Se-, PAH- Emissionen, sowie Bodenemissionen durch den Reifenabrieb (Nemecek und Kägi 2007).

Die Anzahl und Art der notwendigen Arbeitsprozesse zur Kultivierung der verschiedenen verwendeten nachwachsenden Rohstoffe in Österreich wurde von Greimel et al. 2002 ermittelt.

Die Arbeitsprozesse aus dieser Arbeit wurden mit den in der Ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent 2007) vorhandenen Prozessen abgeglichen. Der Saatgutbedarf pro Hektar wurde aus Daten der Ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent 2007) berechnet. Für die Berechnung der Sachbilanz wurden die in der folgenden Tabelle wiedergegebenen Arbeitsschritte angenommen:

Tabelle 11: Anzahl und Art der Arbeitsprozesse für die Kultivierung der nachwachsenden Rohstoffe

Anzahl der Arbeitsgänge pro Jahr	Pflügen	Kreislege	Säen	Pflanzenschutz	Hacken	Drusch	Häckseln	Grubbern	Mähen	Schwaden/Zettwenden	Ballen pressen	Ballen laden	Anzahl Arbeitsgänge	Minimalertrag [t ha ⁻¹]	Maximalertrag [t ha ⁻¹]	Saatgutbedarf [kg ha ⁻¹]
Silomais und Grünmais	1	2	1	1			1	1					7	40	55	27
Silomais und Grünmais, Minimalbb.		1	1	1			1						4	30	55	27
CCM und Körnermais	1	1	1	1	1	1							6	11,4	15,3	27
CCM und Körnermais, Minimalbb.		1	1	1	1	1							5	9,2	15,3	27
Getreide GPS	1	2	1	1			1	1					7	30	40	166
Weizen GPS, Minimalbb.	1	1	1				1						4	24	40	166
Weizen, Korn, Minimalbb.	1	2	1		1	1		1					7	4	7,5	166
Grünschnittroggen	1	2	1	1			1	1					7	30	40	140
Grünschnittroggen, Minimalbb.	1	1	1				1						4	24	40	140
Wintergerste, Minimalbb.	1		1	1			1						4	24	32	
Raps	1	1	1	1			1	1					6	23,6	27,5	4
Sonnenblume	1	3	1	1			1	1					8	30	50	4
Gras-/Kleesilage (3 Schnitte), Ladew.		2	1						3	3			9	23,1	28,3	-
Gras-/Kleesilage (4 Schnitte), Ladew.		2	1						4	4			11	25,7	30,8	-
Gras-/Kleesilage (3 Schnitte), Ballenpr.		2	1						3	3	3	3	15	23,1	28,3	-
Landsbergergemenge		2	1						3	3			9	15	20	73

Minimalbb. Minimalbodenbearbeitung; Ladew. Ladewagen; Ballenpr. Ballenpresse

Aus denen in der Sachbilanz zur Pflanzenproduktion zusammengetragenen Daten wurden für die ausgewählten Kulturarten Wirkungsabschätzungsergebnisse berechnet. Da die Unterschiede zwischen den verschiedenen Kulturarten für alle Wirkungskategorien tendenziell gleich sind, wird in Abbildung 21 beispielhaft der Verbrauch abiotischer Ressourcen für alle verwendeten Kulturarten dargestellt. Allgemein benötigt die Produktion von Mais- und Gras-/Kleegrassilage den kleinsten Input an abiotischen Ressourcen pro Tonne organischer Trockenmasse (0,30 bzw. 0,22 kg Sb-eq. (t OTS)⁻¹), wohingegen Roggen und Raps die höchsten Inputs benötigen (1,91 bzw. 1,67 kg Sb-eq. (t OTS)⁻¹) siehe Abbildung 21. Wird im Vergleich zum konventionellen Anbau nur eine Minimale Bodenbearbeitung durchgeführt, reduziert dies die Emissionen sowie Inputs um ca. 20% gegenüber dem konventionellen Anbau (pro t OTS) obwohl es dabei zu geringeren Erträgen kommt.

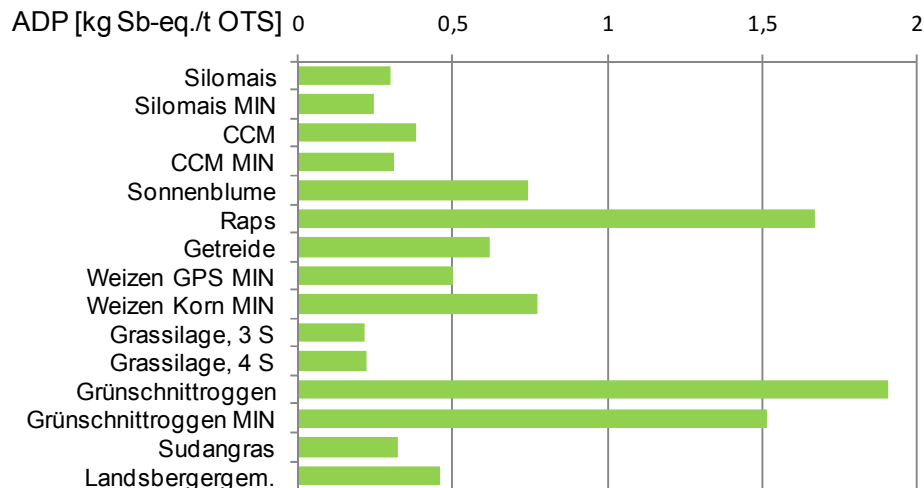


Abbildung 21: „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ für die Produktion von 1 t OTS verschiedener, in Biogasanlagen verwendeter, Kulturarten (MIN ... Minimalbodenbearbeitung).

3.2.2. Hackschnitzelproduktion

Die Sachbilanzdaten für die Hackschnitzelproduktion wurden mit Hilfe von Ecoinvent-Datensätzen sowie Literaturdaten zu Treibstoffverbrauch, Produktivität, Maschineneinsatz sowie Maschinenarbeitszeit erstellt. Dabei wurden unterschiedliche Bereitstellungsketten angenommen, welche in Tabelle 13 beschrieben und charakterisiert sind. Bei Holzsortimenten für die Hackschnitzelproduktion kann zwischen Energieholz, welches speziell für die thermische Verwertung z. B. bei der Erstdurchforstung in Nadel- und Laubholzbeständen sowie bei waldbaulichen Maßnahmen in Niederwäldern geerntet wird, Schlagrücklass, welcher ansonsten im Wald verbleiben würde (z.B. Wipfel, Äste, unverkäufliche Sortimente und Baumarten), sowie Rundholz unterschieden werden (Riezinger 2008). Weiters wird die Hackschnitzelproduktion in die Teilschritte Fällen, Rücken, Hacken und Transport untergliedert, welche jeweils durch unterschiedliche Verfahren und Maschinen bewerkstelligt werden können. Für die Betrachtung in dieser Arbeit wurden folgende, in Tabelle 12 dargestellte Arbeitsprozesse ausgewählt.

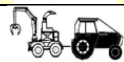
Tabelle 12: Arbeitsprozesse bei der Hackschnitzelproduktion

Teilschritt	Optionen			
Fällen	Motorsäge		Harvester	
Rücken	Seilwinde		Forwarder	
Hacken	Anhängehacker		Großhacker	
Transport	Traktor und Anhänger		LKW	

Aus der Vielzahl der möglichen Kombinationen wurden für die Berechnung der Sachbilanzdaten in dieser Arbeit die in Tabelle 13 dargestellten Bereitstellungsketten ausgewählt. Für Aufwände/Emissionen, die durch den Waldbau bis zur Holzernte entstehen (z.B. Bestandesgründung, Kulturpflege, Läuterung etc.), für das Motorsägen und Hacken wurde der passende Ecoinvent-Datensatz (Werner et al. 2007) verwendet. Für Rücken mit

Seilschlepper, Fällen mit Harvester sowie Rücken mit Forwarder wurden mit Hilfe der Literaturdaten und den Ecoinvent-Datensätzen „Diesel, verbrannt in Baumaschine“, „landwirtschaftl. Maschine“ sowie „Maschine schwer“ eigene Sachbilanzdaten erstellt.

Tabelle 13: Charakterisierung der verschiedenen Bereitstellungsketten zur Hackschnitzelproduktion

	Verbrauch [L/PSH ₁₅]	Produktivität [Srm/PSH ₁₅]	Masse [kg]	Lebensdauer [h]	Verbrauch [L/Srm]	Verbrauch [MJ/Srm]	Maschinen- einsatz [kg/Srm]	Maschinen- arbeitszeit [h]
motormanuell, Energieholz: Fällen  Rücken  Hacken 								
Fällen	1,25 ¹	1,43 ²	7 ¹	2500 ¹	0,88	32,83	0,000281	0,7014
Rücken	5,00 ³	4,72 ⁴	3000 ¹	7000 ¹	1,06	39,67	0,09	
Hacken	35,00 ³	49,82 ⁵	24000 ¹	10000 ¹	0,70	26,31	0,05	
vollmechanisiert, Energieholz: Fällen  Rücken  Hacken 								
Fällen	12,00 ³	11,08 ⁶	15300 ⁷	8000 ⁷	1,08	40,56	0,17	
Rücken	10,00 ³	22,85 ⁸	11560 ⁷	8000 ⁷	0,44	16,39	0,06	
Hacken	35,00 ³	60,30 ⁵	24000 ¹	10000 ¹	0,58	21,74	0,04	
motormanuell, Schlagrücklass: Hacken 								
Hacken	35,00 ³	49,82 ⁵	24000 ¹	10000 ¹	0,70	26,31	0,05	
vollmechanisiert, Schlagrücklass: Rücken  Hacken 								
Rücken	10,00 ³	9,49 ⁸	11560 ⁷	8000 ⁷	1,05	39,46	0,15	
Hacken	35,00 ³	49,82 ⁵	24000 ¹	10000 ¹	0,70	26,31	0,05	
motormanuell, Rundholz: Fällen  Rücken 								
Fällen	1,25 ¹	9,90 ²	7 ¹	2500 ¹	0,13	4,73	0,000040	0,1010
Rücken	5,00 ³	20,27 ⁴	3000 ¹	7000 ¹	0,25	9,24	0,02	
vollmechanisiert, Rundholz: Fällen  Rücken 								
Fällen	12,00 ³	54,76 ⁶	15300 ⁷	8000 ⁷	0,22	8,21	0,03	
Rücken	10,00 ³	46,30 ⁸	11560 ⁷	8000 ⁷	0,22	8,09	0,03	
Hacken am Lagerplatz: Hacken 								
Hacken	35,00 ³	109,10 ⁵	24000 ¹	10000 ¹	0,32	12,01	0,02	

¹ Werner et al. 2007 ² Stampfer 2002 ³ Riezinger 2008 ⁴ Stampfer et al. 2003

⁵ Stampfer et al. 1997 ⁶ Stampfer 2001 ⁷ Knechtle 1997 ⁸ Affenzeller 2005

Die Wirkungsabschätzungs - Ergebnisse der in der Sachbilanz zur Hackschnitzelproduktion zusammengetragenen Daten für die ausgewählten Bereitstellungsketten sind in Tabelle 14 bis Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 14: Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse der Bereitstellungsketten motormanuell Energieholz sowie vollmechanisiert Energieholz für alle Wirkungskategorien pro Srm.

Wirkungs-kategorie	Einheit	Motor-manuell, EH	WB [%]	F [%]	R [%]	H [%]	Voll-mechanisiert, EH	WB [%]	F [%]	R [%]	H [%]
ADP	kg Sb.-Eq	0,074	6,5	32,2	37,2	24,0	0,061	8,0	44,8	17,9	29,3
GWP	kg CO ₂ -Eq	11,143	6,3	35,2	35,6	22,9	8,816	7,9	45,1	18,1	28,9
AP	kg SO ₂ -Eq	0,086	5,4	22,8	43,5	28,4	0,081	5,7	45,9	18,5	29,9
EP	kg PO ₄ -Eq	0,021	3,9	46,4	30,0	19,8	0,014	5,9	45,9	18,5	29,7
POCP	kg C ₂ H ₄ -Eq	0,005	8,3	66,7	15,2	9,8	0,002	20,8	39,1	15,5	24,6
ODP	kg CFC-11-Eq	1,35 E-6	6,6	32,7	37,0	23,7	1,08 E-6	8,2	44,4	17,8	29,6
LUC	m ² a ⁻¹	5,448	71,9	27,3	0,5	0,3	3,964	98,8	0,6	0,2	0,5
FAETP	kg 1,4-DCB-Eq	1,183	3,6	68,7	14,0	13,7	0,508	8,5	43,5	16,2	31,8
HTP	kg 1,4-DCB-Eq	6,342	4,0	20,1	47,3	28,5	5,652	4,5	45,4	18,1	32,0
MAETP	kg 1,4-DCB-Eq	1646,828	7,4	30,1	38,1	24,4	1373,126	8,8	44,7	17,2	29,3
TAETP	kg 1,4-DCB-Eq	0,059	4,2	76,8	10,5	8,4	0,019	12,8	44,6	16,9	25,7

EH ... Energieholz; WB ... Waldbau; F ... Fällen; R ... Rücken; H ... Hacken

Tabelle 15: Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse der Bereitstellungsketten motormanuell Schlagrücklass sowie vollmechanisiert Schlagrücklass für alle Wirkungskategorien pro Srm.

Wirkungs-kategorie	Einheit	Motor-manuell, SR	WB [%]	F [%]	R [%]	H [%]	Voll-mechanisiert, SR	WB [%]	F [%]	R [%]	H [%]
ADP	kg Sb.-Eq	0,018	0	0,0	0,0	100,0	0,044	0,0	0,0	59,5	40,5
GWP	kg CO ₂ -Eq	2,548	0,0	0,0	0,0	100,0	6,380	0,0	0,0	60,1	39,9
AP	kg SO ₂ -Eq	0,024	0,0	0,0	0,0	100,0	0,061	0,0	0,0	59,8	40,2
EP	kg PO ₄ -Eq	0,004	0,0	0,0	0,0	100,0	0,010	0,0	0,0	60,0	40,0
POCP	kg C ₂ H ₄ -Eq	0,001	0,0	0,0	0,0	100,0	0,001	0,0	0,0	60,2	39,8
ODP	kg CFC-11-Eq	3,21 E-7	0,0	0,0	0,0	100,0	7,87 E-7	0,0	0,0	59,2	40,8
LUC	m ² a ⁻¹	0,018	0,0	0,0	0,0	100,0	0,039	0,0	0,0	53,0	47,0
FAETP	kg 1,4-DCB-Eq	0,162	0,0	0,0	0,0	100,0	0,360	0,0	0,0	55,1	44,9
HTP	kg 1,4-DCB-Eq	1,810	0,0	0,0	0,0	100,0	4,275	0,0	0,0	57,7	42,3
MAETP	kg 1,4-DCB-Eq	401,738	0,0	0,0	0,0	100,0	971,789	0,0	0,0	58,7	41,3
TAETP	kg 1,4-DCB-Eq	0,005	0,0	0,0	0,0	100,0	0,013	0,0	0,0	61,3	38,7

SR ... Schlagrücklass; WB ... Waldbau; F ... Fällen; R ... Rücken; H ... Hacken

Tabelle 16: Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse der Bereitstellungsketten motormanuell Rundholz sowie vollmechanisiert Rundholz für alle Wirkungskategorien pro Srm.

Wirkungs-kategorie	Einheit	Motor-manuell, RH	WB [%]	F [%]	R [%]	H [%]	Voll-mechanisiert, RH	WB [%]	F [%]	R [%]	H [%]
ADP	kg Sb.-Eq	0,023	21,2	15,1	28,1	35,6	0,024	20,4	23,1	22,4	34,1
GWP	kg CO ₂ -Eq	3,351	20,8	16,9	27,6	34,7	3,451	20,2	23,3	22,8	33,7
AP	kg SO ₂ -Eq	0,027	16,9	10,3	31,9	40,8	0,031	15,0	24,6	24,2	36,2
EP	kg PO ₄ -Eq	0,005	14,7	25,1	26,2	33,9	0,005	15,5	24,5	24,1	35,8
POCP	kg C ₂ H ₄ -Eq	0,001	31,9	37,1	13,7	17,3	0,001	43,7	16,6	16,1	23,6
ODP	kg CFC-11-Eq	4,16 E-7	21,3	15,3	28,1	35,3	4,28 E-7	20,7	22,7	22,3	34,3
LUC	m ² a ⁻¹	4,144	94,5	5,2	0,2	0,2	3,932	99,6	0,1	0,1	0,2
FAETP	kg 1,4-DCB-Eq	0,272	15,8	42,9	14,2	27,1	0,202	21,3	22,1	20,1	36,5
HTP	kg 1,4-DCB-Eq	1,963	12,9	9,4	35,6	42,1	2,104	12,1	24,7	24,0	39,3
MAETP	kg 1,4-DCB-Eq	522,305	23,2	13,7	28,0	35,1	545,655	22,2	22,7	21,4	33,6
TAETP	kg 1,4-DCB-Eq	0,013	19,4	51,3	11,4	17,9	0,008	30,4	21,5	20,0	28,1

RH ... Rundholz; WB ... Waldbau; F ... Fällen; R ... Rücken; H ... Hacken

3.2.3. Gas- bzw. Zündstrahlmotoren

Verbrauch Motorenöl Gas-Motoren

Der Verbrauch an Motoröl eines Blockheizkraftwerkes lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$\text{Ölbedarf} = \frac{h_{B,BHKW}}{h_{\text{Ö}}} \times (V_{\text{Ö,W}} + V_{\text{Ö,V}}) \quad [\text{L/a}] \quad (47)$$

$h_{B,BHKW}$...Betriebsstunden BHKW [h/a] $h_{\text{Ö}}$...Ölstandszeiten [h]

$V_{\text{Ö,W}}$...Ölwechselmenge je Ölwechsel [L] $V_{\text{Ö,V}}$...Ölverbrauch je Ölwechsel [L]

Emissionen aus Gas- bzw. Zündstrahlmotoren allgemein

Bei der Verbrennung von Biogas in Gas- bzw. Zündstrahlmotoren entstehen als Hauptemissionen CO_2 , CO , CH_4 , NMVOC, NO_x und SO_2 .

Das direkt aus der Verbrennung des Biogases stammende CO_2 wird als klimaneutral angesehen und daher nicht bilanziert. Für den biogenen Kohlenstoff wird angenommen, dass die Bilanz der Netto- CO_2 -Fixierung durch die Photosynthese, die Kohlenstoffspeicherung und die Verbrennung der Biomasse Null ist. Diese Annahme entspricht den vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC) erstellten Richtlinien für Energiewirtschaft.

CO ist ein Atemgift mit einer hohen Affinität zum Hämoglobin im Blut. Es vermindert den Sauerstofftransport und kann bei hohen Konzentrationen zum Tod durch Erstickten führen. Außerdem ist es klimawirksam und trägt in gewissem Umfang zur Bildung von bodennahem Ozon bei.

CH_4 ist ein klimarelevantes Gas (CO_2 -Äquivalent = 23), weiters trägt es geringfügig zur Bildung erhöhter bodennaher Ozonkonzentrationen im Sommer bei.

NMVOC (Non-Methane Volatile Organic Compounds) sind eine Stoffgruppe mit vielfältigen Wirkungen. Vor allem tragen NMVOC gemeinsam mit NO_x zur Bildung erhöhter bodennaher Ozonkonzentrationen im Sommer bei.

NO_2 ist ein ausgeprägtes Atem- und Reizgift (humantoxische Wirkung). Weiters spielen Stickoxide eine wesentliche Rolle bei Versauerungs- und Eutrophierungsvorgängen im Boden und als Vorläufersubstanz für bodennahes Ozon.

SO_2 schädigt in hohen Konzentrationen Menschen, Tiere und Pflanzen. Die Oxidationsprodukte führen zu „Saurem Regen“, der empfindliche Ökosysteme wie Wald und Seen gefährdet sowie Gebäude und Materialien angreift (Versauerung). Weiters trägt Schwefeldioxid zur Smogbildung bei.

Die bei der Biogasnutzung in einem Verbrennungsmotor auftretenden Emissionen sind abhängig von den Energieträgern (Biogasinhaltsstoffen und Zündölanteil), der gewählten Motorentechnik (z.B. Zündstrahlmotor, Gas-Ottomotor), der Abstimmung der Motoren auf zum Teil wechselnde Gasqualitäten und vom Wartungszustand der Motoren (BayLfU 2004).

Die Verbrennung ist eine schnell ablaufende Oxidation der Kohlenwasserstoffe, aus denen der Brennstoff besteht. Für die vollständige Oxidation ist eine gewisse Menge an Sauerstoff erforderlich, welche stöchiometrischer Sauerstoffbedarf genannt wird. Die Luftüberschuss-

zahl (Luftzahl, Luftverhältniszahl, λ) beschreibt das Verhältnis der tatsächlich zugeführten Luftmenge zum stöchiometrischen Sauerstoffbedarf. Die CO-, Kohlenwasserstoff(HC)- sowie die NO_x-Emissionen sind von der Luftüberschusszahl abhängig. Wie in Abbildung 22 dargestellt, sind die CO- und HC-Emissionen bei $\lambda=1$ recht hoch und nehmen für steigende λ -Werte zunächst stark ab, steigen für $\lambda>1,6$ jedoch wieder an. Die NO_x-Emissionen hingegen haben bei $\lambda=1$ einen hohen Wert, erreichen bei $\lambda=1,15$ ihr Maximum und nehmen dann rapide ab. Um die Emissionen aller drei Schadstoffe zu minimieren, ist es am sinnvollsten, die Verbrennung in einem Bereich zwischen $\lambda=1,5$ und $1,6$ ablaufen zu lassen (auch wenn sich der maximale Wirkungsgrad bereits bei einer Luftüberschusszahl von ca. 1,3 befindet). Man spricht dann von einer Magermischverbrennung bzw. von einem Magermotor (LfU, 2001).

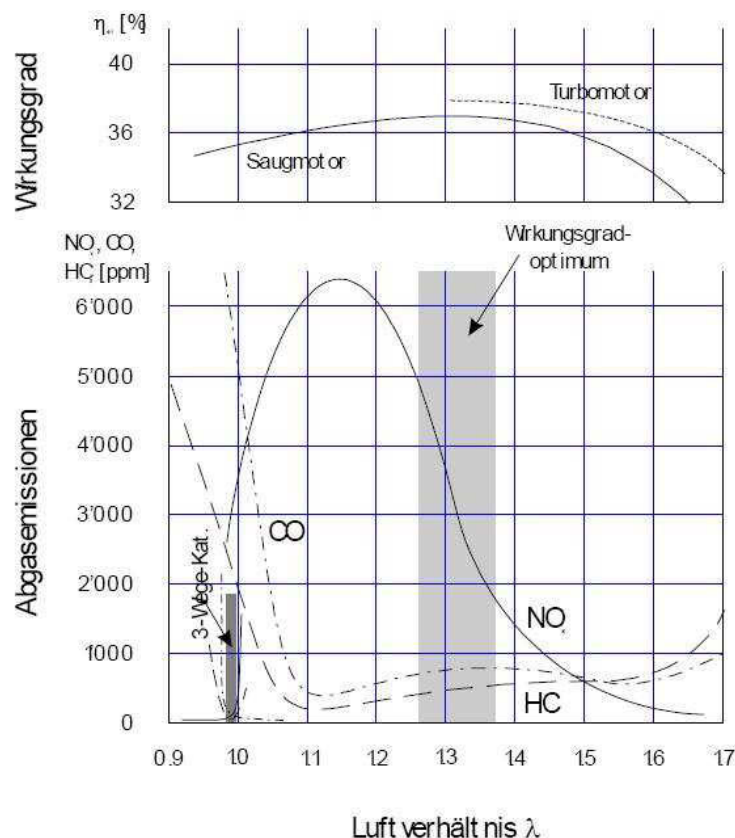


Abbildung 22: Abhängigkeit der CO-, Kohlenwasserstoff (HC)- und NO_x-Emissionen vom Luftverhältnis (λ) bei Verbrennungsmotoren. (Heck 2007)

Die Abschätzung der Emissionen aus Gas- bzw. Zündstrahlmotoren gestaltet sich schwierig, da Emissionsmesswerte zum üblichen Praxisbetrieb von Biogas-Verbrennungsmotoren (insbesondere kleinerer Leistungsklassen) nur vereinzelt bzw. unzureichend vorliegen und kontinuierliche Messaufzeichnungen über das Dauer-Emissionsverhalten von Biogas-BHKWs bislang nicht vorliegen (Zell 2002).

Eine Studie des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (BayLfU 2006) zeigte, dass die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten nur durch auf den aktuellen Methangehalt abgestimmte Motoren sowie über regelmäßige Motorwartung und gleichzeitige Emissionsmessung (NO_x, CO) bei der Motoreinstellung gewährleistet werden kann. Bei der regelmäßigen Motorwartung sollten z.B. Zündkerzen, Ventilspiel, Luftfilter, Motorenöl und der Zustand der Lambdasonde geprüft werden.

Für die Berechnung der Sachbilanzdaten konnten nun bei einigen Anlagen Messwerte verwendet werden, für Anlagen mit Gasmotoren, für die keine Messwerte vorlagen, wurden CO-, NO_x-, CH₄-, NMVOC- sowie SO₂-Emissionen wie in den folgenden Absätzen beschrieben berechnet.

CO- und NO_x-Emissionen

Die emittierten Mengen an NO_x und CO sind Funktion der Luftüberschusszahl λ (siehe Abbildung 22) sowie auch des Methan-Gehaltes im Biogas (Zell 2002).

Zur Berechnung der CO- bzw. NO_x-Emissionen wurden Polynome in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration im Abgas verwendet. Die Polynome wurden hergeleitet aus Messdaten von Abgasmessungen von Biogas BHKWs aus unveröffentlichten Arbeiten von Laaber 2006 bzw. Matt 2006, wobei Jenbacher-, MAN-, Oberndorfer- und Zündstrahlmotoren unterschieden wurden.

Methan-und NMVOC-Emissionen

Methan und NMVOC-Emissionen entstehen durch unvollständige Verbrennung im Motor. Geringere Methangehalte im Biogas führen zu kälterer unvollständiger Verbrennung. Daher können bei sinkenden Methangehalten im Biogas und im Teil- bzw. Schwachlastbetrieb von Gasmotoren erhöhte Gesamt-C- sowie Methanemissionen (sogen. Methanschluß) auftreten (Zell 2002) siehe Abbildung 23.

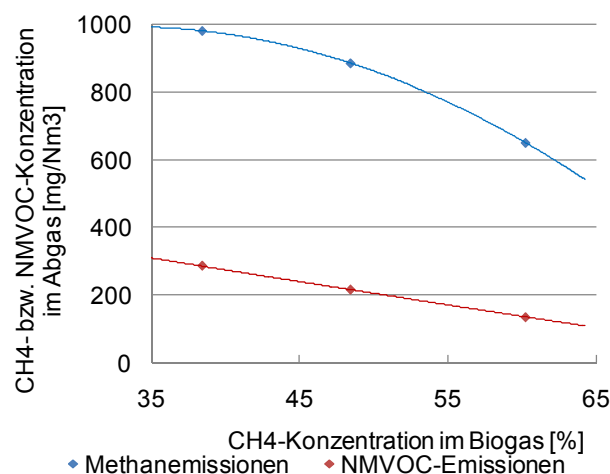


Abbildung 23: CH₄- und NMVOC-Emissionen von Zündstrahl-BHKW in Abhängigkeit von der CH₄-Konzentration im Biogas (eigene Darstellung nach Zell, 2002)

Über die Höhe des Methanschlußes sind in der Literatur unterschiedliche Angaben zu finden. In der bereits zitierten Arbeit von BayLfU 2004 wird von 1000 mg/Nm³ bei neuen Motoren ausgegangen. Nach einer Studie von Woess-Galasch et al. 2007 liegen die Methanemissionen aus dem BHKW zwischen 280 und 2333 mg/Nm³. (1100 mg/Nm³ bei 5 Vol.-% Sauerstoff entsprechen einem Methanschluß von 1,79% bezogen auf die produzierte Methanmenge). In einer Studie der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL 2007) wird von einem Methanschluß von 10-40 g CO₂-eq./kWh_{el} ausgegangen, was ca. 0,25-1% der produzierten Methanmenge entspricht.

Um die Abhängigkeit des Methanschlußes vom Methangehalt im Biogas in die Berechnung mit einzubeziehen, wurde für die vorliegende Arbeit das in Abbildung 23 dargestellte Polynom (nach Zell 2002) für die Ermittlung der Methanemissionen aus dem BHKW

verwendet. Für die betrachteten Anlagen ergibt sich nach dieser Berechnung ein Methanschlupf von 0,4% bis 1,8% der produzierten Biogasmenge.

Zu NMVOC-Emissionen von Gasmotoren existieren kaum Messwerte. Nach Laaber et al. 2007 entstehen jedoch nur geringe Mengen an NMVOC (Mittelwert aus 6 Einzelmessungen: $21 \pm 5 \text{ mg/Nm}^3$). Daher wurde dieser Wert für sämtliche Gasmotoren angenommen.

Aufgrund der Brennstoffeigenschaften von Zündstrahl-Motoren (Eindüsen von längerkettigen Kohlenwasserstoffen) emittieren Zündstrahl-Aggregate wesentlich mehr NMVOC. Die Menge ist ebenfalls vom CH_4 -Gehalt im Biogas abhängig und kann über das in Abbildung 23 dargestellte Polynom berechnet werden.

Schwefeldioxid-Emissionen

Die Emissionen von SO_2 wurden über die H_2S -Konzentrationen im Biogas unter Annahme einer vollständigen Verbrennung im BHKW berechnet: $\text{H}_2\text{S} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

3.2.4. Hackschnitzel-Verbrennung bzw. Vergasung

Nach Bauer 2007 hängt das Emissionsverhalten einerseits von der Verbrennungsqualität und andererseits vom Wirkungsgrad ab. Bei den Emissionen kann man zwischen vollständig und unvollständig oxidierten Verbindungen unterscheiden. Bei den vollständig oxidierten Verbindungen handelt es sich um CO_2 , NO_x und Aschepartikel, welche unvermeidbar bei der Verbrennung entstehen (im Gegensatz zur Verbrennung von Treibstoffen in Motoren wird das bei der Holzverbrennung entstehende NO_x nicht aus dem Luftstickstoff, sondern aus den im Holz vorhandenen organischen Stickstoffverbindungen gebildet). Bei unvollständiger Verbrennung können zusätzlich CO , Kohlenwasserstoffe und unverbrannte Partikel entstehen.

Die Berechnung der Emissionen aus der Hackschnitzel Verbrennung in den Heizkraftwerken gestaltete sich einfacher, da für alle Anlagen Messwerte für CO , NO_x , SO_2 und Staub vorlagen. Beispiele siehe Tabelle 17. Nachdem die in Bauer 2007 für Holzschnitzel-feuerungen angegebenen Emissionen von CH_4 , NMVOC und N_2O sehr gering ausfallen, wurden sie für die vorliegende Arbeit nicht berücksichtigt.

Im Falle einer über einen Multizyklon hinaus weitergehenden Abgasreinigung wurden nach Jungbluth et al. 2002 reduzierte NO_x - und Staub- sowie erhöhte Ammoniakemissionen angenommen (siehe auch Tabelle 17).

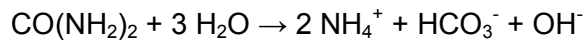
Tabelle 17: Beispiele von Emissionen durch die Hackschnitzel-Verbrennung bzw. Vergasung

	Einh.	Hackschnitzel- Verbrennung, 5MW	Hackschnitzel- Vergasung, (+Motor) 2 MW	Weitergehende Abgasreinigung
Kohlenmonoxid CO	mg/Nm^3	16	95	kein Einfluss
Ammoniak NH_3	mg/Nm^3			17,5
Stickoxide NO_x	mg/Nm^3	108	248	50
Schwefeldioxid SO_2	mg/Nm^3	0	0	kein Einfluss
Staub	mg/Nm^3	4	15	1
O_2	Vol. %	5	9	kein Einfluss

3.2.5. Emissionen durch das Gärrestmanagement

Einer der Hauptemissionsquellen im Biogassystem ist das Gärrestmanagement, welches aus der Lagerung und Ausbringung des Gärrestes besteht. Bei den umweltrelevanten Emissionen handelt es sich dabei um Ammoniak (NH_3), Methan (CH_4) sowie Lachgas (N_2O).

NH_3 entsteht durch den Abbau organischer Stickstoff-Verbindungen in Ammonium.



Je nach pH-Wert und Temperatur steht dieses im chemischen Gleichgewicht mit dem flüchtigen Ammoniak. Ammoniak ist ein hochreaktives, gesundheitsschädliches Gas, welches sich entweder rasch auf Oberflächen (Pflanzen, Boden etc.) niederschlägt und dort reagiert oder in der Luft mit anderen Partikeln Reaktionen eingeht. Mit dem Regen importierte NH_x -Depositionen bewirken eine Überdüngung (Eutrophierung) von naturnahen Ökosystemen, was zu Artensterben führen kann. Da NH_x im Boden oxidiert wird, wirkt es versauernd ($1 \text{H}^+ / \text{NH}_3$, bzw. $2 \text{H}^+ / \text{NH}_4^+$), was zu Waldsterben führen kann (Werner et al., 1999). NH_x trägt nicht nur entscheidend zur Eutrophierung und Versauerung in verschiedenen Gebieten Europas bei, sondern führt auch zu Schäden an Bauwerken und Kulturgütern. Im Boden erhöht es den biologischen Stickstoffumsatz und führt dabei zu erhöhten Emissionen von Lachgas, wodurch Ammoniak auch eine indirekt-klimarelevante Wirkung zugeschrieben wird (IPCC 2006).

CH_4 entsteht durch den anaeroben Abbau von Kohlenstoffverbindungen durch Mikroorganismen (Ziel der Biogasgewinnung durch die anaerobe Vergärung im Fermenter). Eine Restmenge an Methan kann jedoch bei der offenen Lagerung, sowie der Ausbringung der Gärreste entstehen. Methan ist ein klimarelevantes Gas (CO_2 -Äquivalent = 23), weiters trägt es geringfügig zur Bildung erhöhter bodennaher Ozonkonzentrationen im Sommer bei.

Die N_2O -Bildung wird als Leckstrom im Nitrifikations- bzw. Denitrifikationsprozess angesehen. So wird bei ungünstigen Bedingungen für den Substratabbau die Oxidation von Ammonium zu Nitrat (Nitrifikation) bzw. die Reduktion von Nitrat zu molekularem Stickstoff (Denitrifikation) nur unvollständig durchgeführt; in beiden Fällen wird das Zwischenprodukt N_2O freigesetzt (Abbildung 24). Lachgas wirkt stark klimarelevant (CO_2 -Äquivalent = 296).

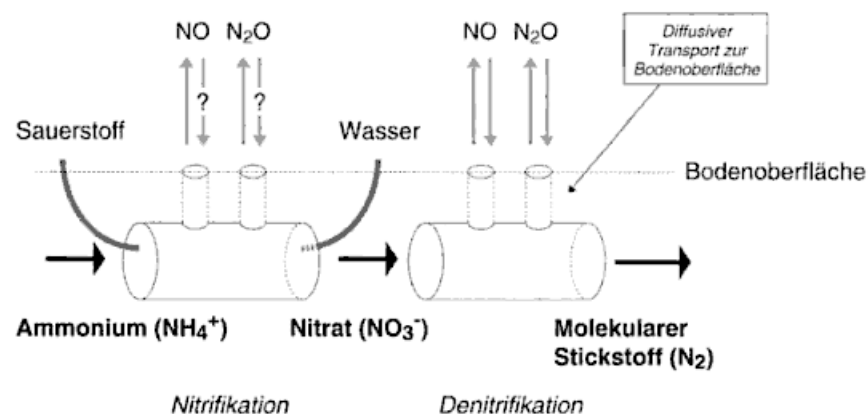


Abbildung 24: Produktion von NO und N_2O durch „Lecks“ in den Prozessen der Nitrifikation und Denitrifikation (Guderian 2000)

Die Entwicklung der in dieser Arbeit verwendeten Berechnungsmethoden für die Methan-, Ammoniak- und Lachgasemissionen durch die Lagerung und Ausbringung des Gärrestes erfolgte im Zuge der Mitarbeit in dem Projekt „ÖkobilanzBiogas“ (Pucker et al. 2010), welches aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „ENERGIE DER ZUKUNFT“ durchgeführt wurde.

3.2.5.1. Emissionen aus der Gärrestlagerung

Methan (CH_4)

Methan entsteht bei der offenen Gärrestlagerung durch den mikrobiologischen Abbau verbleibender organischer Substanzen. Im Vergleich zur Wirtschaftsdüngerlagerung kann man von einer Emissionsminderung ausgehen, da die Gärreste erst dann gelagert werden, wenn die leicht abbaubaren Verbindungen schon abgebaut sind. Bei den vorgängig beheizten Gärresten ist die Lagertemperatur jedoch durchschnittlich höher und sie sind optimal mit anaeroben Bakterien angeimpft, so dass es trotz bereits weiter fortgeschrittenem Abbau noch zu weiteren Methanemissionen kommt.

Für die Berechnung der Methanemissionen aus dem offenen Gärrestlager wird davon ausgegangen, dass die Methanemissionen stark von der hydraulischen Verweilzeit (HRT) sowie von der Raumbelastung im Fermenter abhängig sind (Reinhold 2009). Für die Berechnung der Emissionen wurden Abbaukurven in Abhängigkeit von der hydraulischen Verweilzeit abgeleitet (Abbildung 25).

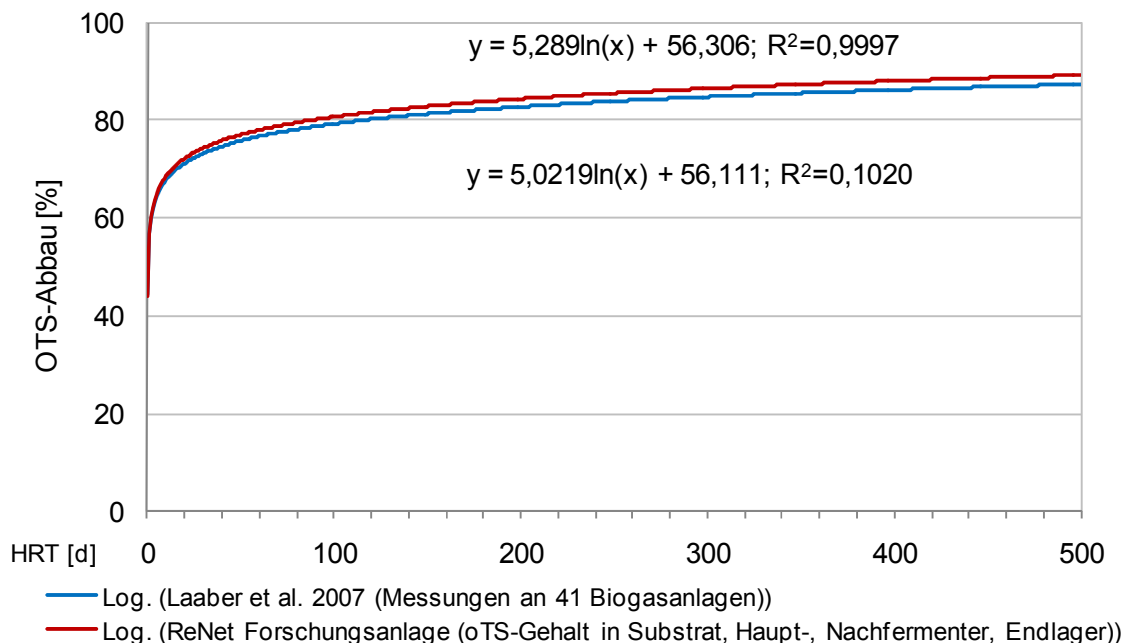


Abbildung 25: oTS-Abbau in zweistufigen Biogasanlagen in Abhängigkeit von HRT

Auf Grund von gesetzlichen Auflagen verfügen Biogasanlagen über eine Speicherkapazität für Biogasgülle von mindestens 180 Tagen. Für die Berechnung der CH_4 -Emissionen wird nur die Lagerung in offenen Endlagern herangezogen. Die Berechnung der im offenen Endlager abgebauten Menge an oTS erfolgt aus den in Abbildung 25 dargestellten Abbaukurven unter Berücksichtigung der Verweildauer im geschlossenen System sowie der Lagerdauer im offenen Endlager.

Bei den betrachteten Biogasanlagen kommt es im offenen Endlager nach diesen Berechnungen zu einem oTS-Abbau von 0,5-3,64% der mit dem Substrat zugeführten organischen Trockensubstanz.

Die Menge an Methan, die sich aus dieser Menge an oTS im offenen Endlager bildet wird über die spezifische Methanausbeute der Biogasanlage ($[\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg oTS}_{\text{zugeführt}}]$) berechnet. Aufgrund der niedrigeren Temperaturen und des Sauerstoffzutritts kommt es im offenen Endlager zu einer geringeren Methanproduktion: Reduktionsfaktor der spezifischen Methanausbeute gegenüber jener im Fermenter: 51% (Mittelwert aus Kaparaju und Rintala 2003 und FNR 2005).

Die so berechneten Methanemissionen der Anlagen liegen zwischen 0,5 und 1,5% der im Fermenter produzierten Methanmenge und damit an der unteren Grenze der in der Literatur verwendeten Werten von 1-15%. (Koch 2009, Vogt 2008)

Für die Berechnung der Methanemissionen aus der Lagerung der unvergorenen Wirtschaftsdünger im Referenzfall wurden die in Tabelle 18 dargestellten Emissionsfaktoren aus der Literatur abgeleitet.

Tabelle 18: Emissionsfaktoren der Methanemissionen bei der Lagerung von unvergorenem Wirtschaftsdünger

Emissionsfaktoren	CH ₄
Wirtschaftsdünger	[g/(m ³ *d)]
Rindergülle	19,10
Schwankungsbreite RG	26%
Schweinegülle	12,96
Schwankungsbreite SG	82%
m ³Volumen, d.....Tag	
Amon et al., 2005; Clemens et al., 2006; Edelmann et al. 2001; Kryvoruchko 2004	

Ammoniak (NH₃)

Ammoniak-Emissionen bei der Gärrest/Wirtschaftsdünger Lagerung sind von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig. Einen Überblick gibt Abbildung 26.

Ammoniak-Emissionen bei der Gärrest/Wirtschaftsdünger-Lagerung können nur an der Oberflächen-Grenzschicht zwischen Gärrest/Wirtschaftsdünger und Umgebungsluft stattfinden. Daher wurden die Emissionen proportional zur Oberfläche der offenen Endlager angesetzt. Die Höhe der Emissionen hängt dabei von mehreren Faktoren ab: Nach dem Henry-Gesetz ist die Konzentration eines Gases in einer Flüssigkeit direkt proportional zum Partialdruck des entsprechenden Gases über der Flüssigkeit. Dieser wiederum wird von Faktoren wie Wind, Temperatur und dem Bestehen einer Schwimmschicht stark beeinflusst.

Über die Höhe der Ammoniakemissionen bei der offenen Lagerung wurden in der Literatur sehr unterschiedliche Werte gefunden (siehe Tabelle 19).

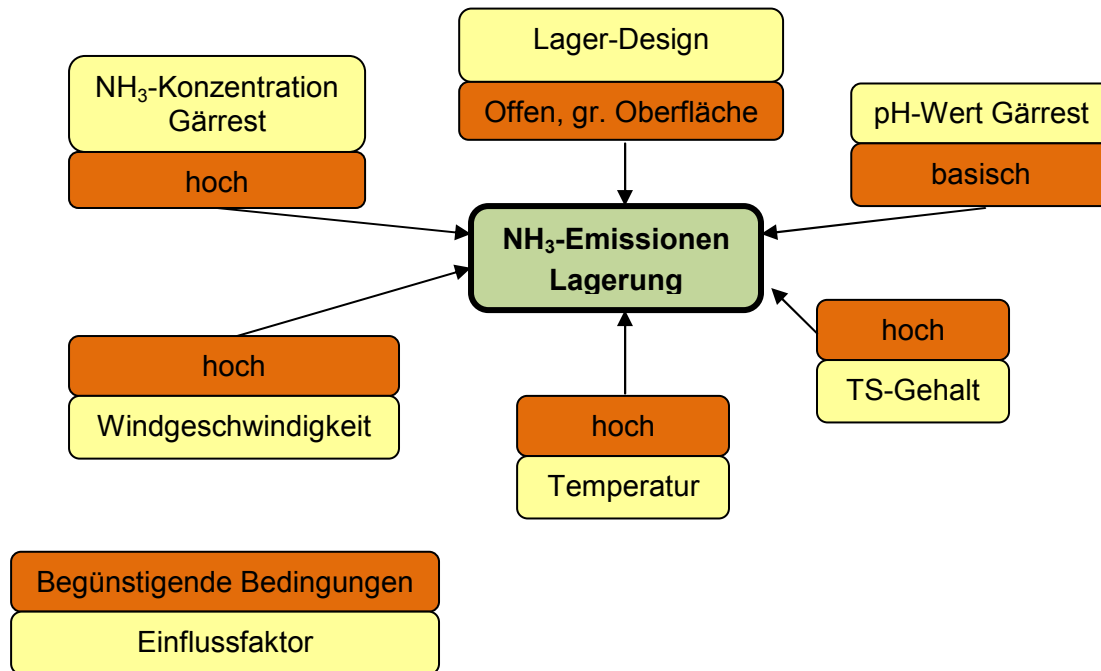


Abbildung 26: Einflussfaktoren auf die Ammoniak-Emissionen während der Gärrest Lagerung (eigene Darstellung nach Amon 2008).

Bei der Biogasproduktion wird mehr organisches Material abgebaut, wobei mehr in den organischen Verbindungen enthaltener Stickstoff frei wird und als Ammonium-Ion in Lösung geht. Weiters steigt der pH-Wert um eine halbe bis eine Einheit, was die Ammoniakkonzentration bei gleichem Ammoniumgehalt bis zu verzehnfachen kann.

Aus den Literaturdaten ist nicht eindeutig abzuleiten, zu wie viel Mehremissionen der leicht höhere Ammoniumgehalt und der spürbar höhere pH-Wert führen.

Jäkel et al. (1999) berichten bei drei Betrieben mit Lagerung ohne Schwimmschicht von einer Emissionszunahme von durchschnittlich 48%.

Nach Ortenblad (2000) kann die Ammoniakverflüchtigung bei der Lagerung von vergorener Gülle um 50% zunehmen, wobei auch hier von einem Anstieg des pH-Werts um 0,5-1 Einheiten berichtet wird.

In Anlehnung an Edelman et al. 2001 wird von Mehremissionen bei der Lagerung von 40% ausgegangen. Tabelle 19 zeigt die für die Berechnung der Ammoniakemissionen aus dem offenen Endlager verwendeten Emissionsfaktoren.

Für eine nicht gas-dichte Abdeckung (z.B.: Stroh) wurde eine Reduktion um 60% angenommen (Kryvoruchko, 2004). Wird der Gärrest vor der Lagerung einer Fest-Flüssig-Trennung unterzogen (z.B.: Pressen/Separation) so werden 20% Mehremissionen angenommen (Hüther and Schuchardt, 1998).

Tabelle 19: Emissionsfaktoren für Ammoniakemissionen bei der Lagerung im offenen Endlager

Emissionsfaktoren	NH ₃
Wirtschaftsdünger/Gärrest	[g/(m ² *d)]
Rindergülle - MW	3,83
Schwankungsbreite RG	93%
Schweinegülle - MW	6,94
Schwankungsbreite SG	93%
Hühnergülle	11,43
Gärrest (1)	5,37
Gärrest (2)	9,71

m²...Oberfläche, d.....Tag

Quellen: Amon et al., 2002; Amon et al., 2005; Clemens et al., 2006; De Bode et al., 1991; Hüther und Schuchardt, 1998; Kryvoruchko, 2004; Sommer, 1997; Wagner-Alt, 2002; Wulf et al., 2005

Lachgas (N₂O)

Lachgas entsteht vor allem unter anoxischen Bedingungen in der Schwimmdecke des Lagertanks bei der Nitrifizierung des Ammoniums bzw. Ammoniaks. Eine weitere Emissionsquelle ist die Denitrifizierung von Nitrat, welches in anaerobe Bereiche der Schwimmdecke zurücksickert (Edelmann et al., 2001, siehe Abbildung 24). Aus der Literatur (Hüther, 1999; Sommer et al., 2000) geht hervor, dass die Lachgasemissionen mit Zunahme der Schwimmdeckendicke äußerst stark ansteigen. Dasselbe gilt für Abdeckung von Gülle mit Blähton und mit Stroh.

Die Biogaserzeugung aus Wirtschaftsdüngern kann einerseits die Lachgasemissionen wesentlich mindern, da der Gärrest homogener als der Wirtschaftsdünger ist, was eine geringere Schwimmdeckenbildung bewirkt. Andererseits kann der erhöhte NH₄-N-Gehalt auch eine Erhöhung der Lachgasemissionen hervorrufen. In einer Untersuchung von Sommer et al. 2000 wurden bei der Lagerung von anaerob behandeltem Flüssigmist um 26 % höhere N₂O-Emissionen im Vergleich zu unbehandeltem Rinderflüssigmist gemessen. Dieser Faktor wurde auch für die Berechnung der Lachgasemissionen aus Gärresten im Vergleich zu unvergorenen Wirtschaftsdüngern für die Berechnung der Sachbilanz verwendet (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20: Emissionsfaktoren für Lachgasemissionen bei der Lagerung

Emissionsfaktoren	N ₂ O
Wirtschaftsdünger/Gärrest	[g/(m ² *d)]
Rindergülle - MW	0,42*
Schwankungsbreite RG	68%
Schweinegülle - MW	0,42*
Schwankungsbreite SG	68%
Hühnergülle	0,42*
Gärrest (1)	0,53
Gärrest (2)	0,53

m²... Oberfläche, d.....Tag

* Mittelwert aus Amon et al., 1998; Amon et al., 2002; Amon et al., 2005; Clemens et al., 2006; Hüther und Schuchardt, 1998; Kryvoruchko, 2004; Külling et al., 2001; Olesen et al. 2004; Ross et al., 1999; Schimpl, 2001; Sommer et al., 2000

Da N_2O -Emissionen in der Schwimmschicht entstehen, kann angenommen werden, dass bei separierter Gülle keine Lachgas-Emissionen entstehen. Dies wird auch in der Literatur (Clemens et al., 2002; Hüther und Schuchardt, 1998; Sommer et al., 2000) bestätigt.

3.2.5.2. Emissionen bei der Ausbringung des Gärrestes

Gärrestmenge und –transport

Die Menge des anfallenden Gärrestes wird aus der jährlichen Substratmenge (zuzüglich der eingesetzten Wassermenge) [t/a] abzüglich der jährlich produzierten Methanmenge (plus Wasser im Biogas) [t/a] berechnet. Die Dichte des Gärrestes wird mit 1t/m^3 angenommen.

Für den Transport werden die jährlich transportierten tkm Gärrest aus dem Transportvolumen des Güllefasses und den Transportdistanzen berechnet.

Methan (CH_4)

Nach Clemens et al. 2001 bzw. Amon et al. 2005 treten bei der Ausbringung Methanemissionen auf, diese sind aber im Vergleich zu den Methanemissionen bei der Lagerung sehr gering.

Nach Wulf et al. 2002 gibt es zwei Quellen für Methanemissionen bei der Ausbringung des Gärrestes:

Einerseits Emissionen, die unmittelbar nach der Ausbringung emittiert werden und der Freisetzung von gelöstem Methan zugeschrieben werden, das während der Lagerung gebildet wurde.

Andererseits kann es auch im Boden zur Methanogenese kommen, wenn anaerobe Bedingungen herrschen, wie es beispielsweise bei der Injektionstechnik der Fall ist.

Für die Berechnung wurde ein CH_4 -Emissionsfaktor von $3,26 (\pm 2,77)$ g/t (Amon et al. 2006, Clemens et al. 2006) abgeleitet. Es wurde für alle Gülle/Gärreste der gleiche Emissionsfaktor angenommen.

Ammoniak (NH_3)

Tabelle 21: Einflussfaktoren auf die Ammoniakemissionen durch die Ausbringung der Gülle (nach Sommer und Hutchings 2001)

NH ₃ -Konzentration an der Gülleoberfläche	NH ₄ ⁺ -Konzentration der Gülle
	Lufttemperatur
	pH-Wert
	Verdunstungsrate
NH ₃ -Transfer von der Oberfläche in die Atmosphäre	Kronenschluss und Komplexität der Feldfrucht
	Krustenbildung
	Oberflächenbeschaffenheit des Feldes
	Windgeschwindigkeit
	Sonneneinstrahlung
Exponierte Gülle-Fläche	Gesamtfläche der Ausbringung
	Haftung der Gülle auf den Pflanzen
	Ausbringtechnik
Dauer der Exposition an der Luft	Ausbringtechnik
	Einarbeitung der Gülle
	Infiltrationsrate in den Boden
	Verdampfungsrate

Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft und hier besonders aus der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern stellen eine wesentliche Emissionsquelle von Ammoniak in Europa dar (Edelmann et al. 2001, Sommer und Hutchings 2001).

Die Ammoniakemissionen während und nach der Ausbringung von GülLEN/Gärresten sind von einer Vielzahl von Parametern abhängig (Tabelle 21).

Durch die Vergärung der Gülle erhöhen sich der Ammoniumgehalt sowie der pH-Wert gegenüber der unvergorenen Gülle, woraus sich Mehremissionen für Biogasgärreste ergeben könnten.

Nach Edelmann et al. 2001 sind die NH_3 -Mehremissionen durch das Ausbringen als Folge der sehr komplexen Verhältnisse und großen Abweichungen bei verschiedenen Applikationen schwer zu quantifizieren. Zudem wird in verschiedenen anderen Publikationen auf signifikant größere Erträge beim Pflanzenwachstum hingewiesen, welche auf eine bessere Nutzung des Ammoniumstickstoffs zurückgeführt werden. Gleichzeitig wird in verschiedenen Publikationen festgehalten, dass die Biogasgülle deutlich homogener sei und auf Grund stark verbesserter Fließeigenschaften vollständiger und viel rascher in den Boden eindringen könne, wo die Stickstoffverluste durch Verdampfen von Ammoniak praktisch ausgeschaltet werden.

Auf Grund dieser Überlegungen wurde hier angenommen, dass es bei der Anwendung von Biogasgärresten zu 10% NH_3 -Mehremissionen gegenüber unvergorener Gülle kommt.

Aus der Literatur wurden die in Tabelle 22 angeführten Werte für GülLEN/Gärreste abgeleitet.

Tabelle 22: Emissionsfaktoren für Ammoniakemissionen bei der Ausbringung

Emissionsfaktoren	NH_3
Wirtschaftsdünger/Gärrest	[% TAN]
Rindergülle	31,0
Schwankungsbreite RG	74%
Schweinegülle	26,0
Schwankungsbreite SG	74%
Hühnergülle	28,5
Gärrest (1)	34,1
Gärrest (2)	28,6

Mittelwerte aus Amon et al. 2005; Clemens et al. 2006; Edelmann et al. 2001; Sommer and Hutchings 2001; Wulf et al. 2002a.

Die meist verbreitetste Ausbringtechnik ist die Breitverteilung mittels Prallteller. Wie in Abbildung 27a ersichtlich ist bei dieser Ausbringtechnik und unter emissionsfördernden Bedingungen (Sonnenschein, hohe Temperatur, Wind, sehr feine Zerstäubung) mit hohen Ammoniakemissionen zu rechnen. Es existieren jedoch andere, emissionsreduzierende Ausbringtechniken, bei denen eine bodennahe Applikation der Gärreste zu einer beachtlichen Absenkung der Ammoniakemissionen führen kann. Neben der Schleppschlauchtechnik, die im Vergleich zur konventionellen Breitverteilung mittels Prallteller zu einer Reduktion der Ammoniakemissionen um bis zu 60% führen kann, bieten sich auch noch andere Möglichkeiten wie etwa Schleppschuh- und Schlitzdrilltechnik an. Für die Schleppschlauchtechnik eignen sich besonders flüssige Gärreste, die gut zwischen den Schlauchabständen zerfließen und rasch in den Wurzelbereich infiltrieren siehe Abbildung 27b. Neben den technischen Maßnahmen sind vor allem auch die Witterungsbedingungen

zu beachten. Die Ausbringung von Gärresten sollte nach Möglichkeit bei kühler, feuchter Witterung (ideal bei leichtem Regen) und „annähernder“ Windstille erfolgen. (BMLFUW 2007).



Abbildung 27: Ausbringung von Gülle/Gärrest: a) Breitverteilung mittels Prallteller (Foto: K. Buchgraber); b) Schleppschlauchtechnik (Foto: E.M. Pötsch).

Tabelle 23 gibt einen Überblick über die Reduktionsfaktoren der Ausbringtechniken, die die Ammoniakemissionen gegenüber der Ausbringung mit Prallteller reduzieren.

Tabelle 23: Einfluss der Ausbringtechnik auf die NH_3 -Emissionen (Referenz = Prallteller)

Technik	Reduktionsfaktor	Literatur
Schleppschlauch	-0,40	(Döhler, 2001; Edelmann et al., 2001; Sommer and Hutchings, 2001; UNECE, 1999; Wulf et al., 2005)
Schwankungsbreite	0,10	
Schleppschuh	-0,47	(Döhler, 2001; Edelmann et al., 2001; UNECE, 1999)
Schwankungsbreite	0,08	
Schlitzdrill	-0,67	(Döhler, 2001; Edelmann et al., 2001; UNECE, 1999)
Schwankungsbreite	0,06	
Injektion	-0,86	(Amon, 1998; Döhler, 2001; Edelmann et al., 2001; UNECE, 1999; Wulf et al., 2002a; Wulf et al., 2005)
Schwankungsbreite	0,10	

Lachgas (N_2O)

Die Emissionen von Lachgas nach der Gülleausbringung werden beeinflusst durch zahlreiche Einflussgrößen, wie z.B. durch Unterschiede in der Art und Weise der Düngung, Bodeneigenschaften (etwa Feuchtigkeits-, Stickstoff- und Humusgehalt des Oberbodens), sowie durch klimatische Einflüsse (Edelmann et al., 2001).

Auf Grund der großen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Emissionsfaktoren für die Lachgasemissionen nach Ausbringen der Gülle wurde angenommen, dass kein Unterschied zwischen vergorener und unvergoren gelagerter Gülle besteht.

Lachgasemissionen (Rindergülle): $0,0196 (\pm 0,0154)$ kg N_2O /kg TKN

Dieser Wert wird auch in der österreichischen Treibhausgasbilanz (UBA 2009) analog zu den IPCC-Werten verwendet. Bei der Berechnung berücksichtigt wird jedoch der Einfluss der Ausbringtechnik: die Verwendung von Gülle-Injektoren steigert die Emission von Lachgas

um den Faktor 2,95 (Amon, 1998; Wulf et al., 2002b; Wulf et al., 2005) im Vergleich zur Ausbringung mittels Prallteller oder Schleppschlauch.

3.2.5.3. Zusammenfassung der Emissionsfaktoren für das Gärrestmanagement

Tabelle 24: Zusammenfassung der verwendeten Emissionsfaktoren beim Gärrestmanagement

	Zusammensetzung					Lagerung			Ausbringung		
	TS	oTS	Nt	TAN	pH	NH ₃	CH ₄	N ₂ O	NH ₃	CH ₄	N ₂ O
Wirtschaftsdünger/ Gärrest	[%]	[%]	[kg/t]	[kg/t]		[g/ (m ² *d)]	[g/ (m ³ *d)]	[g/ (m ² *d)]	[% TAN]	[g/ m ³]	[g/ gTKN]
Rindergülle - MW	7.19	5.61	3.66	1.81	7.30	3.83	19.10	0.42	31.04	3.26	0,0196
Schwankungsbreite RGülle	2.67	2.23	1.13	0.56	0.17	3.55	5.06	0.29	23.11	2.77	0,0154
Schweinegülle - MW	4.63	3.29	6.11	3.57	7.21	5.37	12.96	0.42	26.00	3.26	0,0196
Schwankungsbreite SGülle	1.03	0.83	1.95	0.42	0.69	6.94	10.59	0.29	29.46	2.77	0,0154
Hühnergülle	17.90	12.69	10.60	5.93		11.43	10.45	0.42	28.52	3.26	0,0196
Gärrest (1)	6.90	4.99	5.04	3.04	8.30	5.37	Ber.	0.53	34.14	3.26	0,0196
Gärrest (2)	3.45	2.01	4.50	3.60	8.02	7.51	Ber.	0.53	28.60	3.26	0,0196

3.2.6. Infrastruktur

Die für die Errichtung der Anlagen verwendeten Baumaterialien sowie deren Menge wurden als Parameter erhoben bzw. abgeschätzt. Die mit der Herstellung bzw. dem Transport und der Entsorgung der Baumaterialien verbundenen Emissionen werden auf eine kalkulierte Nutzungsdauer von 13 Jahren aufgeteilt. Die Sachbilanzdaten wurden der Ecoinvent Datenbank (Ecoinvent 2007) entnommen. Tabelle 25 gibt einen Überblick über die durchschnittlichen Mengen an Baumaterialien, die für die Errichtung einer 100kW- und 500kW-Biogasanlage sowie eines 5000kW Hackschnitzel-Heizkraftwerks benötigt werden.

Tabelle 25: Durchschnittliche Menge an Baumaterialien für die Errichtung einer 100kW- und 500kW-Biogasanlage sowie eines 5000kW Hackschnitzel-Heizkraftwerks.

Bau- materialien		Biogasanlage mit BHKW, 100 kW	Biogasanlage mit BHKW, 500 kW	Hackschnitzel- Heizkraftwerk, 5000 kW
Beton	m ³	488	1.697	3.194
Mauerziegel	kg	107.583	29.625	1.012.073
Verputz	kg	1.833	14.750	153.625
Dämmung	kg	492	3.875	921
Holz	m ³	2	33	31
Edelstahl	kg	2.550	7.500	22.582
Baustahl	kg	32.346	76.250	2.087.767
Kunststoff	kg	1.100	6.125	31.641

An dieser Stelle soll nun auf eine Schlussfolgerung der Auswertung bezüglich der Infrastruktur der Biogasanlagen vorgegriffen werden: Bei der Betrachtung des Anteils der Infrastruktur für alle Anlagen (und auch in allen Wirkungskategorien) stellte sich heraus, dass Anlagen mit einem Stahl-Fermenter (anstatt eines Betonfermenters) durchschnittlich höhere Emissionen/Aufwendungen aufweisen. Ein weiterer Faktor, der das Gesamtergebnis und den Anteil der Infrastruktur beeinflusst ist die Anlagengröße: für kleine Anlagen (bis 50 kW_{el})

installierte Leistung) ist das Ergebnis der Infrastruktur bezogen auf die kWh_{el} größer als für größere Anlagen. Auffallend war außerdem, dass gerade kleine Anlagen öfter mit Stahlfermentern arbeiten, sodass sich die Emissionen/Aufwendungen aus dem Lebenszyklusabschnitt Infrastruktur maximieren. In so einem Fall kann der Lebenszyklusabschnitt Infrastruktur bis zu 80% des Gesamtergebnisses (z.B. bei ADP) ausmachen.

3.2.7. Emissionen bei der Kompostierung und Ausbringung des Kompostes

Während der Kompostierung wird die in den organischen Reststoffen enthaltene organische Substanz von aeroben Mikroorganismen (Bakterien und Pilze) unter Sauerstoffaufnahme als Energie- und Nährstoffquelle verwertet und dabei abgebaut. Dabei wird ein Teil des Kohlenstoffs in die Zellsubstanz der Mikroorganismen eingebaut und ein weiterer Teil als Kohlendioxid freigesetzt (BMLFUW 2005). Die gasförmigen Abbauprodukte sind hauptsächlich CO_2 und (in Abhängigkeit vom pH-Wert und Stickstoffgehalt) auch Ammoniak (NH_3). Da innerhalb der Kompostmiete (in der die Biomasse oft meterhoch aufgeschichtet ist) jedoch auch anaerobe Bereiche auftreten können, werden auch anaerobe Abbauprodukte wie Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) emittiert (Sonesson 1996).

In Abbildung 28 ist der prinzipielle Emissionsverlauf von N_2O , CH_4 und NH_3 in drei Typkurven relativ zum CO_2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Emissionen von Ammoniak und Methan im Verlauf einer Kompostperiode innerhalb der ersten drei Wochen zuerst ein Maximum erreichen und danach fast vollständig abnehmen. Die Lachgasemissionen zeigen die Tendenz erst mit der CH_4 - und NH_3 - Abnahme zuzunehmen und erreichen ihren Maximalwert, wenn die Temperaturen sinken und die Nitrifikation des Stickstoffs beginnt (BMLFUW 2005).

Die Bildung klimarelevanter und anderer Schadgas- Emissionen während der Kompostierung wird beeinflusst durch das Umsetzintervall bzw. die Belüftungssteuerung, dem Strukturanteil bzw. der Homogenität der Materialmischung, dem Wassergehalt und einer homogenen Feuchtigkeitsverteilung im Rottekörper, der Temperatur sowie dem C/N-Verhältnis.

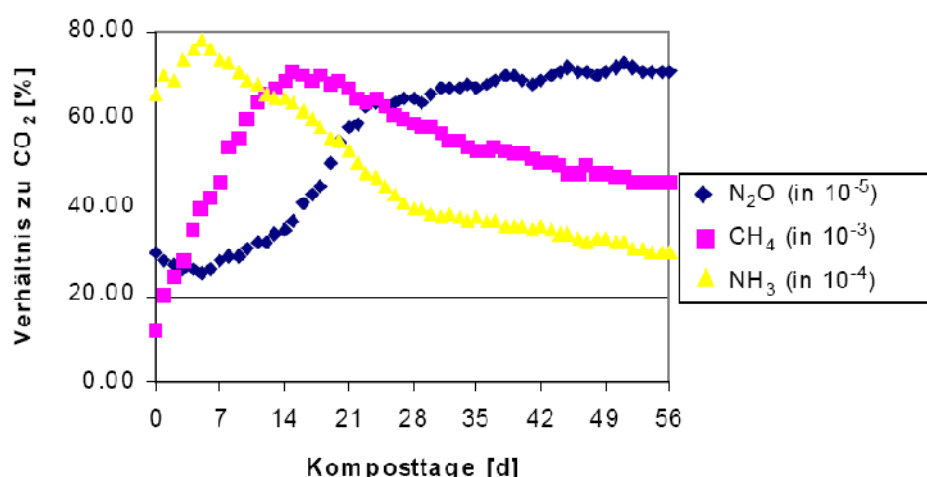


Abbildung 28: Verlauf der Konzentrationen von NH_3 , N_2O und CH_4 in Relation zu CO_2 bei der Kompostierung von Stallmist (Daten aus Hellebrand und Kalk 2000 zitiert in BMLFUW 2005).

Da Methan ein anaerobes Abbauprodukt ist, wird von einer optimalen Reduktion der Methanemissionen bei täglichem Umsetzen ausgegangen. Durch das Umsetzen wird das Material gelockert und Sauerstoff in das Material eingebracht. Dadurch wird die Aktivität der strikt anaeroben Methanbildner stark reduziert bzw. diese werden gehemmt.

Nach Hellmann (1995) jedoch sind die N_2O -Emissionen bei täglichem Umsetzen am höchsten. Der in die Miete eingebrachte Sauerstoff bewirkt wahrscheinlich einen kurzfristigen Nitrifikationsschub. Das gebildete Nitrat wird sobald wieder anoxische Bedingungen herrschen, im Rahmen der Denitrifikation nicht bis zu elementarem Stickstoff sondern nur bis zu N_2O umgesetzt. Wahrscheinlich durch den verringerten Sauerstoffeintrag waren die N_2O -Emissionen durch 7-tägiges bzw. 3-tägiges Umsetzen niedriger als bei täglichem Umsetzen. Die Höhe der emittierten N_2O -Mengen hängt daher sehr stark vom Sauerstoffangebot, der O_2 -Verteilung und von der Temperatur in der Kompostmiete ab.

Die Ammoniak-Emissionen werden durch einen Anstieg des pH-Wertes, der Temperatur oder der Belüftung vermehrt, bei hohen C/N-Verhältnissen sinken sie.

Die Berechnung der Emissionen aus der Kompostierung für die Sachbilanz erfolgte ähnlich wie beim Gärrestmanagement auf Basis von Emissionsfaktoren aus der Literatur. Es wurden N_2O , NH_3 und CH_4 -Emissionen sowie Energieinput in Form von elektrischer Energie (Strommix Österreich) und Diesel berücksichtigt. Für die Sensitivitätsanalyse wurden auch Daten zur Verwendung eines Biofilters für die Reinigung der Abluft der Kompostierungsanlage erhoben. Tabelle 26 gibt einen Überblick über die in der Literatur gefundenen Annahmen zu Emissionen aus der Kompostierung sowie die daraus abgeleiteten Emissionsfaktoren für die Berechnung der Emissionen in dieser Arbeit.

Wie für die Ausbringung des Gärrestes wurden auch für die Ausbringung des Kompostes Emissionen berechnet. Für Methan wurde von keinen bis vernachlässigbar geringen Emissionen ausgegangen. Die Ammoniakemissionen wurden nach SHL 2010 mit 80% des TAN berechnet, wobei zu erwähnen ist, dass im Kompost, der Stickstoff zu 95% in organisch gebundener Form vorliegt, der Ammoniumstickstoffgehalt dadurch also sehr gering ausfällt. Die Lachgasemissionen wurden nach Alluvione 2010 mit 0,11% des TKN angenommen. Der Treibstoffverbrauch und Maschinenaufwand für die Ausbringung wurde durch Verwendung des Ecoinvent-Datensatzes „Mist laden und ausbringen, mit Mistkran und Miststreuer“ berücksichtigt.

Tabelle 26: Emissionen bei der Kompostierung von organischen Abfällen (Literaturdaten, sowie darauf abgeleitete Emissionsfaktoren für die Berechnung in dieser Arbeit).

	Sonneson 1996	Finnveden et al. 2000	Martinez- Blanco et al. 2010	Szanto et al. 2007	Edelmann u. Schleiss 2001	MW	STABW [%]
Emissionen:							
N-Verlust [% TKN]	Abhängig vom C/N- Verhältnis*	7,5	10	6,4	13	Abhängig vom C/N- Verhältnis*	
N ₂ O [% von N-Verlust]	2	6	38,77	39,06	18,16	23,79	73
N ₂ [% von N-Verlust]	2	3	-	-	-		
NH ₃ [% von N-Verlust]	96	89	61,23	60,94	81,64	75,04	21
Abbau [% ODM]	65	-	-	57	50	57,33	13
CH ₄ [% von CO ₂]	0,35	-	-	0,4	5,4	2,05	142
Gasreinigung							
NH ₃ -N [% Reduktion]	90	60	-	-	-	75	85
N ₂ O-N [% Reduktion]	90	60	-	-	-	75	85
CH ₄ [% Reduktion]	85	60	-	-	-	72,5	64
Energieverbrauch:							
Elektrizität	52	54	182	-	-	85	87
Diesel	30	556	166	-	-	195	128

* N-Verlust [% TKN] = 0,55903-0,01108*(C/N)*100

3.2.8. Bereitstellung von Wärme mit dem österr. Wärmemix 2005

Die Berechnung der Sachbilanzdaten für die Bereitstellung von Wärme erfolgte mit Hilfe von verschiedenen Ecoinvent-Datensätzen und Daten der Statistik Austria über den energetischen Endverbrauch nach Energieträgern und Nutzenergiekategorien für Österreich 2005. Tabelle 27 gibt einen Überblick über die mit Hilfe der Sachbilanzdaten berechneten Wirkungspotentiale für den „Österr. Wärmemix 2005“, sowie für die einzelnen, dem Mix zugrundeliegenden Brennstoffe. Abbildung 29 zeigt die Zusammensetzung der verschiedenen Wirkungskategorien des österreichischen Wärmemixes nach Brennstoffen.

Tabelle 27: Wirkungspotentiale der Bereitstellung des österr. Wärmemixes 2005 sowie der einzelnen zugrundeliegenden Brennstoffe (pro kWh) für alle Wirkungskategorien.

	Einheit	Wärmemix AT 2005	Steinkohle, Koks	Braunkohle, etc. ^a	Heizöl, etc. ^b	Naturgas	Brennholz	Biog. Brennst., etc ^c	Umgebungsw. & Geothermie	Elektrische Energie	Fernwärme
GWP	kg CO ₂ -eq.	2,3E-01	5,9E-01	7,2E-01	3,4E-01	2,5E-01	2,5E-02	4,5E-02	1,9E-01	3,3E-01	1,8E-01
ADP	kg Sb-eq.	1,6E-03	4,0E-03	5,1E-03	2,2E-03	2,2E-03	9,4E-05	2,8E-04	1,2E-03	2,4E-03	1,3E-03
AP	kg SO ₂ -eq.	6,0E-04	3,1E-03	1,2E-03	7,3E-04	1,9E-04	4,9E-04	4,3E-04	9,4E-04	8,1E-04	9,9E-04
EP	kg PO ₄ -eq.	7,1E-05	9,7E-05	1,2E-04	6,6E-05	2,1E-05	1,6E-04	1,1E-04	4,7E-05	6,4E-05	6,1E-05
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq.	4,4E-05	1,1E-03	8,1E-04	3,8E-05	1,7E-05	1,0E-05	1,3E-05	3,7E-05	3,8E-05	4,7E-05
ODP	kg CFC-11-eq.	2,9E-08	2,5E-09	1,8E-09	4,9E-08	3,1E-08	1,3E-09	3,2E-09	2,1E-07	1,9E-08	8,3E-09
HTP	kg 1,4-DCB-eq.	4,9E-02	1,3E-01	2,4E-01	3,3E-02	3,5E-02	6,6E-02	6,1E-02	6,3E-02	1,2E-01	4,4E-02
TETP	kg 1,4-DCB-eq.	1,1E-03	9,1E-04	2,9E-03	4,0E-04	1,0E-04	2,0E-03	1,5E-03	3,2E-03	9,3E-03	3,2E-04
FAETP	kg 1,4-DCB-eq.	4,8E-03	2,4E-02	2,4E-02	4,1E-03	9,7E-04	4,6E-03	4,6E-03	1,1E-02	2,0E-02	6,0E-03
MAETP	kg 1,4-DCB-eq.	3,9E+01	3,3E+02	1,8E+02	2,6E+01	1,4E+01	9,0E+00	2,0E+01	1,1E+02	1,7E+02	7,6E+01
LUC	m ² a ⁻¹	7,0E-02	1,7E-02	3,0E-03	7,6E-04	1,9E-04	3,4E-01	2,1E-01	2,9E-03	6,9E-03	1,0E-02
Anteil	%	100,0	1,4	0,3	27,8	28,3	17,2	4,7	1,8	4,5	13,9

a ... Braunkohle, Braunkohlenbriketts und Brenntorf

b ... Heizöl, Gasöl, Flüssiggas

c ... biogene Brenn- und Treibstoffe, Brennbare Abfälle

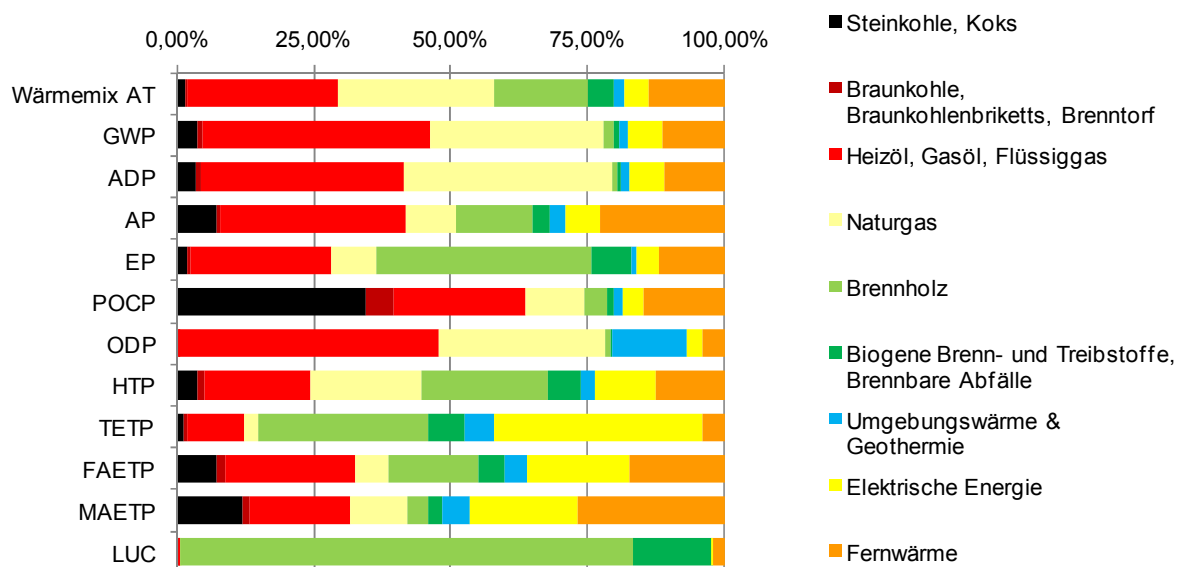


Abbildung 29: Zusammensetzung der verschiedenen Wirkungspotentiale des österr. Wärmemixes 2005 nach Brennstoffen.

3.3. Wirkungsabschätzung und Auswertung

Die 3. und 4. Phase der Lebenszyklusanalyse (Wirkungsabschätzung und Auswertung) erfolgt unter Punkt 4. Ergebnisse und Diskussion.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Biogas-System

4.1.1. Betriebsparameter der untersuchten Anlagen des Biogas-Systems

Die Untersuchung zeigte, dass sich die untersuchten Biogasanlagen hinsichtlich der Anlagengröße, des Designs und der Rohstoffzusammensetzung sehr stark unterscheiden und dass eine große Vielfalt verschiedener Kombinationen der Betriebsparameter vorliegt. Tabelle 28 gibt einen Überblick über einige der wichtigsten Betriebsparameter der untersuchten Biogasanlagen. Eine nähere Beschreibung der Anlagen ist im Bericht: „Aufbau eines Bewertungssystems für Biogasanlagen – „Gütesiegel Biogas“.“ (Laaber et al. 2007) zu finden.

Tabelle 28: Betriebsparameter der untersuchten Anlagen des Biogas-Systems (Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung)

	Einheit	MITTELWERT	MIN	MAX	STABW
durchschn. Transportdistanz	km	9,7	0,1	73,8	16,0
Menge Substrate	t*a ⁻¹	6.756	300	21.490	5.205
Menge oTS	t _{oTS} *a ⁻¹	1.443	120	5.030	1.195
Anteil NAWAROs	%	39,6	0,0	100,0	28,9
Anteil WD	%	40,5	0,0	100,0	25,7
Anteil AF	%	19,5	0,0	95,0	25,5
HRT	d	158,0	44,1	483,3	98,5
Biogasmenge	Nm ³ *a ⁻¹	984.355	85.106	3.691.982	873.032
CH ₄ -Konzentration	%	56,0	49,7	67,0	4,4
Nettostromproduktion	MWh*a ⁻¹	1.869	124	7.760	1.833
Wärmenutzung	MWh*a ⁻¹	699	0	6.000	1.084
Wärmenutzungsgrad	%	15,5	0,0	42,6	12,8
el. Wirkungsgrad	%	34,3	21,7	40,0	3,8
Menge Gärrest	t*a ⁻¹	5.945	602	17.688	4.197
Anteil abged. Endlager	%	17,1			
Anteil Red. GR-Ausbringung	%	51,2			

4.1.2. Ergebnisse der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des Biogas-Systems für alle Wirkungskategorien

Emissionen allgemein

Tabelle 29 zeigt die Wirkungsindikator-Ergebnisse für die Emissionen der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte sowie die Summe aller Lebenszyklusabschnitte für alle Wirkungskategorien pro kWh_{el}. Es handelt sich dabei jeweils um den Mittelwert der untersuchten Anlagen um einen ersten Einblick in die Größenordnung der Emissionen sowie der Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte am Gesamtergebnis zu verschaffen. Abbildung 30 stellt diese Anteile an den Gesamtemissionen für alle Wirkungskategorien graphisch dar.

Tabelle 29: Emissionen der Lebenszyklusabschnitte des Biogas-Systems für alle Wirkungskategorien pro kWh_{el}

		NAWAROs	STABW	Transport	STABW	Betrieb BGA	STABW	BHKW	STABW	Gärrestlagerung	STABW	Gärrestaubsbringung	STABW	Infra-struktur	STABW	Summe	STABW
Einheit																	
GWP	kg CO ₂ -eq.	2,7E-02	1,7E-02	2,6E-02	5,4E-02	7,1E-03	6,1E-03	8,8E-02	2,9E-02	4,4E-02	4,5E-02	1,3E-01	8,8E-02	4,0E-02	3,1E-02	3,6E-01	0,122
ADP	kg Sb-eq.	1,7E-04	9,8E-05	1,8E-04	3,8E-04	5,0E-05	4,5E-05	1,6E-04	6,9E-04	0	0	7,4E-05	5,2E-05	2,3E-04	2,0E-04	8,6E-04	8,2E-04
AP	kg SO ₂ -eq.	2,0E-04	1,2E-04	1,7E-04	3,6E-04	7,1E-05	6,0E-05	1,6E-03	6,5E-04	1,0E-03	1,3E-03	6,8E-03	6,0E-03	2,5E-04	2,6E-04	1,0E-02	6,2E-03
EP	kg PO ₄ -eq.	5,1E-05	3,5E-05	2,7E-05	5,7E-05	1,2E-05	9,7E-06	2,5E-04	1,1E-04	1,9E-04	2,5E-04	1,3E-03	1,1E-03	1,8E-05	1,4E-05	1,8E-03	1,2E-03
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq.	5,1E-06	3,0E-06	6,4E-06	1,4E-05	1,4E-06	1,2E-06	9,8E-05	4,0E-05	7,3E-06	7,0E-06	2,4E-06	1,7E-06	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-04	4,6E-05
ODP	kg CFC-11-eq.	3,0E-09	1,8E-09	3,4E-09	7,2E-09	8,7E-10	7,3E-10	3,0E-09	1,3E-08	0	0	1,3E-09	9,3E-10	3,0E-09	1,8E-09	1,5E-08	1,5E-08
HTP	kg 1,4-DCB-eq.	2,4E-02	1,5E-02	9,6E-03	1,5E-02	4,4E-03	3,8E-03	4,8E-03	1,1E-02	5,4E-05	7,2E-05	1,2E-02	8,3E-03	8,1E-02	1,6E-01	1,4E-01	0,164
TETP	kg 1,4-DCB-eq.	2,5E-04	1,7E-04	6,7E-05	1,3E-04	8,2E-06	1,0E-05	2,2E-05	9,2E-05	0	0	4,2E-05	2,9E-05	3,6E-04	3,8E-04	7,5E-04	4,4E-04
FAETP	kg 1,4-DCB-eq.	3,4E-03	2,3E-03	1,2E-03	1,8E-03	1,0E-04	1,9E-04	2,7E-04	1,1E-03	0	0	1,4E-03	9,4E-04	1,7E-02	2,8E-02	2,3E-02	0,028
MAETP	kg 1,4-DCB-eq.	7,7E+00	4,6E+00	4,6E+00	7,3E+00	6,9E-01	6,8E-01	2,2E+00	9,3E+00	0	0	3,9E+00	2,7E+00	2,7E+01	3,4E+01	4,6E+01	3,7E+01
LUC	m ² a ⁻¹	4,1E-01	2,3E-01	1,0E-03	1,3E-03	0	0	0	0	0	0	1,2E+00	1,6E+00	5,2E-03	3,7E-03	1,6E+00	1,614

NAWAROs.....Lebenszyklusabschnitt: „Breistellung der nachwachsenden Rohstoffe (Mittelwert der 41 Anlagen)

Transport.....Lebenszyklusabschnitt: Transport der Substrate zur Biogasanlage (Mittelwert der 41 Anlagen)

Betrieb BGA.....Lebenszyklusabschnitt: Betrieb der Biogasanlage (Aufwände für Lagerung & Silierung, Beschickung, ev. Aufbereitung, etc.) (Mittelwert der 41 Anlagen)

BHKW.....Lebenszyklusabschnitt: Verbrennung des Biogases im BHKW (Mittelwert der 41 Anlagen)

Gärrestlagerung.....Lebenszyklusabschnitt: Lagerung des Gärrestes (ohne Aufwand für das Behältnis, dieses ist in Infrastruktur enthalten) (Mittelwert der 41 Anlagen)

Gärrestaubsbringung.....Lebenszyklusabschnitt: Ausbringung des Gärrestes (inkl. Aufwand für die Ausbringung und Emissionen) (Mittelwert der 41 Anlagen)

Infrastruktur.....Lebenszyklusabschnitt: Infrastruktur der BGA (inkl. Silos, Fermenter, Gas-Speicher, BHKW, Lager, etc.) (Mittelwert der 41 Anlagen)

STABW.....Standardabweichung der 41 Anlagen

Anhand von Abbildung 30 soll der Beitrag der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte zu den einzelnen Wirkungskategorien vorab kurz diskutiert werden, eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse aller untersuchten Biogasanlagen in den einzelnen Wirkungskategorien folgt im Anschluss daran.

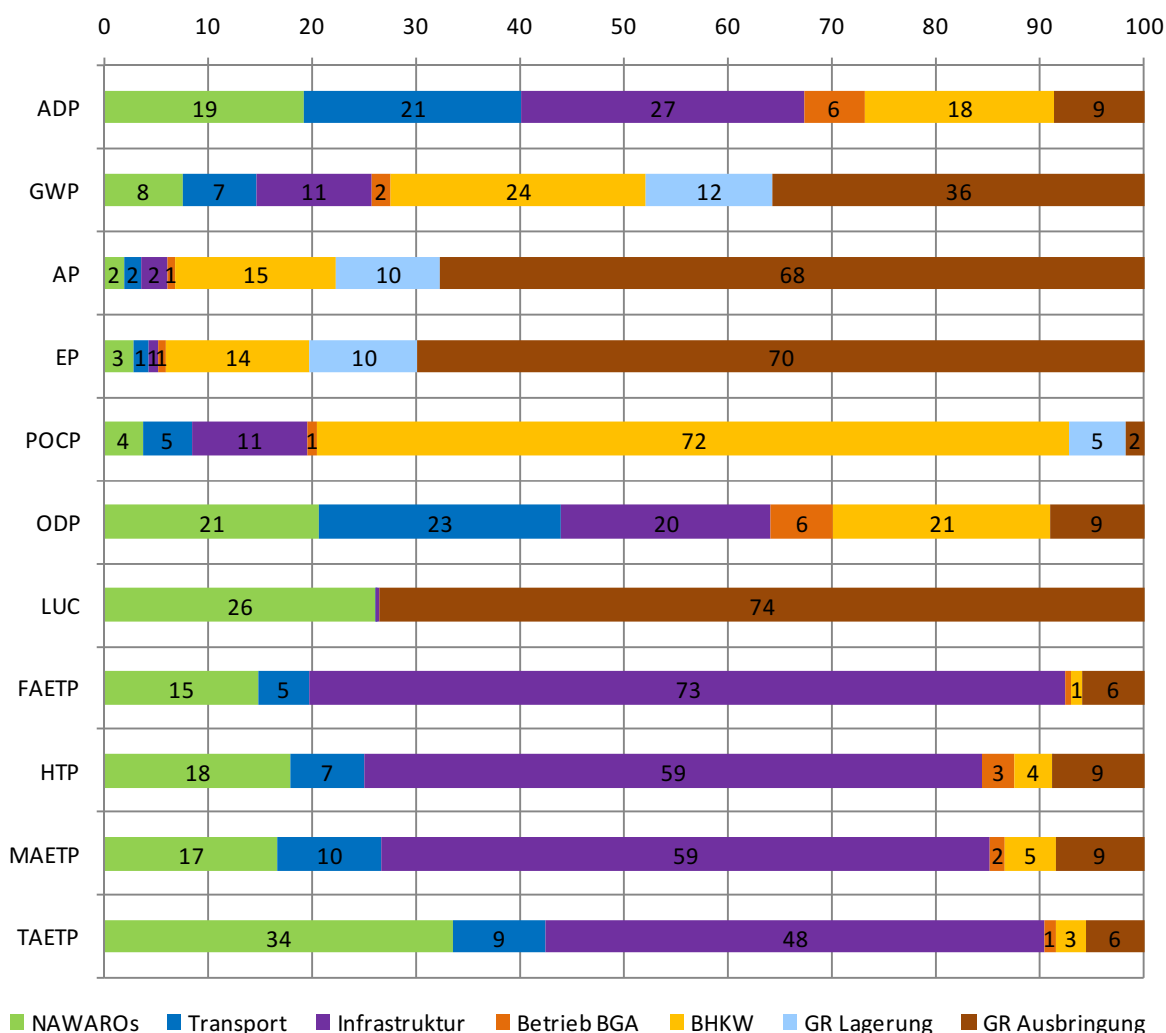


Abbildung 30: Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des „Biogas-Systems“ an den gesamten Emissionen in allen Wirkungskategorien.

Der Beitrag des Lebenszyklusabschnittes Produktion Nachwachsender Rohstoffe (NAWAROs, grün dargestellt) zu den Gesamtemissionen der Biogasanlagen liegt zwischen 2% und 34%. Wobei sich der größte Anteil in der Wirkungskategorie terrestrische Ökotoxizität (TAETP) ergibt, was sich durch die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln erklären lässt, welche ein großes Wirkungspotential in dieser Kategorie aufweisen. Definitionsgemäß benötigt dieser Lebenszyklusabschnitt auch einen großen Anteil an der Landnutzung (26%). Der Beitrag zu den Wirkungskategorien ADP und ODP sowie der restlichen Toxizitätspotentiale liegt zwischen 15% und 18%. Für die Wirkungskategorien GWP (8%), POCP (4%), EP (3%) und AP (2%) liegt er sehr niedrig, wobei darauf hinzuweisen ist, dass dieser Lebenszyklusabschnitt nur die, für die Produktion notwendigen Arbeitsprozesse, sowie die Herstellung der landwirtschaftlichen Maschinen und die Düngung mit synthetischem Dünger, soweit notwendig beinhaltet. Die Düngung der Pflanzen mit Gärresten (Hauptteil der Düngung für die meisten Kulturarten und Betriebe), welcher in der Lebenszyklusanalyse eine

besondere Rolle zukommt, bildet den eigenen Lebenszyklusabschnitt Gärrestausrückführung. Dadurch ergeben sich in einigen Wirkungskategorien eventuell niedrigere Emissionen/Aufwendungen für den Lebenszyklusabschnitt „Produktion der NAWAROs“ als in vergleichbaren Studien, die diese zwei Abschnitte zusammenfassen.

Der Lebenszyklusabschnitt Transport (blau dargestellt) liefert den größten Beitrag zu den Wirkungskategorien ODP (23,2%) und ADP (20,8%), wobei hier die Verwendung und Verbrennung fossiler Brennstoffe hauptverantwortlich ist. Für die Toxizitätspotentiale liegt der Beitrag des Transportes zwischen 5 und 10%. In den Kategorien POCP, AP und EP ist der Anteil des Transportes mit jeweils 4,7%, 1,7% und 1,5% gering.

Der Lebenszyklusabschnitt Infrastruktur (violett dargestellt) ist für den Großteil der Emissionen in den Wirkungskategorien FAETP, HTP und MAETP mit jeweils 70,4%; 59,3% und 58,5% verantwortlich. Das Material mit dem größten Potential in diesen Wirkungskategorien ist Stahl. Für das TAETP liegt der Anteil der Infrastruktur bei 47,9%, wie bereits bei der Biomasseproduktion erwähnt, ist in dieser Kategorie der Einfluss der Pflanzenschutzmittel hauptbestimmend für das Gesamtergebnis. Der Beitrag zu den Wirkungskategorien ADP (27,2%) und ODP (20,3%) ist ebenfalls bedeutend. Er wird, wie auch in den Kategorien POCP (11,1%) und GWP (11,0%) durch den Material- und Energieinput zur Herstellung der Baumaterialien bzw. den dabei entstehenden Emissionen verursacht. In den Kategorien Versauerung und Eutrophierung sowie Landnutzung ist der Beitrag der Infrastruktur mit 2,5%, 1,0% bzw. 0,4% gering.

Der Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Biogasanlage (rot dargestellt) so, wie in dieser Arbeit definiert, spielt im Gegensatz zu anderen Lebenszyklusabschnitten nur eine untergeordnete Rolle und liegt zwischen 0,6% und 6%. Der größte Beitrag betrifft die Wirkungskategorien ADP (5,8%) und ODP (6,0%) und wird durch den Treibstoffverbrauch bei der Lagerung, Sillierung und Beschickung verursacht.

Der Lebenszyklusabschnitt BHKW (orange dargestellt) verursacht den Großteil des photochemischen Oxidantienbildungspotentials (72,3%). Auch in den Wirkungskategorien GWP (24,4%), ADP (18,3%) und ODP (20,8%) ist der Beitrag der Emissionen aus dem BHKW nicht zu vernachlässigen. Für die Wirkungskategorien AP (14,5%) und EP (13,9%) liegt der Beitrag um die 14%, für die Toxizitätspotentiale zwischen 1,1% und 4,7%.

Der Lebenszyklusabschnitt Gärrestlagerung (hell-blau dargestellt) trägt erwähnenswert zu den Wirkungskategorien GWP (12,2%), AP (10,0%), EP (10,4%) sowie POCP (5,4%) bei.

Der letzte Lebenszyklusabschnitt des Biogas-Systems, die Ausbringung des Gärrestes (braun dargestellt), trägt maßgeblich zu den Ergebnissen in den Wirkungskategorien Landnutzung (73,5%), Eutrophierung (69,9%), Versauerung (67,7%) sowie Klimawandel (35,7%) bei. Für die weiteren Wirkungskategorien liegt der Beitrag zwischen 2 und 9%.

Referenznutzungen und Gutschriften allgemein

Tabelle 30 zeigt die Emissionen der Referenznutzungen bzw. Gutschriften (Mittelwert der 41 Anlagen) bezogen auf 1 kWh_{el} der zugehörigen Anlagen. Für eine nähere Beschreibung der Standard-Referenznutzungen siehe Punkt 3.1.2.1 bzw. Tabelle 10. Abbildung 31 verdeutlicht die Ergebnisse grafisch.

Tabelle 30: Emissionen der Referenznutzungen und Gutschriften des Biogas-Systems für alle Wirkungskategorien bezogen auf 1 kWh_{el}

		REF NAWAROS	STABW	REF WD	STABW	REF AF	STABW	Gutschr. Wärme	STABW	Gutschr. Dünger	STABW	SUMME	STABW
	Einheit												
GWP	kg CO ₂ -eq.	-3,3E-02	3,6E-02	-1,8E-01	2,3E-01	-3,6E-01	5,1E-01	-1,2E-01	1,1E-01	-5,8E-02	9,6E-02	-7,5E-01	5,8E-01
ADP	kg Sb-eq.	-1,5E-04	1,2E-04	-4,2E-05	4,6E-05	-1,8E-04	2,6E-04	-8,6E-04	7,9E-04	-1,1E-04	1,8E-04	-1,3E-03	8,6E-04
AP	kg SO ₂ -eq.	-2,2E-04	2,1E-04	-5,4E-03	6,9E-03	-5,2E-03	7,5E-03	-3,3E-04	3,0E-04	-3,2E-04	5,2E-04	-1,1E-02	1,0E-02
EP	kg PO ₄ -eq.	-4,6E-05	4,2E-05	-1,0E-03	1,3E-03	-9,6E-04	1,4E-03	-3,8E-05	3,4E-05	-5,8E-05	9,5E-05	-2,1E-03	1,9E-03
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq.	-4,3E-06	2,9E-06	-2,1E-05	3,1E-05	-1,4E-05	1,7E-05	-2,3E-05	2,2E-05	-1,9E-06	3,2E-06	-6,5E-05	4,2E-05
ODP	kg CFC-11-eq.	-2,7E-09	2,0E-09	-7,5E-10	8,2E-10	-2,9E-09	4,1E-09	-1,5E-08	1,4E-08	-1,7E-09	2,7E-09	-2,3E-08	1,5E-08
HTP	kg 1,4-DCB-eq.	-2,1E-02	1,5E-02	-7,0E-03	7,6E-03	-1,6E-02	2,2E-02	-2,6E-02	2,4E-02	-9,2E-03	1,5E-02	-7,9E-02	4,0E-02
TETP	kg 1,4-DCB-eq.	-2,1E-04	1,5E-04	-2,4E-05	2,6E-05	-2,4E-04	3,5E-04	-5,8E-04	5,3E-04	-1,3E-04	2,1E-04	-1,2E-03	6,9E-04
FAETP	kg 1,4-DCB-eq.	-2,8E-03	1,9E-03	-7,9E-04	8,5E-04	-8,4E-04	1,2E-03	-2,5E-03	2,3E-03	-1,4E-03	2,2E-03	-8,3E-03	4,0E-03
MAETP	kg 1,4-DCB-eq.	-6,8E+00	5,2E+00	-2,3E+00	2,5E+00	-6,0E+00	8,6E+00	-2,1E+01	1,9E+01	-4,8E+00	7,9E+00	-4,1E+01	2,3E+01
LUC	m ² a ⁻¹	-4,2E-01	2,4E-01	-8,4E-01	1,0E+00	-3,0E-01	4,6E-01	-3,7E-02	3,4E-02	-1,0E-03	1,7E-03	-1,6E+00	1,2E+00

Die Referenznutzung Nachwachsende Rohstoffe (REF NAWAROS, dunkel-grün dargestellt) stellt die Flächennutzung jener Flächen, die für den Anbau der nachwachsenden Rohstoffe für die Biogasanlage verwendet werden, für die hypothetische Situation ohne Biogasanlage dar. Die Ergebnisse liegen für alle Wirkungskategorien leicht unter den Werten des Lebenszyklusabschnittes „Bereitstellung der NAWAROS“, was sich durch die Definition dieser Referenznutzung (20% der Fläche Brache, 80% Anbau derselben Kulturart) ergibt. Nur das GWP und das AP sind etwas höher, da in dieser Referenznutzung mit der Verwendung von synthetischem N-Dünger gerechnet wird, wenn die eingesetzte Menge an Wirtschaftsdünger für die ausreichende Düngung der jeweiligen Kulturart nicht ausreicht. (Die Emissionen der Lagerung und Ausbringung der unvergorenen Wirtschaftdünger bilden einen eigenen Lebenszyklusabschnitt.) Der Beitrag dieser Referenznutzung zu den gesamten, den Emissionen der Biogasanlage in Abzug zu bringenden, Referenznutzungen und Gutschriften liegt zwischen 1,8% und 33,9%. Am Niedrigsten ist er für die Wirkungskategorien AP und EP, gefolgt von den Wirkungskategorien GWP (4,4%) und POCP (6,7%). ADP und ODP liegen bei etwa 12%, die Toxizitätspotentiale liegen zwischen 17% und 34% und der Flächenbedarf bei ca. 26%.

Die Referenznutzung Wirtschaftsdünger (REF WD, braun dargestellt) bildet die Emissionen der unvergorenen Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger, die in der Biogasanlage verwertet werden, für die hypothetische Situation ohne Biogasanlage ab. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um Ammoniak-, Lachgas- und Methanemissionen sowie einen gewissen Ressourcenverbrauch für die Ausbringung der Wirtschaftsdünger. Diese sind besonders relevant in den Wirkungskategorien AP, EP GWP und POCP. Für die Ausbringung der Wirtschaftsdünger sind landwirtschaftliche Flächen erforderlich, was sich am hohen Anteil dieser Referenznutzung in der Wirkungskategorie Landnutzung widerspiegelt. In den Wirkungskategorien ADP, ODP sowie den Toxizitätspotentialen liegen die Emissionen der vergleichbaren Lebenszyklusabschnitte Gärrestlagerung und Gärrestausrückführung aus dem Biogasanlagensystem durchschnittlich 1,7-mal höher als die Emissionen aus dieser Referenznutzung. Dies liegt an der Tatsache, dass in den Biogasanlagen neben den Wirtschaftsdüngern auch nachwachsende Rohstoffe und Abfälle

mitvergoren werden, wodurch eine größere Menge an anfallendem Gärrest gelagert und ausgebracht werden muss, welche daher auch mehr Emissionen verursacht.

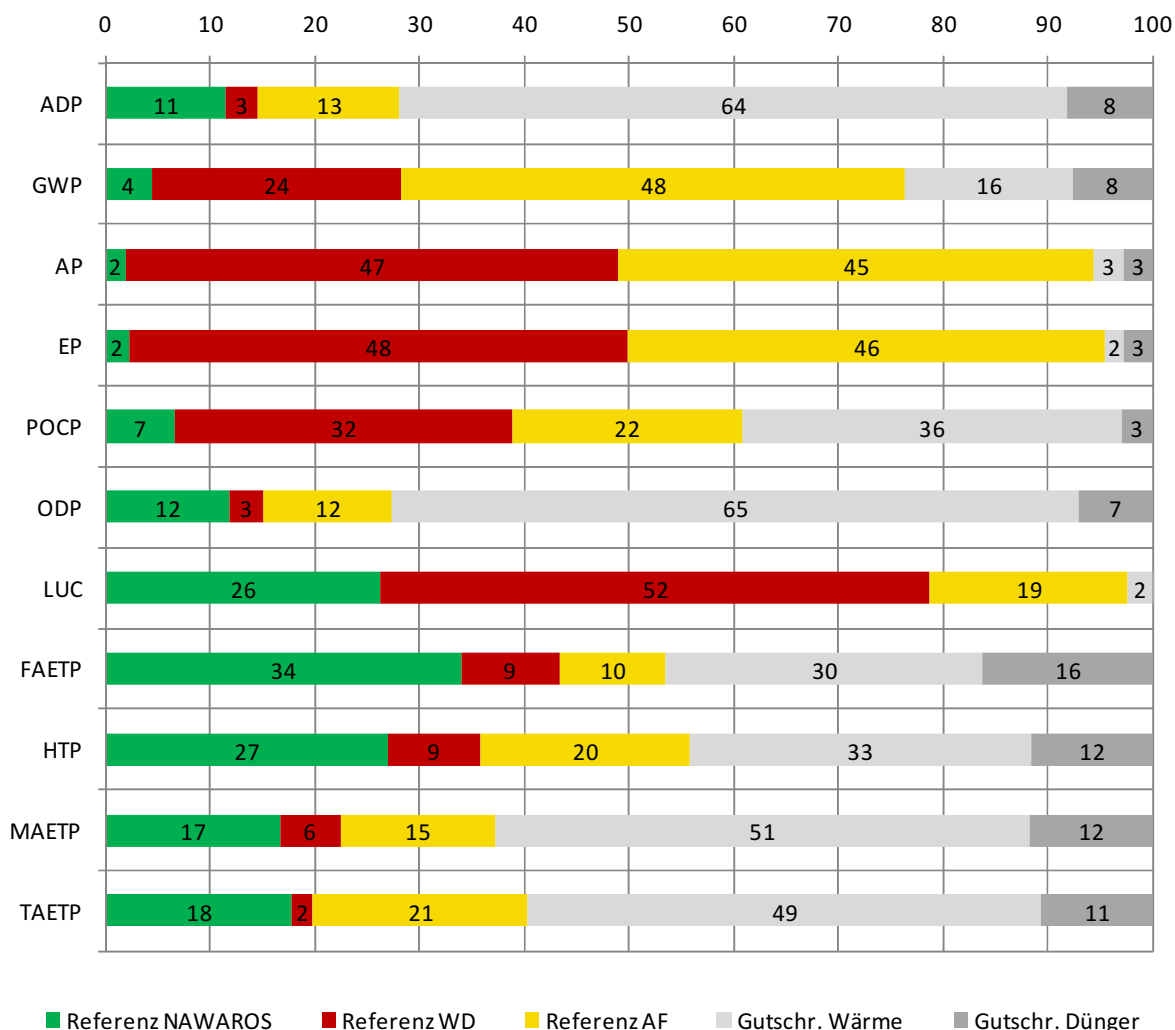


Abbildung 31: Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des „Biogas-Systems“ an den gesamten Gutschriften/Referenznutzungen in allen Wirkungskategorien.

Die Referenznutzung organische Reststoffe (REF AF, gelb dargestellt) stellt die Emissionen, die bei der Kompostierung bzw. Ausbringung des Kompostes der in der Biogasanlage verwerteten organischen Reststoffe bzw. Abfälle entstehen würden, für die hypothetische Situation ohne Biogasanlage dar. Es handelt sich dabei um Ammoniak-, Lachgas- und Methanemissionen sowie einen gewissen Energieverbrauch für die Kompostierung bzw. die Ausbringung des Kompostes. Daher trägt diese Referenznutzung wesentlich zu den Wirkungskategorien GWP (48,1%), POCP (21,9%), AP (45,3%) und EP (45,6%) bei, wobei der Beitrag dieser Referenznutzung zu den gesamten Referenznutzungen und Gutschriften auch für die weiteren Wirkungskategorien zwischen 12 und 20% liegt.

Mit der „Gutschrift Wärmenutzung“ (GS Wärme, hell-grau dargestellt) werden dem Biogas-System jene Emissionen gutgeschrieben, die entstehen würden, würde die von der Biogasanlage produzierte und genutzte Wärme, mit dem österreichischen Wärmemix 2005 bereitgestellt werden. (Siehe 3.2.8). Die Emissionen dieser Gutschrift sind im Vergleich zu den anderen Referenznutzungen/Gutschriften am Wesentlichsten für die Wirkungskategorien ODP(65,5%) und ADP (63,7%), sowie die Toxizitätspotentiale (30,3%-51,0%) und POCP

(36,2%) wobei in den unterschiedlichen Kategorien unterschiedliche Wärmebereitstellungstechnologien unterschiedlich stark zu diesem Ergebnis beitragen (siehe Abbildung 29 unter Punkt 3.2.8). Sind für die Kategorien ODP und ADP der Verbrauch fossiler Brennstoffe (wie Heizöl und Erd-/Naturgas) die wichtigsten Verursacher, so ist bei den Toxizitätspotentialen auch die Verbrennung von Brennholz wesentlich am gesamten Toxizitätspotential beteiligt. In der Wirkungskategorie POCP sind die fossilen Brennstoffe für 75% der Emissionen verantwortlich wobei hier die Brennstoffen Stein- und Braunkohle besonders starke Wirkung zeigen (mit einem Anteil von 1,44% bzw. 0,28% am energetischen Endverbrauch tragen sie mit 34% bzw. 5% zu dieser Wirkungskategorie bei).

Die „Gutschrift Dünger“ gleicht die Stickstoffbilanz des Biogassystems mit jener der Referenznutzungen ab: steht im Biogassystem durch die Ausbringung des Gärrestes mehr Stickstoff für die Düngung zur Verfügung als durch die Referenznutzung (Ausbringung der Wirtschaftsdünger sowie der kompostierten organischen Abfälle) wird eine Gutschrift für die Herstellung und Ausbringung synthetischen N-Düngers gegeben. Für den Fall, dass durch die Referenznutzung mehr Stickstoff für die Düngung zur Verfügung steht, werden die Aufwendungen und Emissionen der synthetischen N-Dünger Produktion und Ausbringung dem Biogassystem angelastet. Tatsächlich treten bei den 41 untersuchten Anlagen beide Fälle auf: bei 13 Anlagen steht durch die Referenznutzung mehr Stickstoff für die Düngung zur Verfügung als im Biogassystem, bei den übrigen 28 Anlagen steht im Biogassystem mehr Stickstoff für die Düngung zur Verfügung sodass eine Gutschrift für die synthetische Düngerproduktion und Ausbringung erteilt werden kann, wodurch sich auch im Mittelwert aller 41 Anlagen eine Gutschrift ergibt. Der Beitrag der „Gutschrift Dünger“ zu den gesamten Referenznutzungen und Gutschriften liegt zwischen 0,1 und 16,3%. Am größten ist er für die Toxizitätspotentiale.

Leseanleitung für die Abbildung 32 bis Abbildung 42: In den folgenden Abbildungen sind die Emissionen bzw. Referenznutzungen und Gutschriften aller untersuchten Anlagen sowie die resultierende Differenz (schwarzer Balken) als Säulendiagramm dargestellt. Diese Darstellung soll nicht einem genauen Ablesen der Wirkungsindikatorergebnisse für jeden einzelnen Lebenszyklusabschnitt dienen, sondern soll einerseits die Spannweite der möglichen Ergebnisse verdeutlichen und andererseits den Einfluss besonderer, anlagenspezifischer Inputparameter auf das Gesamtergebnis verdeutlichen (Anlagen mit einem schwarzen Pfeil markiert). Die „besten“ bzw. „schlechtesten“ Anlagen sind mit grünen bzw. roten Pfeilen markiert. Zusätzlich ist in 2 Tortendiagrammen die Zusammensetzung des Wirkungsindikatorergebnisses hinsichtlich der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte für den Mittelwert aller Anlagen separat für die Emissionen und Gutschriften (und Referenzsysteme) dargestellt.

Verbrauch abiotischer Ressourcen (ADP)

Wie bereits erwähnt tragen im Mittelwert der untersuchten Anlagen die Lebenszyklusabschnitte Produktion nachwachsender Rohstoffe, Transport, Infrastruktur sowie BHKW zu etwa gleichen Teilen (ca. 20%) sowie die Abschnitte Betrieb der Anlage und Gärrestausbringung etwas geringer zu dieser Wirkungskategorie bei (siehe auch Abbildung 32). Hauptquellen für diese Wirkungskategorie sind die Verwendung fossiler Brennstoffe und die Herstellung von Baumaterialien bzw. landwirtschaftlichen Maschinen. Da die in dieser Arbeit untersuchten Anlagen fast ausschließlich Gärreste als Dünger verwenden, ist die Herstellung

von synthetischem Dünger, welche normalerweise einen hohen Verbrauch abiotischer Ressourcen benötigt, für das Gesamtergebnis nicht relevant.

Bei der Betrachtung der detaillierten Emissionsprofile der 41 untersuchten Anlagen fällt auf, dass der Beitrag der Produktion der nachwachsenden Rohstoffe zu den Gesamtemissionen zwar abhängig vom Anteil NAWAROs am Substratmix schwankt, jedoch in etwa dem angegebenen Mittelwert entspricht. Für die Lebenszyklusabschnitte Transport, Infrastruktur und BHKW treten jedoch sehr unterschiedliche Werte für die verschiedenen Anlagen auf.

Bei Anlagen, bei denen die durchschnittliche Transportdistanz von 9,7 km bei Weitem überschritten wird z.B. Anlage 12 (31,5km), Anlage 15 (29,7km), Anlage 24 (45,2km), Anlage 28 (59,9km) und Anlage 29 (73,8km)) kann dieser Lebenszyklusabschnitt bis zu 80% des ADP ausmachen. Bei der näheren Betrachtung der Anlagen konnte festgestellt werden, dass Anlagen die hauptsächlich organische Abfälle als Substrate verwenden (>50% des Substratmixes) durchschnittlich höhere Transportdistanzen aufweisen (Mittelwert: 36,7 km).

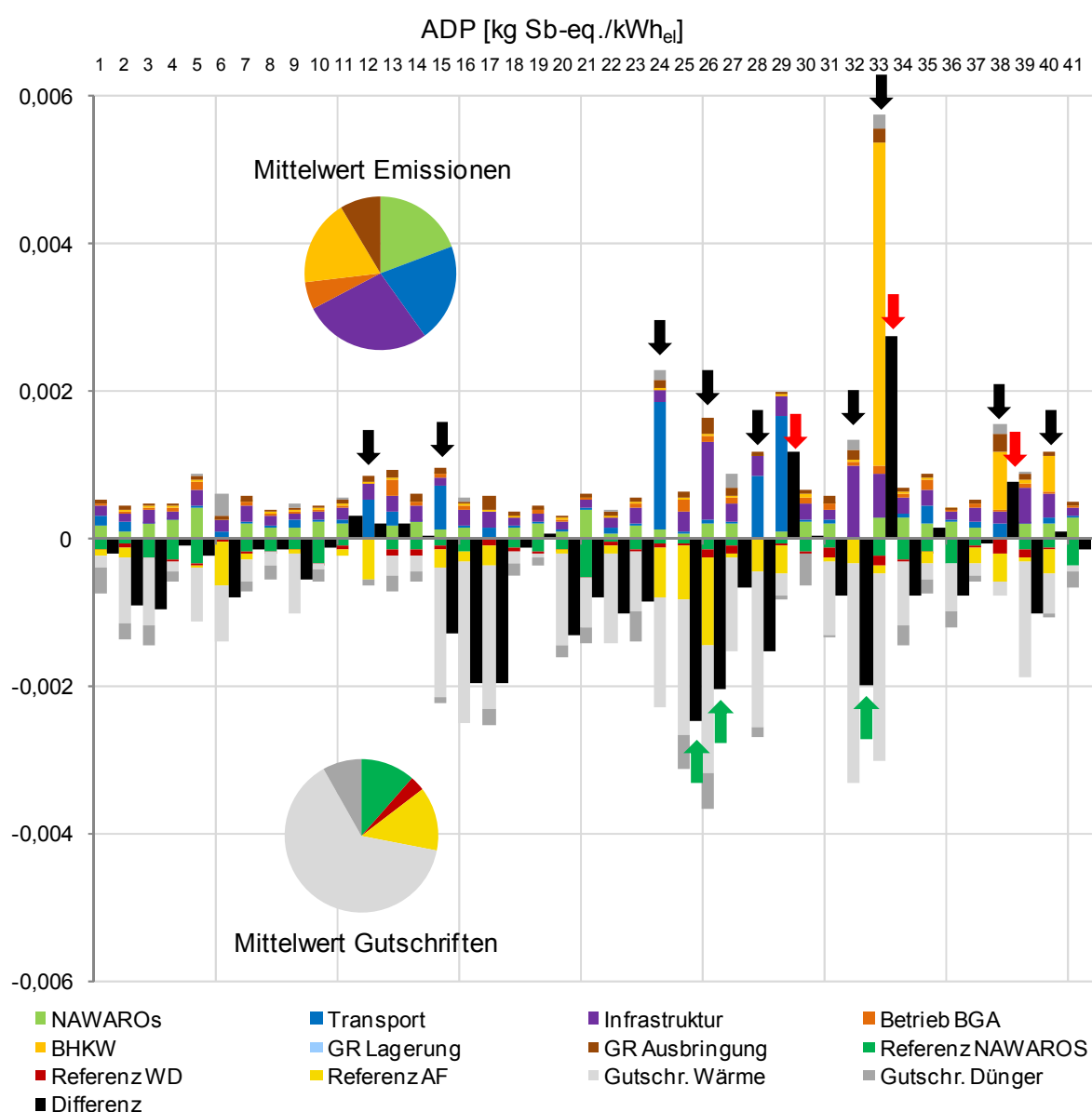


Abbildung 32: Detaillierergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie Verbrauch abiotischer Ressourcen für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Der Beitrag des Lebenszyklusabschnittes Infrastruktur zum ADP ist z.B. für die Anlagen 26, 32 und 33 bedeutend höher als für die übrigen Anlagen. Hier wird der unter Punkt 3.2.6 bereits erwähnte Umstand sichtbar, dass der Verbrauch abiotischer Ressourcen je kWh produzierten Stroms umso größer ist, je kleiner die elektrische Nennleistung der Anlagen ist (installierte Leistung der Anlagen: 48, 45 und 36 kW respektive). Wird nun zusätzlich ein Fermenter aus Stahl verwendet (Anlagen 26 und 32) kann der Beitrag der Infrastruktur zum ADP bis zu 80% betragen. Eine Ausnahme zu diesem Zusammenhang bildet Anlage 17: obwohl sie nur 18 kW elektrische Nennleistung aufweist und einen Stahl-Fermenter verwendet, fällt bei ihr der Anteil der Infrastruktur nicht so stark ins Gewicht.

Die Unterschiede in den Beiträgen des Lebenszyklusabschnittes BHKW zum ADP sind jedoch am größten: Auffallend hoch ist der Beitrag bei den Anlagen 33, 38 und 40. Ursache für diesen hohen Anteil ist die Tatsache, dass diese 3 Anlagen Zündstrahl-BHKWs verwenden, welche während des Betriebs einen kontinuierlichen Treibstoff-Verbrauch aufweisen. Für diese Anlagen liegt der Beitrag des BHKWs zum ADP bei bis zu 80% im Gegensatz zu den übrigen, mit Gasmotoren betriebenen BHKWs, bei denen der Anteil zum ADP nur bei etwa bei 3% (verursacht durch den Verbrauch an Schmierstoffen) liegt.

Für die Referenznutzungen / Gutschriften ergeben sich die unterschiedlichen Ergebnisse aus dem unterschiedlichen Substratmix sowie der unterschiedlichen Menge an genutzter Wärme, wobei die Wärmenutzung den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Es ist zu beobachten, dass die Bilanz für den Verbrauch abiotischer Ressourcen negativ wird (Einsparung von Ressourcen), sobald der thermische Nutzungsgrad der Anlage 5% übersteigt, sofern nicht andere, die Bilanz besonders belastende Umstände (z.B. Verwendung eines Zündstrahlmotors, überdurchschnittlich hohe Transportdistanz) oder besonders entlastende Umstände (hohe Gutschrift Dünger bzw. Referenznutzung org. Reststoffe) hinzukommen.

Der Lebenszyklusabschnitt „Gutschrift Dünger“ ist wie bereits erwähnt teilweise auf der Emissions- teilweise auf der Gutschriften-Seite zu finden. Bei den 13 Anlagen, bei denen diese „Gutschrift Dünger“ dem Biogas-System angelastet wird, handelt es sich durchwegs um Anlagen die unter 40% NAWAROs als Substrat einsetzten. Allgemein lässt sich der Trend beobachten, dass die Gutschrift für den synthetischen Dünger umso höher ist, je höher der Anteil an NAWAROs am eingesetzten Substratmix ist. Dies erscheint logisch, da in der Referenznutzung die Substrate Wirtschaftsdünger und organische Abfälle ebenfalls zur Düngung zur Verfügung stehen, die nachwachsenden Rohstoffe die auf den Referenzflächen angebaut werden (Tierfutter, Nahrungsmittel) gelangen in der Referenznutzung im Gegensatz zum Biogassystem, wenn überhaupt, dann nur über Umwege, die nicht innerhalb der Systemgrenzen dieser Untersuchung liegen, wieder als Dünger auf die Felder zurück. Daher ergeben sich für Biogasanlagen, die einen großen Anteil NAWAROs im Substratmix aufweisen, tendenziell größere Gutschriften für „eingesparten“, synthetischen N-Dünger.

Insgesamt am schlechtesten schneiden die Anlagen 33, 29 und 38 ab, wobei für die Anlagen 33 und 38 der hohe Verbrauch abiotischer Ressourcen im Zündstrahlmotor und bei Anlage 29 der überdurchschnittlich lange Transportweg für dieses Ergebnis verantwortlich sind. Die Anlagen 25, 26 und 32 schneiden am besten ab. Diesen Anlage ist gemein, dass sie einen hohen thermischen Nutzungsgrad (>30%) aufweisen (es handelt sich um eher kleinere Anlagen, bei denen die Nutzung eines hohen Anteils der produzierten Wärme leichter zu bewerkstelligen ist). Alle drei Anlagen weisen weiters einen hohen Anteil an organ.

Reststoffen im Substratmix auf, sodass auch eine relativ hohe Gutschrift für die Referenznutzung der organischen Reststoffe angerechnet werden kann. Interessanterweise fallen gerade die Anlagen 26 und 32 durch einen großen Verbrauch abiotischer Ressourcen für die Bereitstellung der Infrastruktur auf, dieser kann durch die hohen Gutschriften jedoch mehr als kompensiert werden.

Treibhauspotential (GWP)

Wie in Abbildung 33 dargestellt ist, sind die Lebenszyklusabschnitte, die am meisten zum Treibhauspotential beitragen die Gasverwertung im BHKW sowie die Gärrestlagerung und -ausbringung auf der Emissionsseite bzw. die Gutschriften für die Referenznutzung organischer Reststoffe, die Referenznutzung der Wirtschaftsdünger und die Wärmenutzung auf der anderen Seite.

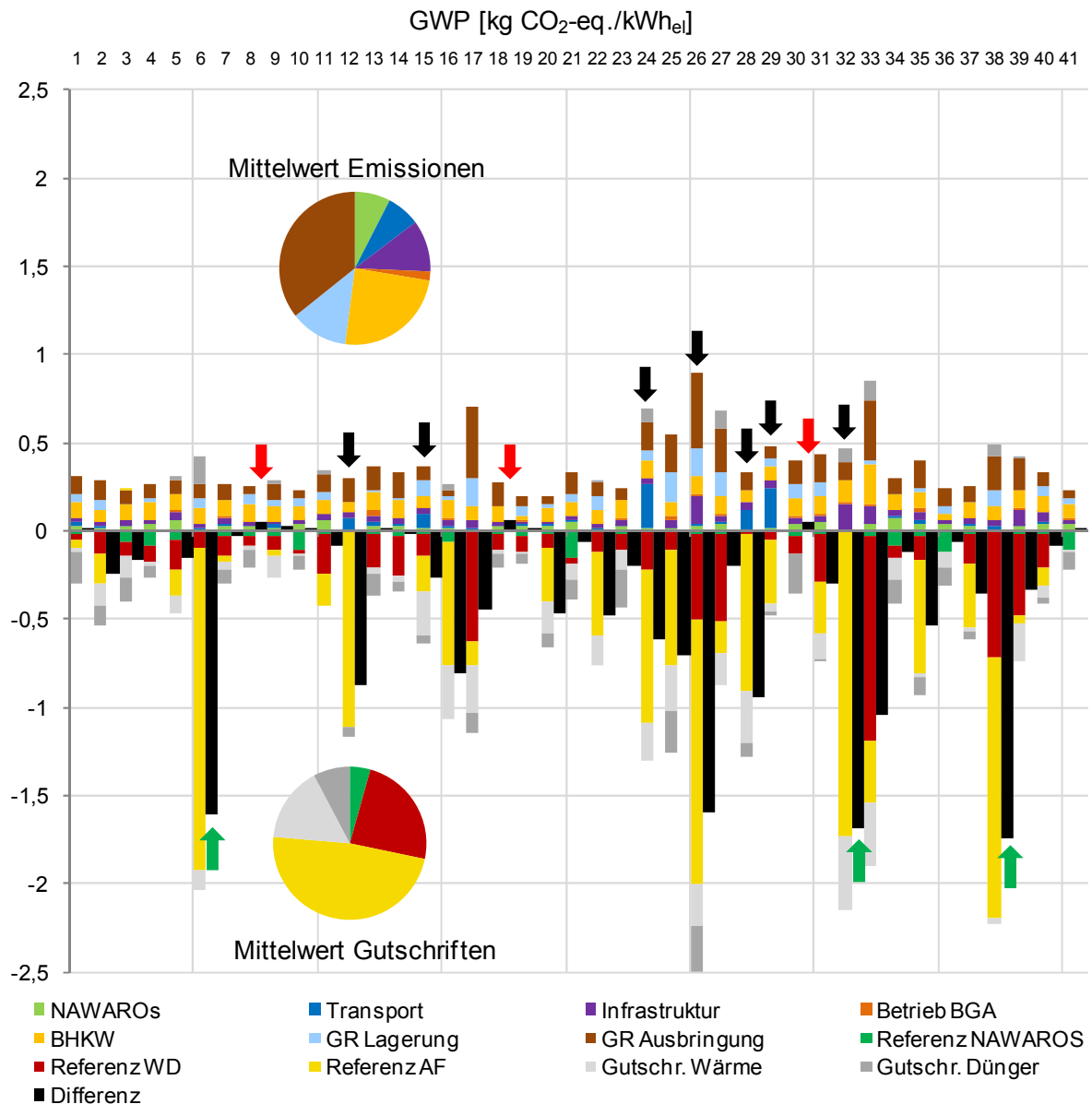


Abbildung 33: Detailliergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie Treibhauspotential für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Die Hauptursache für das GWP des Lebenszyklusabschnittes BHKW ist der sogen. Methanschlupf (unverbranntes Methan im Abgas des BHKW), welcher in Abhängigkeit der Methankonzentration im Biogas berechnet wurde und für die betrachteten Anlagen zwischen 0,4% und 1,8% der produzierten Biogasmenge liegt (siehe auch Abbildung 34). Der Einfluss des hier gewählten Berechnungsmodells wird in der Sensitivitätsanalyse näher diskutiert.

Die Gärrestlagerung trägt im Durchschnitt ca. 12,2% zum Treibhauspotential bei, wobei davon ca. 7,8% vom Methan und ca. 4,5% vom Lachgas stammen (siehe Abbildung 34). Im Falle eines gasdicht abgedeckten Endlagers sinken diese Emissionen auf null (Anlagen 5, 12, 18, 23, 29, 32, 39), im Falle eines offenen Endlagers sind die Methanemissionen von der hydraulischen Verweilzeit (HRT) des Systems abhängig. Je kürzer die HRT, desto mehr organische Trockensubstanz verbleibt im Gärrest, welche dort zu Methan abgebaut und in die Atmosphäre emittiert wird (z.B. Anlage 17 (48 Tage HRT), Anlage 25 (44 Tage HRT)). Die Geschwindigkeit dieses Abbaus ist durch den Luftzutritt an der Oberfläche und die niedrigere Temperatur zwar geringer als im Fermenter, jedoch nicht zu vernachlässigen und liegt für die betrachteten Anlagen mit offenem Endlager zwischen 0,5 und 1,5% der produzierten Methanmenge. An dieser Stelle wird auch darauf hingewiesen, dass in der „CML-2001“-Wirkungsabschätzungs-Methode, die für die vorliegende Arbeit verwendet wurde, NH_3 -Emissionen kein Treibhauspotential zugewiesen wird. Nach den IPCC Richtlinien 2006 werden Ammoniakemissionen in die Luft jedoch ein „indirektes“ Treibhauspotential zugewiesen. Die Auswirkungen dessen werden in der Sensitivitätsanalyse diskutiert.

Der Beitrag der Gärrestausrückführung zum Treibhauspotential ist mit 35,7% ebenfalls beachtlich. Zu diesem Ergebnis tragen die Lachgasemissionen 32,8%, CO_2 -Emissionen durch den Treibstoffverbrauch bei der Gärrestausrückführung ca. 2,8% und Methanemissionen ca. 0,1% bei (siehe auch Abbildung 34). Da die Lachgasemissionen das Gesamtergebnis so stark beeinflussen wird der Einfluss der Wahl der Emissionsfaktoren in der Sensitivitätsanalyse gesondert behandelt.

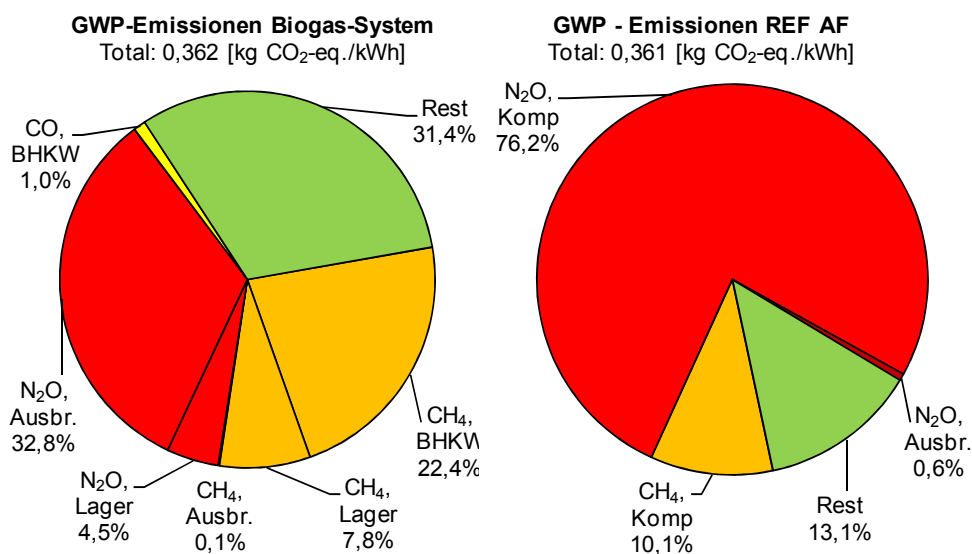


Abbildung 34: Anteil einzelner Substanzen an den Gesamtemissionen des Biogas-Systems bzw. der Referenznutzung organischer Abfälle für die Wirkungskategorie GWP.

Teilweise ist auch der Beitrag der Bereitstellung der Infrastruktur erheblich, wobei es sich dabei wieder um Anlagen mit verhältnismäßig kleiner elektrischer Nennleistung handelt (Anlagen 26, 32 und 33) genauso wie der Beitrag des Transportes bei Anlagen mit vergleichsweise hoher Transportdistanz (Anlagen 12, 15, 24, 28 und 29).

Die durchschnittliche Gutschrift für die Referenznutzung der organischen Reststoffe (Kompostierung), ebenfalls bezogen auf die in der Biogasanlage produzierte Strommenge, ist für das Treibhauspotential fast genau so groß wie die gesamten durchschnittlichen Emissionen der Biogasanlagen (siehe Tabelle 29 und Tabelle 30). Hauptverantwortlich dafür sind die Lachgasemissionen (76,2%) sowie die Methanemissionen (10,1%), die während der Kompostierung entstehen (siehe Abbildung 34). Der Abschnitt „Rest“ beinhaltet CO₂-Emissionen fossilen Ursprungs (Energieverbrauch) sowie weitere treibhauswirksame Emissionen, die als „ökologischer Rucksack“ aus vorgelagerten Prozessen mit berücksichtigt werden. Die Gutschrift für die Referenznutzung der organischen Reststoffe fällt besonders hoch aus, wenn die organischen Reststoffe einen hohen Anteil am Substratmix stellen. Weiters sind die Stickstoff und damit auch die Lachgasemissionen vom C/N-Verhältnis des Substrates abhängig (siehe 3.2.7), wodurch sich für stickstoffreiche Substrate besonders hohe Emissionen in dieser Wirkungskategorie ergeben.

Das Treibhauspotential der Referenznutzung Wirtschaftsdünger variiert je nach Anteil der Wirtschaftsdünger am Substratmix sowie abhängig vom Stickstoff- bzw. Ammoniumstickstoffgehalt der Wirtschaftsdünger sowie der unterstellten Ausbringmethode. Allgemein liegt es etwas höher (ca. 5%) als für die vergleichbaren Lebenszyklusabschnitte der Biogasanlage (Gärrestlagerung und -ausbringung). Dies liegt an den verringerten Methanemissionen des Biogassystems gegenüber der unvergorenen Wirtschaftsdüngerlagerung. Diese vermiedenen Methanemissionen könnten das GWP noch stärker mindern, würden sich nicht die Lachgasemissionen, welche einen großen Einfluss auf das GWP haben, aufgrund des erhöhten N-Gehaltes im Biogas-System (im Gärrest), gegenüber den Emissionen aus den unvergorenen Wirtschaftsdüngern erhöhen.

Insgesamt schneiden die Anlagen 38, 33 und 6 am besten ab. Das gute Abschneiden lässt sich mehr auf die Kombination von hohen Gutschriften für die Referenznutzung organischer Reststoffe sowie die Referenznutzung Wirtschaftsdünger, denn auf eine optimale Anlagenführung zurückführen. Der Anteil nachwachsender Rohstoffe am Substratmix liegt für die Anlagen 6 und 38 bei 0%, für Anlage 33 bei 10%. Ohne Beachtung der Gutschriften weist Anlage 19 die niedrigsten Treibhausgas-Emissionen (0,199 kg CO₂-eq./kWh_{el}) auf. Das gute Abschneiden lässt sich nur durch den hohen elektrischen Wirkungsgrad (39,2%) und keine weiteren Besonderheiten erklären.

Am schlechtesten scheiden die Anlagen 18, 30, und 8 ab. Das schlechte Ergebnis liegt ebenfalls weniger an einer besonders schlechten Anlagenführung, sondern mehr an der geringen Wärmenutzung (0 bis 4% der produzierten Wärme) in Kombination mit einer fehlenden Gutschrift für die Referenznutzung organischer Reststoffe, da alle drei Anlagen zum Großteil nachwachsende Rohstoffe und zusätzlich Wirtschaftsdünger einsetzen. Anlage 26 (0,899 kg CO₂-eq./kWh_{el}) weist ohne Beachtung der Gutschriften die höchsten Emissionen auf. Das schlechte Abschneiden lässt sich durch die Anlagengröße (P_{inst}: 48 kW_{el}), dem geringen elektrischen Wirkungsgrad (28%) und den Einsatz eines Stahlfermenters (Beitrag der Infrastruktur steigt) sowie erhöhte Lachgasemissionen aufgrund der Gärrestausbringung mittels Injektionstechnik erklären.

Versauerung (AP) und Eutrophierung (EP)

Versauerung und Eutrophierung werden gemeinsam diskutiert, da die Reihung der Anlagen sowie der Ursprung der Belastungen sehr ähnlich sind.

Wie aus Abbildung 35 schnell zu erkennen ist, sind die Hauptverursacher der Versauerung sowie der Eutrophierung die Lebenszyklusabschnitte Gärrestausbringung, Gasverwertung im BHKW sowie in manchen Fällen die Gärrestlagerung. Auf Seite der Gutschriften machen die Referenznutzungen der organischen Reststoffe sowie der Wirtschaftsdünger den Hauptteil der Gutschriften aus.

Im Falle der Gärrestausbringung ist die verursachende Substanz fast ausschließlich Ammoniak, welcher bei der Ausbringung des Gärrestes unvermeidlich in die Atmosphäre emittiert wird (siehe auch Abbildung 36). Wie bereits erwähnt hat die Ausbringtechnik einen großen Einfluss auf die Ammoniakemissionen. Bei den betrachteten Anlagen wird der Gärrest zu ca. 60% mit dem Breitverteiler ausgebracht, ca. 35% verwenden die emissionsreduzierende Schleppschlauch-Technik und ca. 5% die Injektionstechnik, welche zwar bei den Ammoniakemissionen die größte Reduktion bewirkt, auf der anderen Seite jedoch die Lachgasemissionen verdreifacht, was sich auf das Treibhauspotential negativ auswirkt. Welche Auswirkungen eine 100%ige Ausbringung der Gärreste mit der Schleppschlauch-technik hätte, wird im Kapitel Verbesserungspotentiale diskutiert.

Für den Lebenszyklusabschnitt Gärrestlagerung sind die Ammoniakemissionen aus dem offenen Endlager die Verursacher der versauernden bzw. eutrophierenden Wirkung (da bei einem gasdicht geschlossenen Endlager von 0 Emissionen ausgegangen wird) (siehe Abbildung 36). Von den 41 betrachteten Anlagen verfügen 22 über ein teilweise gasdicht geschlossenes Endlager, wobei dieses nur in 7 Fällen das einzige Endlager ist. 19 Anlagen verfügen ausschließlich über offene Endlager, wobei davon 2 als Lagunen ausgeführt sind.

Die Anlagen 17, 25, 26, 27 und 38 weisen im Vergleich zu den anderen Anlagen hohe Emissionen aus der Gärrestlagerung auf, was durch besonders große Oberflächen der offenen Gärrestendlager und/oder lange Verweilzeiten in den offenen Endlagern erklärt werden kann. Der Einfluss der Wahl bzw. der Unsicherheit der Emissionsfaktoren auf das Gesamtergebnis wird in der Sensitivitätsanalyse behandelt.

Allgemein sind die Emissionen der Gärrestlagerung und –ausbringung (Biogassystem) in den Kategorien AP und EP ca. 1,5-mal so groß wie jene der Referenznutzung Wirtschaftsdünger. Dies lässt sich durch erhöhte Ammoniakemissionen bedingt durch die veränderten Eigenschaften des Gärrestes gegenüber der Wirtschaftsdünger (erhöhter Ammoniumstickstoffgehalt, erhöhter pH-Wert, siehe auch Punkt 3.2.5.1 bzw. 3.2.5.2) sowie durch eine insgesamt größere N-Menge im System durch das Einbringen weiterer Substrate (NAWAROs, Abfälle) erklären.

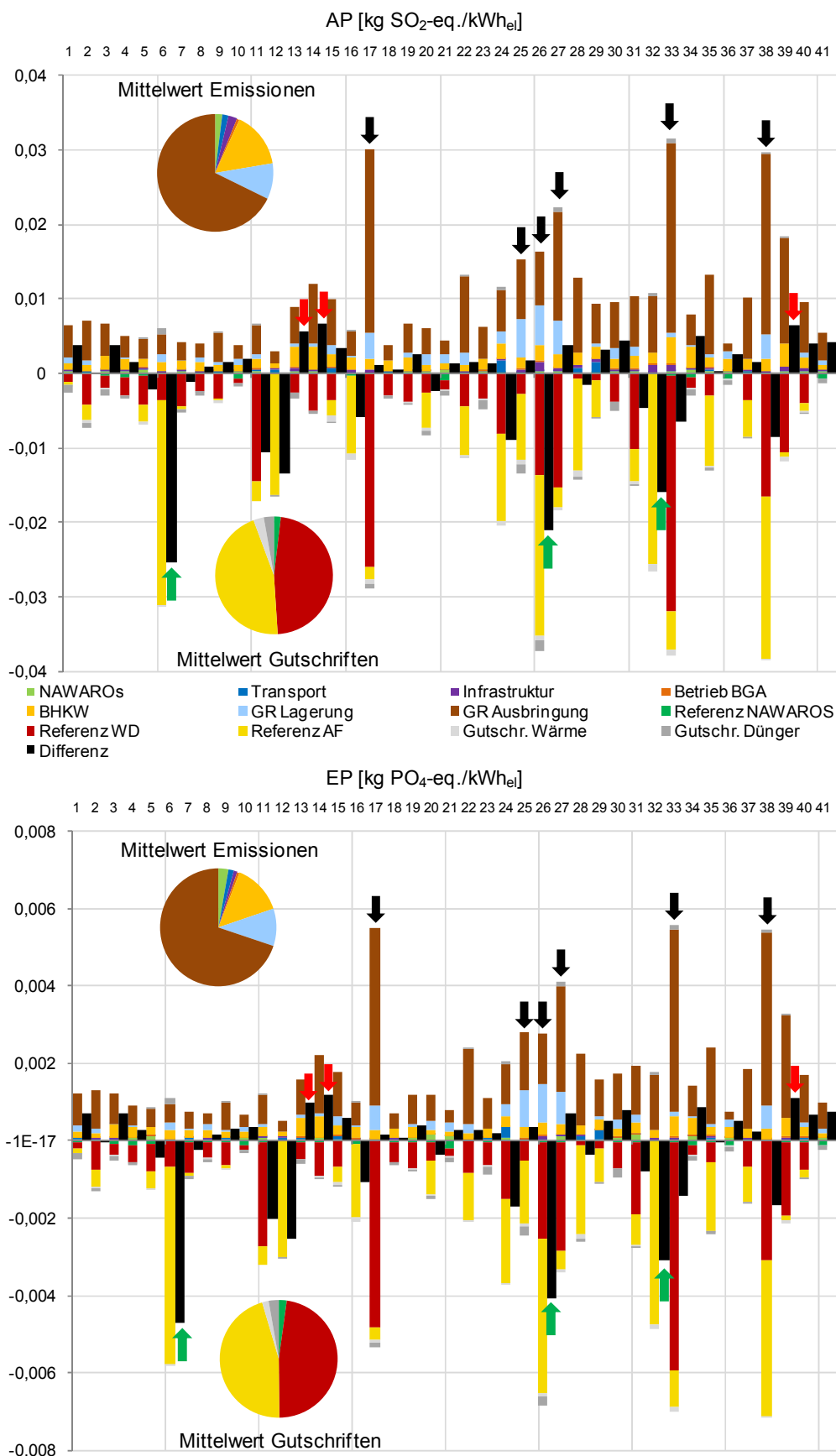


Abbildung 35: Detaillierergebnisse des Biogas-Systems in den Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Im Lebenszyklusabschnitt BHKW sind die NO_x - (AP und EP) bzw. SO_2 – Emissionen (AP) die bei der Verbrennung entstehen verantwortlich für die versauernde bzw. eutrophierende Wirkung (siehe Abbildung 36).

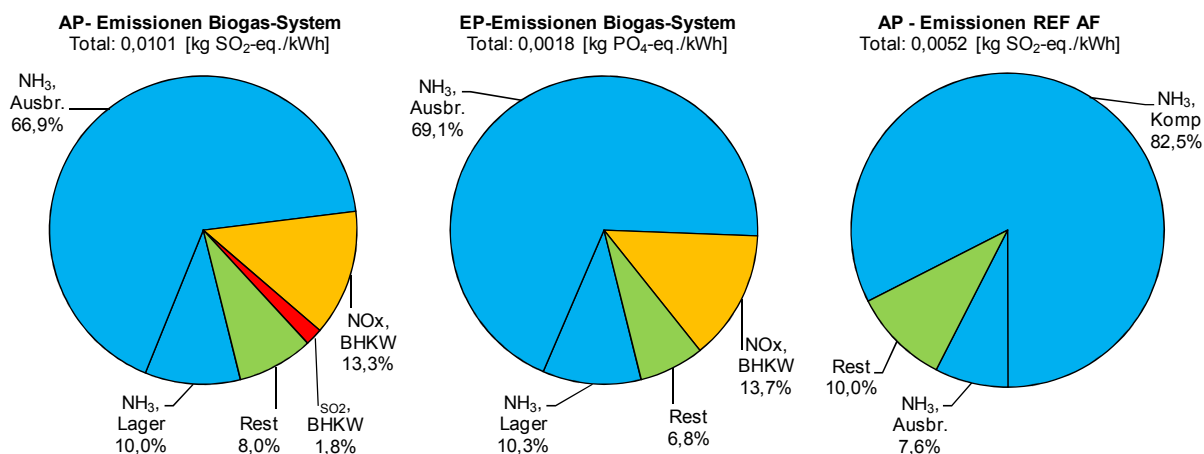


Abbildung 36: Anteil verschiedener Substanzen an den Gesamtemissionen des Biogas-Systems bzw. an den Emissionen der Referenznutzung organischer Reststoffe für die Wirkungskategorien AP bzw. EP.

Das Versauerungs- und Eutrophierungspotential der Referenznutzung organischer Reststoffe liegt in der gleichen Größenordnung wie die Emissionen der Referenznutzung Wirtschaftsdünger. Die für die Versauerung und Eutrophierung hauptverantwortliche Substanz ist Ammoniak. Der Großteil (82,5% AP) des emittierten Ammoniaks entsteht bei der Kompostierung selbst, weitere 6,7% (AP) entstehen bei der Ausbringung des Kompostes. Siehe Abbildung 36. Der Abschnitt „Rest“ beinhaltet wiederum Emissionen mit versauernder Wirkung, die als „ökologischer Rucksack“ aus vorgelagerten Prozessen mit berücksichtigt wurden.

Am besten schneiden die Anlagen 6, 26 und 32 ab. Diesen Anlagen ist gemein, dass ihr Substratmix einen hohen Anteil an organischen Reststoffen sowie Wirtschaftsdünger aufweist (und daraus resultierend eine hohe Gutschriften für die Referenznutzungen). Anlage 6 verwendet zu 100% die Schleppschlauch-Ausbringungs-Methode (40%ige Reduktion der Ammoniakemissionen), Anlage 26 verwendet teilweise die Schleppschlauch- und teilweise die Injektionstechnik. Ohne Beachtung der Gutschriften würde Anlage 12 am besten abschneiden: sie verfügt über ein gasdicht geschlossenes Endlager und wendet sowohl die Schleppschlauch- (50%) als auch die Injektionstechnik (50%) an.

Die Anlagen 14, 39 und 13 schneiden im Vergleich am schlechtesten ab. Die schlechten Ergebnisse lassen sich vor allem durch die Zusammensetzung des Substratmixes (eher hoher Anteil NAWAROS und keine organischen Reststoffe) und dadurch keine oder geringe Gutschriften für die Referenznutzungen erklären. Ohne Beachtung der Gutschriften würde Anlage 17 am schlechtesten Abschneiden. Sie weist besonders hohe Emissionen aus der Gärrestausrückführung auf, welche durch einen hohen Ammoniumstickstoffgehalt im Gärrest zu erklären sind.

Photochemisches Oxidantienbildungspotential (POCP)

Wie in Abbildung 37 auf den ersten Blick zu erkennen ist, trägt der Lebenszyklusabschnitt Gasverwertung im BHKW am meisten zum POCP bei, wobei die CO , CH_4 und SO_2 -Emissionen, die bei der Verbrennung des Biogases entstehen hauptverantwortlich für das gesamte POCP sind. Ebenfalls wichtig sind die Lebenszyklusabschnitte Infrastruktur sowie in

einigen Fällen Transport. Auf der Gutschriftenseite tragen die Gutschriften für die Wärmenutzung und die Referenznutzungen von Wirtschaftsdünger und organischen Reststoffen am meisten zum POCP bei, wobei bei den beiden letzteren Methanemissionen die Hauptquelle dieses Wirkungspotentials darstellen.

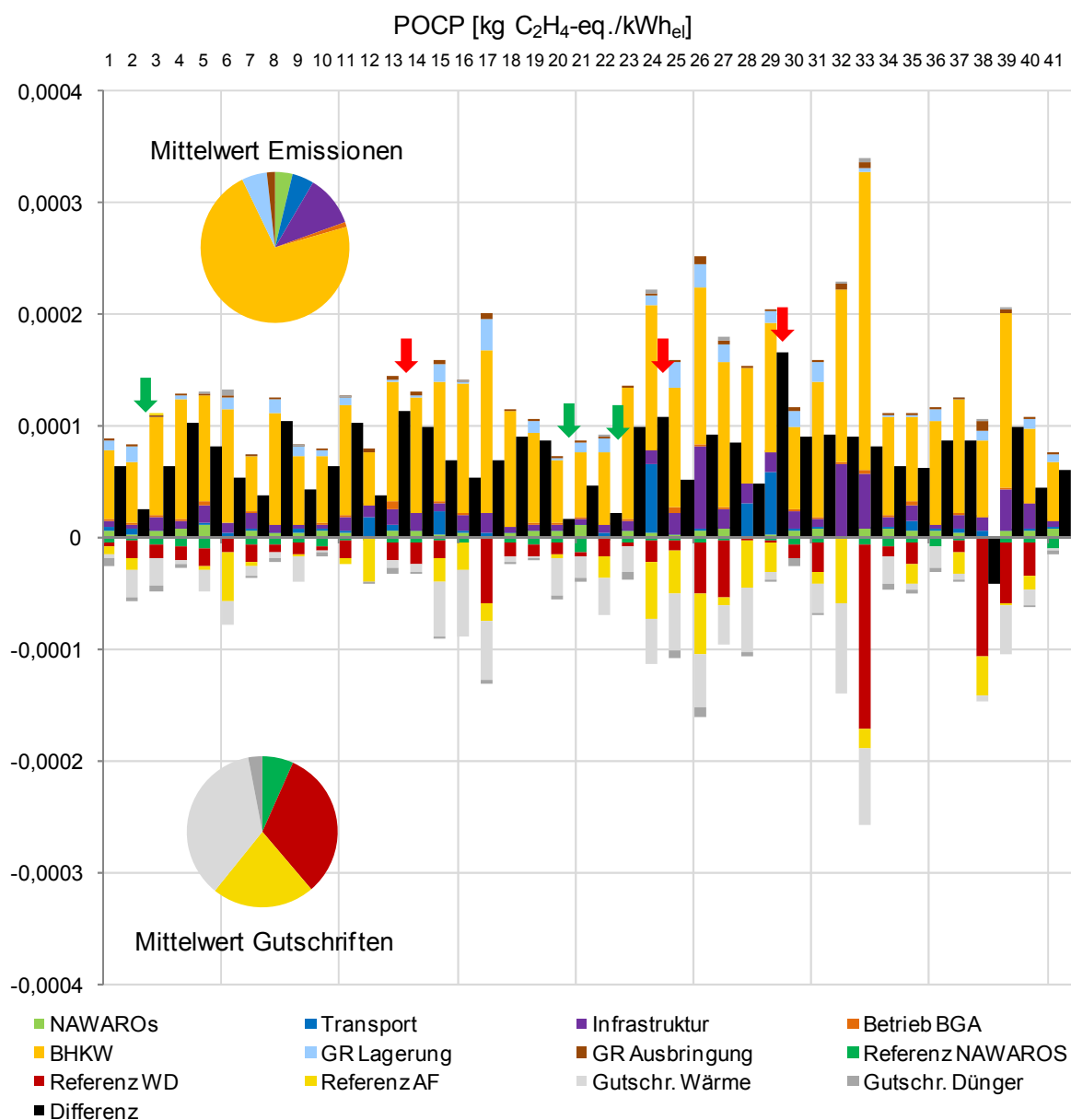


Abbildung 37: Detaillierergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie photochemisches Oxidantienbildungspotential für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Bei dieser Wirkungskategorie sind wieder die negativen Auswirkungen großer Transportdistanzen (Anlagen 12, 15, 24, 28 und 29) sowie kleiner elektrischer Nennleistungen bezüglich des Anteils der Infrastruktur am gesamten POCP (Anlagen 26, 32, 33, 39 und 40) zu erkennen.

Das POCP ist für die Referenznutzung Wirtschaftsdünger durchschnittlich ca. doppelt so groß wie für die entsprechenden Lebenszyklusabschnitte des Biogassystems (Gärrestlagerung und –ausbringung). Dies lässt sich durch die verringerten Methanemissionen des Biogasanlagensystems vor allem bei der Lagerung erklären, da dort der Großteil der

organischen Trockenmasse im Fermenter bzw. geschlossenen Endlager abgebaut wird, wohingegen in der Referenznutzung die unvergorenen Wirtschaftsdünger meist offen gelagert werden.

Bezüglich der Emissionen aus dem BHKW konnte beobachtet werden, dass bei höheren elektrischen Wirkungsgraden des BHKWs, das photochemische Oxidantienbildungspotential geringer ausfällt (siehe Abbildung 38).

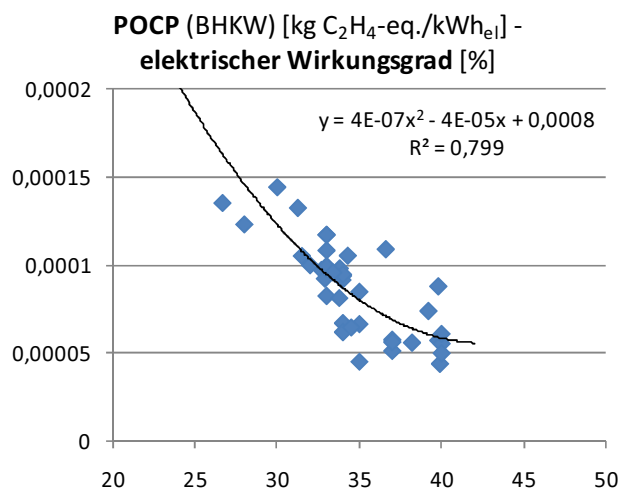


Abbildung 38: Abhängigkeit des POCP des BHKWs vom elektrischen Wirkungsgrad

Diese Wirkungskategorie ist eine der wenigen, bei der sich für keine der Anlagen ein Einsparungspotential für das Biogassystem im Vergleich zu den Referenzsystemen ergibt. Am besten schneiden die Anlagen 20, 22 und 2 ab. Das gute Abschneiden lässt sich durch eine Kombination aus niedrigen Emissionen aus dem BHKW (hoher Methangehalt im Biogas und dadurch geringer Methanschlupf sowie hoher elektrischer Wirkungsgrad) und einer guten Wärmenutzung (hohe Gutschrift) erklären. Ohne Beachtung der Gutschriften würde Anlage 7 am besten abschneiden.

Am schlechtesten schneiden die Anlagen 29, 13 und 24 ab. Bei diesen Anlagen summieren sich vergleichsweise hohe Emissionen aus dem BHKW (Anlage 13 weist eine Methankonzentration im Biogas von 49% auf, womit ein hoher Methanschlupf (1,7% des produzierten Methans) verbunden ist) mit hohen Emissionen aus anderen Lebenszyklusabschnitten wie z.B. dem Transport (Anlagen 29 und 24) und geringen Gutschriften für die Wärmenutzung (bei Anlagen 13 und 29 unter 5%). Ohne Beachtung der Gutschriften würde Anlage 33 am schlechtesten abschneiden, welche sehr hohe Emissionen aus dem BHKW aufweist (Zündstrahlmotor) sowie aufgrund der Anlagengröße und -bauart einen hohen Anteil der Infrastruktur am Gesamt-POCP.

Ozonabbau (ODP)

Bei einer ersten Betrachtung der Abbildung 39 fällt auf, dass die Lebenszyklusabschnitte Gasverwertung im BHKW (sofern es sich um Zündstrahlmotoren handelt: 33,38 und 40) sowie Transport (bei den schon erwähnten Anlagen mit relativ weiten Transportdistanzen: 12,15, 24, 28 und 29) auf der einen Seite und die Gutschrift durch die Wärmenutzung auf der anderen Seite die größten Beiträge zum Ozonabbaupotenzial liefern. Die Hauptquelle des Ozonabbaupotentials im Allgemeinen ist die Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Das erklärt auch den durchschnittlich hohen Anteil der Lebenszyklusabschnitte Produktion der

NAWAROs sowie Transport und Infrastruktur (Energieverbrauch bei der Herstellung und dem Transport der Baumaterialien) am Gesamt-ODP.

Am besten schneiden die Anlagen 32, 26 und 25 ab, was vorwiegend auf den hohen thermischen Nutzungsgrad sowie keine besonders das ODP belastende Umstände (Transport, Zündstrahl-BHKW) zurückzuführen ist. Auch ohne Beachten der Gutschriften würde Anlage 32 am besten abschneiden.

Am schlechtesten schneiden die Anlagen 33, 29 und 38 ab, welche entweder besonders hohe Emissionen aus dem BHKW oder besonders lange Transportdistanzen aufweisen. Auch ohne Beachtung der Gutschriften würde Anlage 33 am schlechtesten abschneiden.

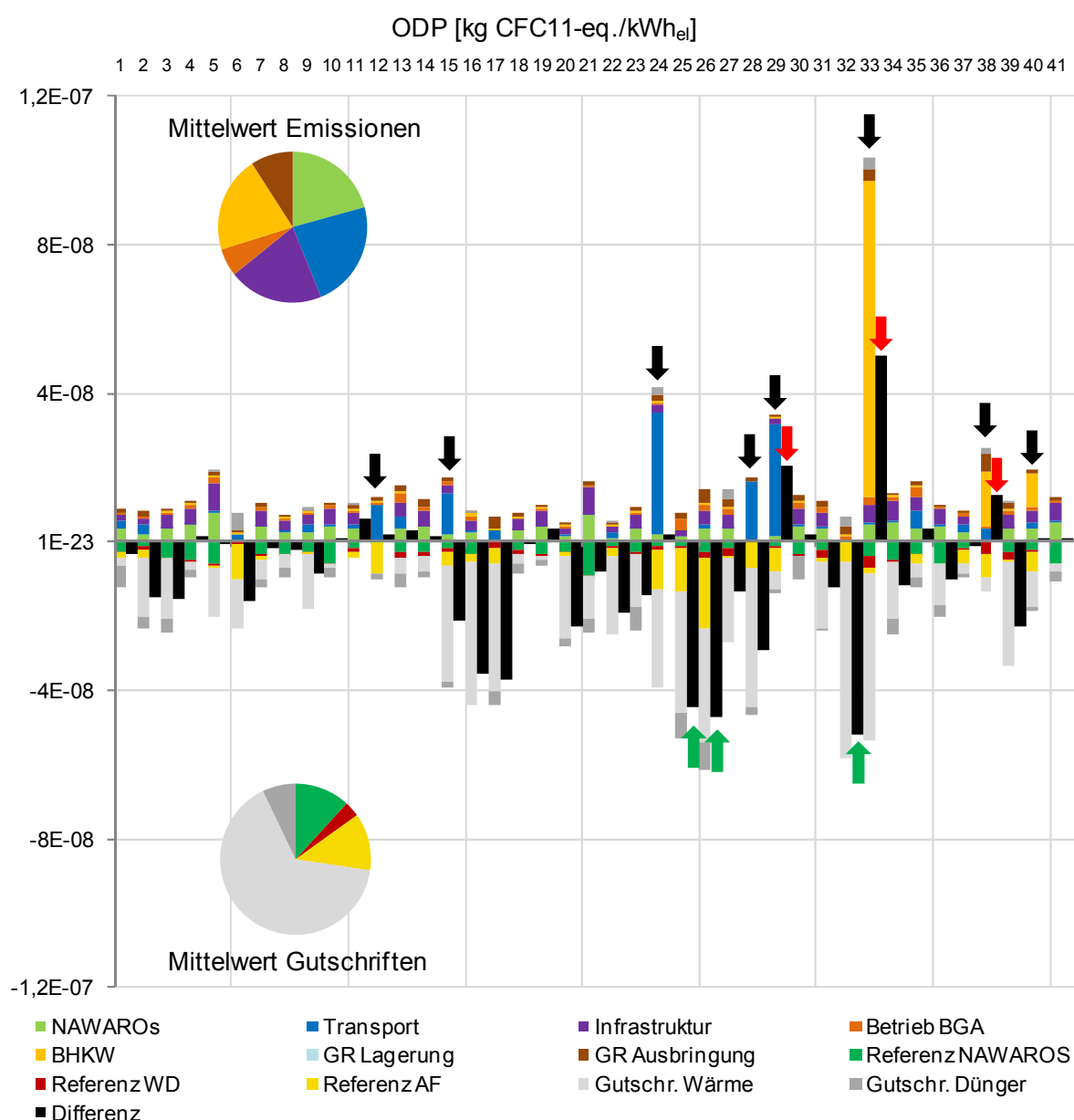


Abbildung 39: Detaillierergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie Ozonabbau für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Landnutzung (LUC)

Zur Landnutzung tragen definitionsgemäß hauptsächlich die Lebenszyklusabschnitte Produktion der NAWAROs sowie die Gärrestausrückführung bei. Der Flächenverbrauch der Gärrestausrückführung wurde in dieser Arbeit so definiert, dass er die zusätzlich zur Düngung der in der Biogasanlage verwendeten NAWAROs benötigten Flächen darstellt. Daher ist der Beitrag bei Anlagen die keine oder nur sehr geringe Mengen an NAWAROs einsetzen (z.B. Anlage 17, 26, 32, 33, 38) besonders groß. Auf der Seite der Referenznutzungen wird die Fläche für die Referenznutzungen der NAWAROs, Wirtschaftsdünger und organischen Reststoffe benötigt.

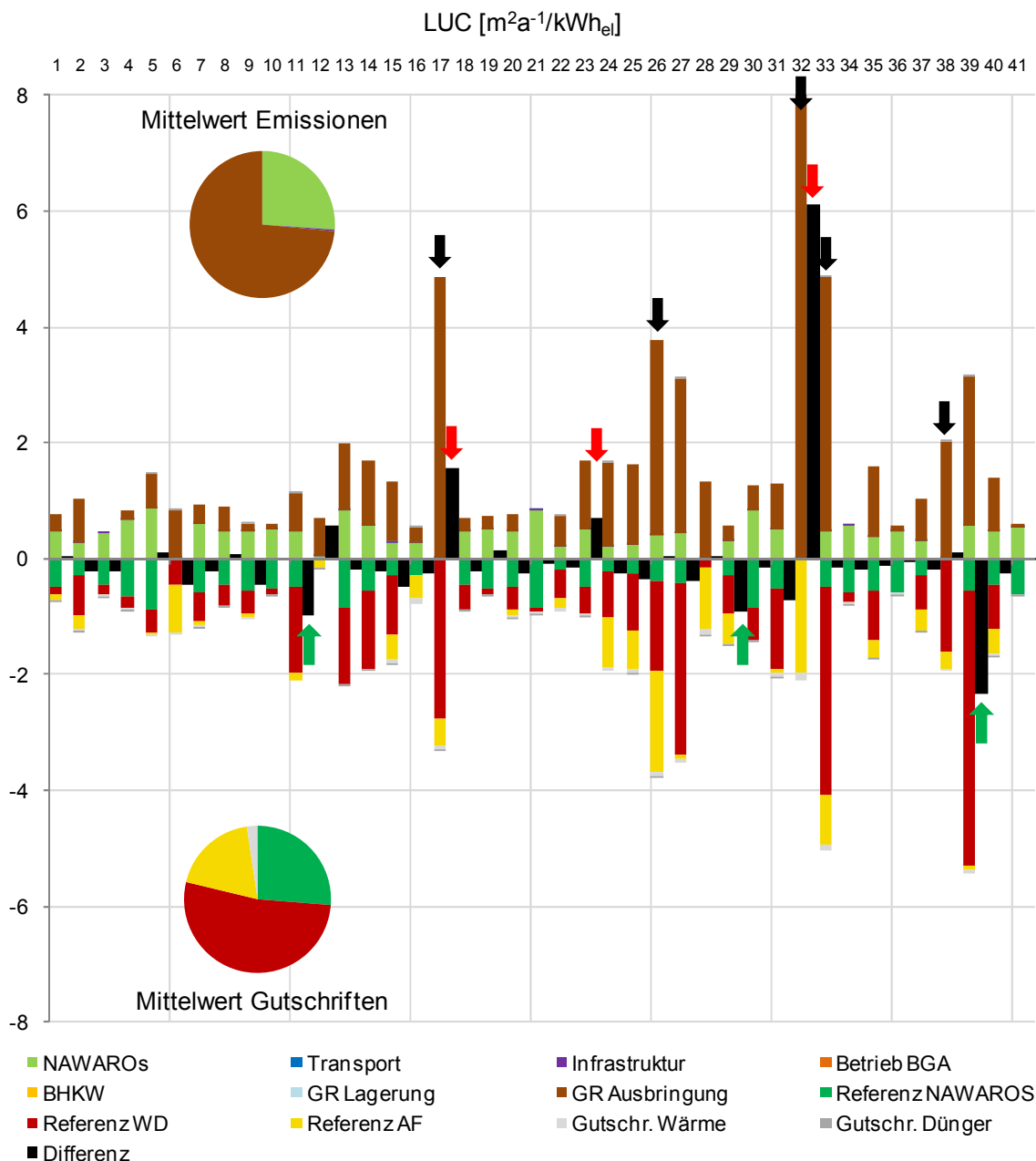


Abbildung 40: Detaillierergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie Landnutzung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Der größte Flächenverbrauch pro kWh_{el} ergibt sich aus den bereits erwähnten Gründen (auch ohne Beachtung der Gutschriften) für die Anlagen 32, 17 und 23.

Den niedrigsten Flächenverbrauch benötigen interessanterweise nicht Anlagen, welche zu 100% mit organischen Reststoffen betrieben werden, da sie große zusätzliche Flächen für die Ausbringung des entstandenen Gärrestes benötigen. Insgesamt schneiden Anlagen, die einen hohen Anteil an Wirtschaftsdüngern im Substratmix aufweisen am besten ab, da dadurch eine hohe Gutschrift für die Referenznutzung entsteht. Für die Anlagen 39, 11 und 29, ist das Gesamtergebnis besonders gut, da diese Anlagen Schweine- bzw. Pferdemist einsetzen, welche einen höheren N-Gehalt als beispielsweise Rindergülle aufweisen, wodurch sich eine größere benötigte Ausbringfläche ergibt, da bei diesen Wirtschaftsdüngerformen, um die gesetzlich erlaubten N-Obergrenzen einhalten zu können, eine geringere Menge pro ha ausgebracht werden kann. Ohne Beachtung der Gutschriften würde Anlage 3 am besten abschneiden, welche mit einem Substratmix aus 70% NAWAROs und 30 Wirtschaftsdüngern arbeitet.

Toxizitätspotentiale

In allen 4 Wirkungskategorien macht die Bereitstellung der Infrastruktur (vor allem bei den Anlagen, die schlecht abschneiden) einen erheblichen Anteil des gesamten Toxizitätspotentials aus (48-73%). Die Anlagen 32 und 26 weisen jeweils die höchsten Emissionen auf. Ihnen ist gemeinsam, dass sie eine kleine elektrische Nennleistung und damit auch jährliche Nettostromproduktion haben, und einen Stahlfermenter verwenden. Der Einfluss der Verwendung eines Stahlfermenters ist vor allem in den Wirkungskategorien HTP und FAETP auch bei den Anlagen 12 und 20 deutlich zu erkennen.

In der Wirkungskategorie terrestrische Ökotoxizität (TAETP) trägt auch die Bereitstellung der nachwachsenden Rohstoffe einen hohen Anteil (34%) zu den Gesamtemissionen bei. Dies lässt sich auf das relativ hohe TAETP der Pflanzenschutzmittel zurückführen, die bei den meisten verwendeten Kulturarten benötigt werden. Bei den übrigen Toxizitätspotentialen liegt der Anteil der Produktion der NAWAROs zwischen 15% und 18%.

Bei der Salzwasser- oder marinen Ökotoxizität könnte in Frage gestellt werden, in wie weit diese Kategorie für Österreich relevant ist. Es handelt sich bei der ausgewählten Wirkungskategorie um die „unendliche“ Variante dieses Indikators (MEATP inf.). Es ist nachvollziehbar, dass viele Verschmutzungen, besonders Schwermetallemissionen, die den Großteil der toxischen Wirkung aus den Emissionen aus der Bereitstellung der Infrastruktur verursachen, irgendwann im Meer akkumulieren. Der Unterschied für das Ergebnis für die Edelstahlproduktion in dieser Kategorie (MEATP inf.) unterscheidet sich um den Faktor 2000 von der gleichen Kategorie für den Zeitraum von 20 Jahren (MAETP 20a). Weiters darf man nicht vergessen, dass es sich bei allen Wirkungskategorien um Potentiale handelt, und nicht um tatsächliche Auswirkungen.

Hauptverantwortlich für die Toxizitätspotentiale der Lebenszyklusabschnitte Transport und Gärrestausbringung sind Schwermetallemissionen in Luft und Wasser, die bei der Produktion der Maschinen/Fahrzeuge bzw. der dafür verwendeten Materialien unweigerlich auftreten und sich in dieser Ökobilanz als „ökologischer Rucksack“ zeigen. In allen 4 Wirkungskategorien sind wieder deutlich die Auswirkungen einer weiten Transportdistanz (Anlagen 12, 15, 24, 28 und 29) sowie der Verwendung eines Zündstrahlmotors (Anlagen 33, 38, 40) zu erkennen.

Auf Seite der Gutschriften wirkt sich besonders die Gutschrift für die Wärmenutzung aber auch jene des Düngers sowie die Referenznutzungen NAWAROs und organischer Reststoffe auf das Gesamtergebnis aus.

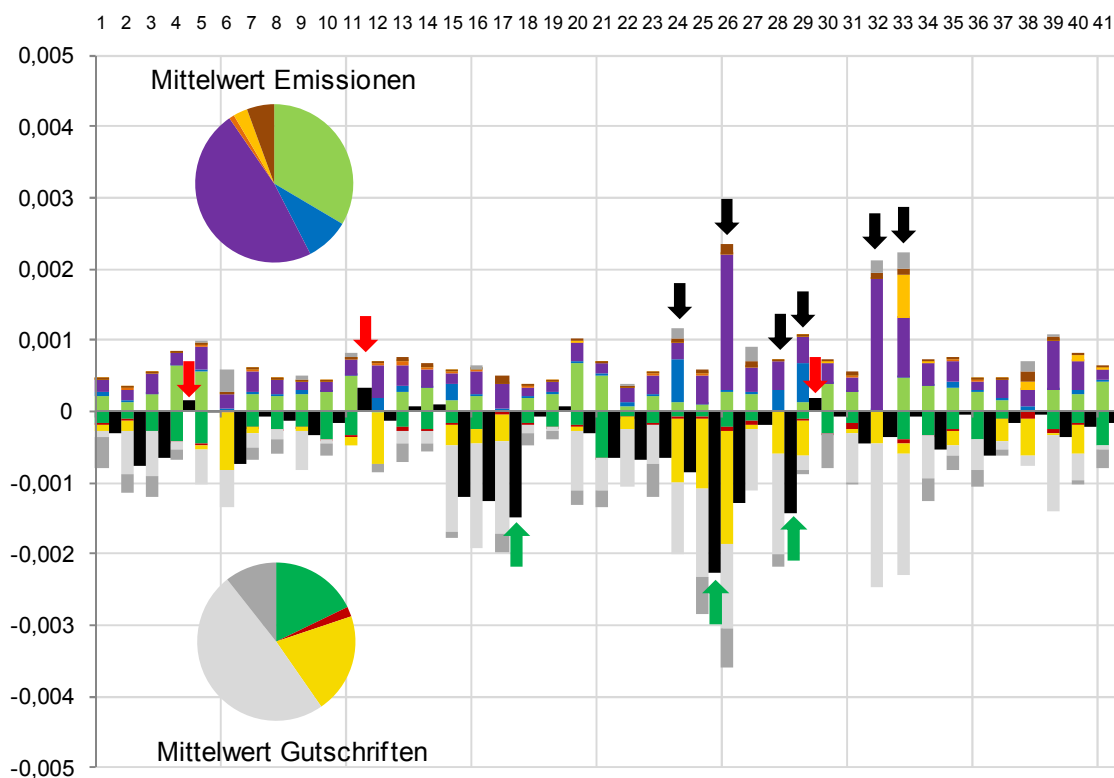
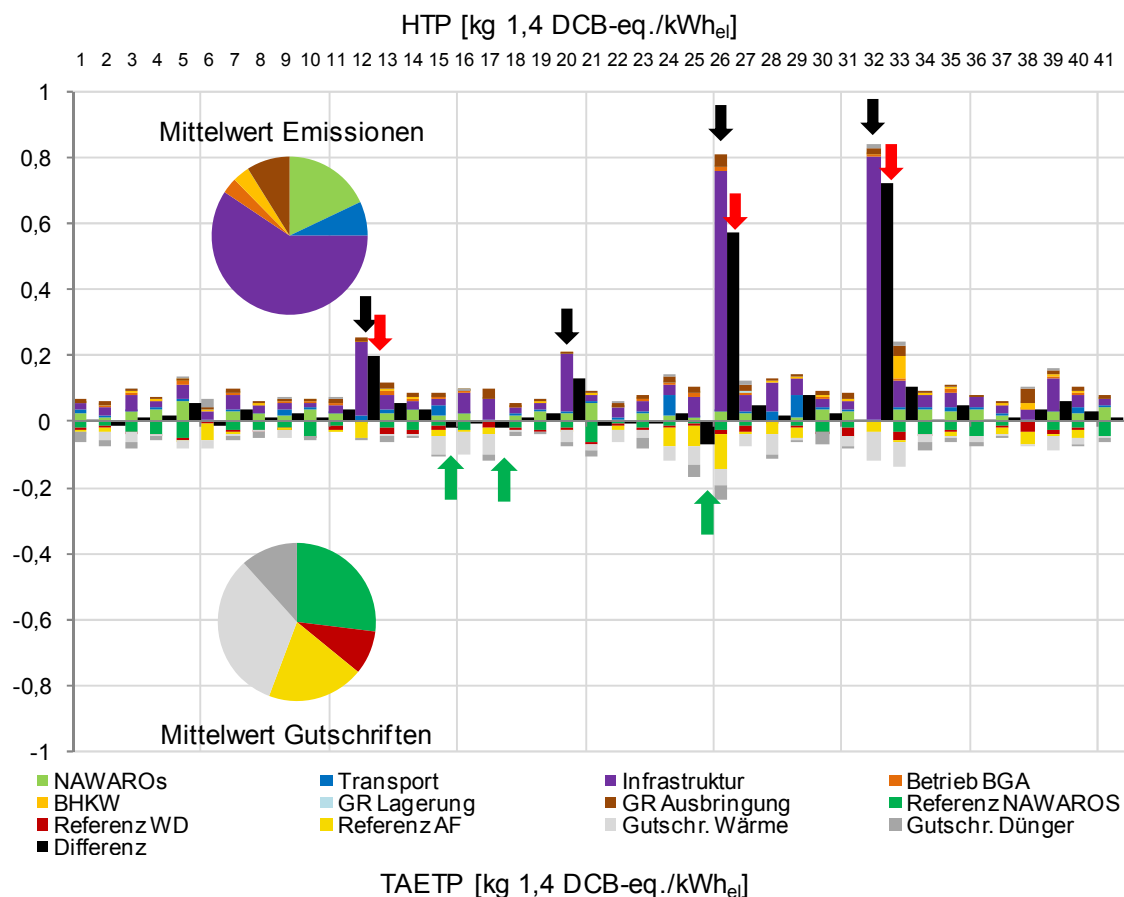


Abbildung 41: Detailergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorien Humantoxizität und terrestrische Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

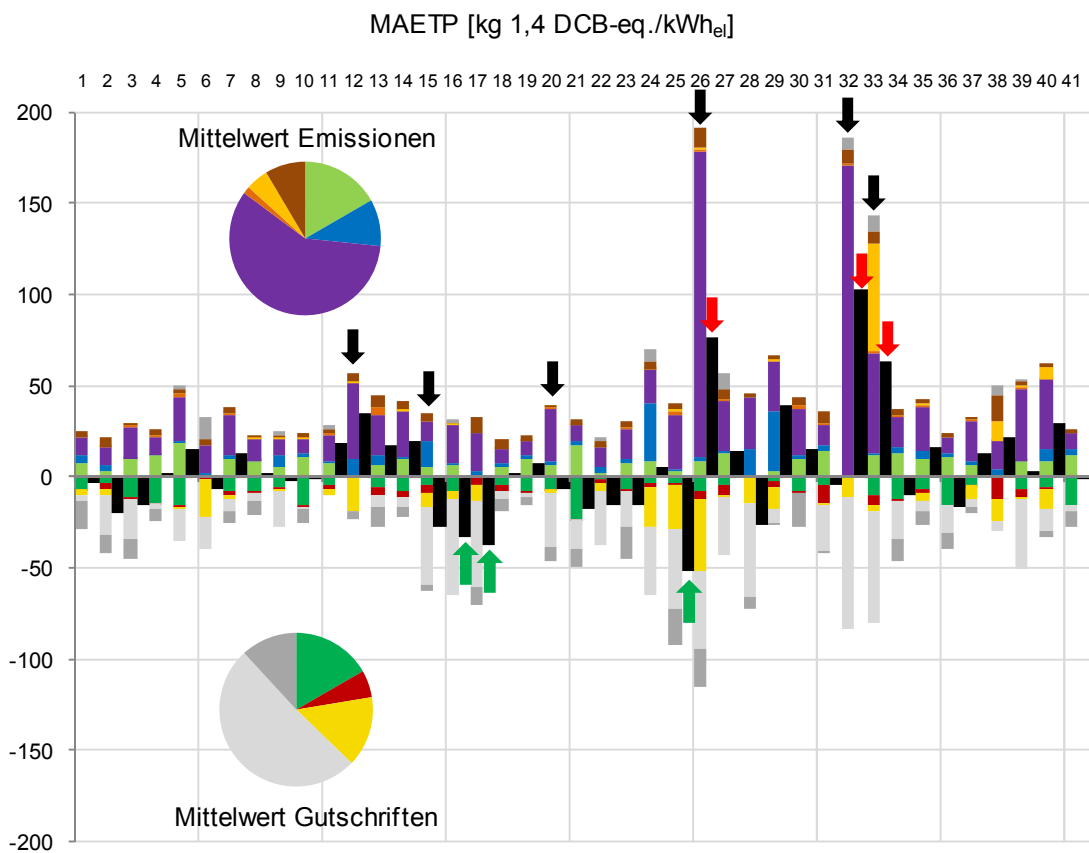
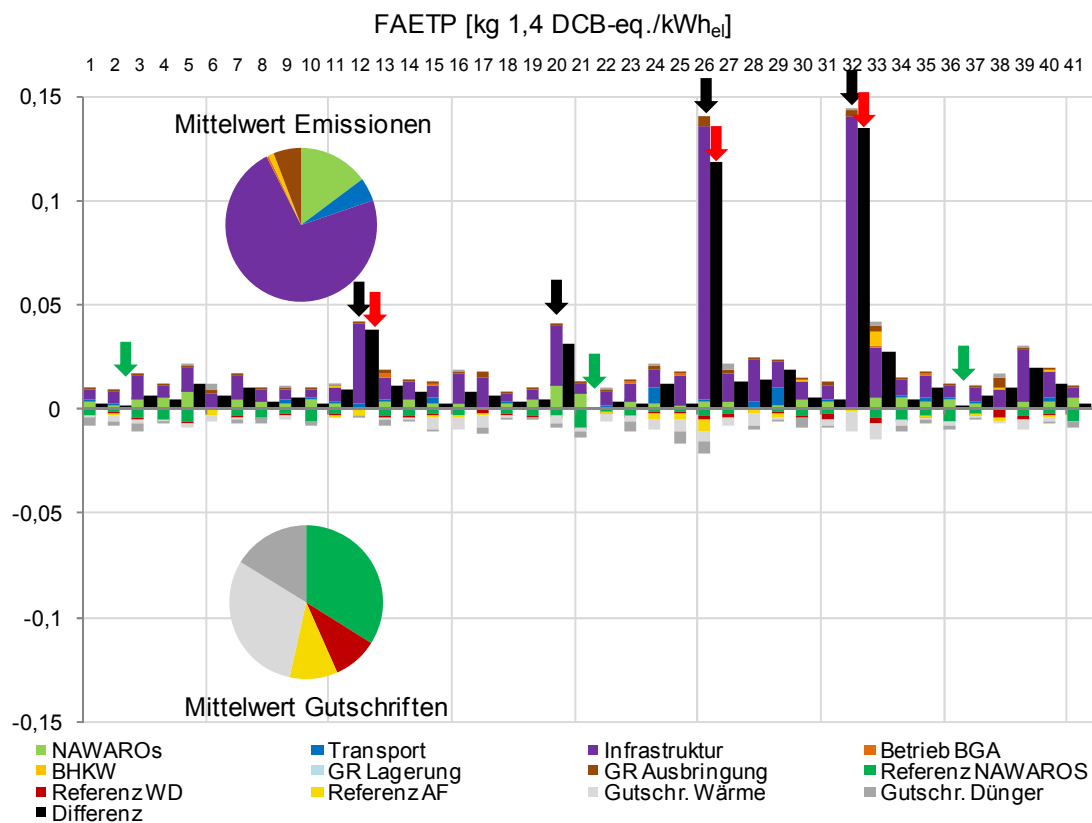


Abbildung 42: Detailergebnisse des Biogas-Systems in den Wirkungskategorien Süßwasser- und Salzwasser-Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

4.1.3. Gesamtergebnisse des Biogas-Systems für alle Wirkungskategorien

Durch die in dieser Arbeit gewählte Betrachtungsweise des Biogas-Systems mit Emissionen auf der einen und Referenznutzungen bzw. Gutschriften auf der anderen Seite, können die Gesamtergebnisse sowohl positiv (=Emissionen im Vergleich zur Situation ohne Biogasanlage) als auch negativ (=Einsparungen im Vergleich zur Situation ohne Biogasanlage) ausfallen. In Abbildung 43 und Abbildung 44 sind für jede Wirkungskategorie 4 Balken dargestellt: der oberste Balken (BGA) stellt die Emissionen des Biogas-Systems dar, der zweite Balken (REF) stellt die Gutschriften und Referenznutzungen dar, der dritte Balken (DIF, schwarz) stellt die Differenz zwischen Emissionen und Gutschriften/Referenznutzungen dar und der vierte Balken (KS, grau) stellt die Emissionen des konventionellen Systems zur Stromerzeugung in Österreich dar. Im Durchschnitt aller 41 Anlagen ergeben sich für die Wirkungskategorien GWP, ADP, AP, EP, ODP, LUC und TAETP Einsparungen, für die Wirkungskategorien POCP, HTP, FAETP und MAETP ergeben sich zusätzliche Emissionen. Im Vergleich zum österreichischen Strom-Produktionsmix, schneidet das Biogassystem in fast allen Wirkungskategorien besser ab, nur in den Wirkungskategorien POCP (ca. 4-fach), HTP (ca. 2-fach) und FAETP (ca. 2,5-fach) verursacht das Biogassystem größere Emissionen. Hauptverursacher der Emissionen des Biogassystems beim POCP ist das BHKW, in den Wirkungskategorien HTP und FAETP, die Bereitstellung der Infrastruktur. Bei der Betrachtung des Balkens für die Referenznutzungen/Gutschriften fällt auf, dass für die Wirkungskategorien GWP sowie AP und EP die Referenznutzung Kompostierung organischer Abfälle sowie die Referenznutzung Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern einen sehr starken Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. In den Wirkungskategorien ADP, ODP und auch TAETP spielt die Gutschrift Wärmenutzung eine große Rolle. Für genauere Erläuterungen der Ursachen siehe Punkt 3.2.8.

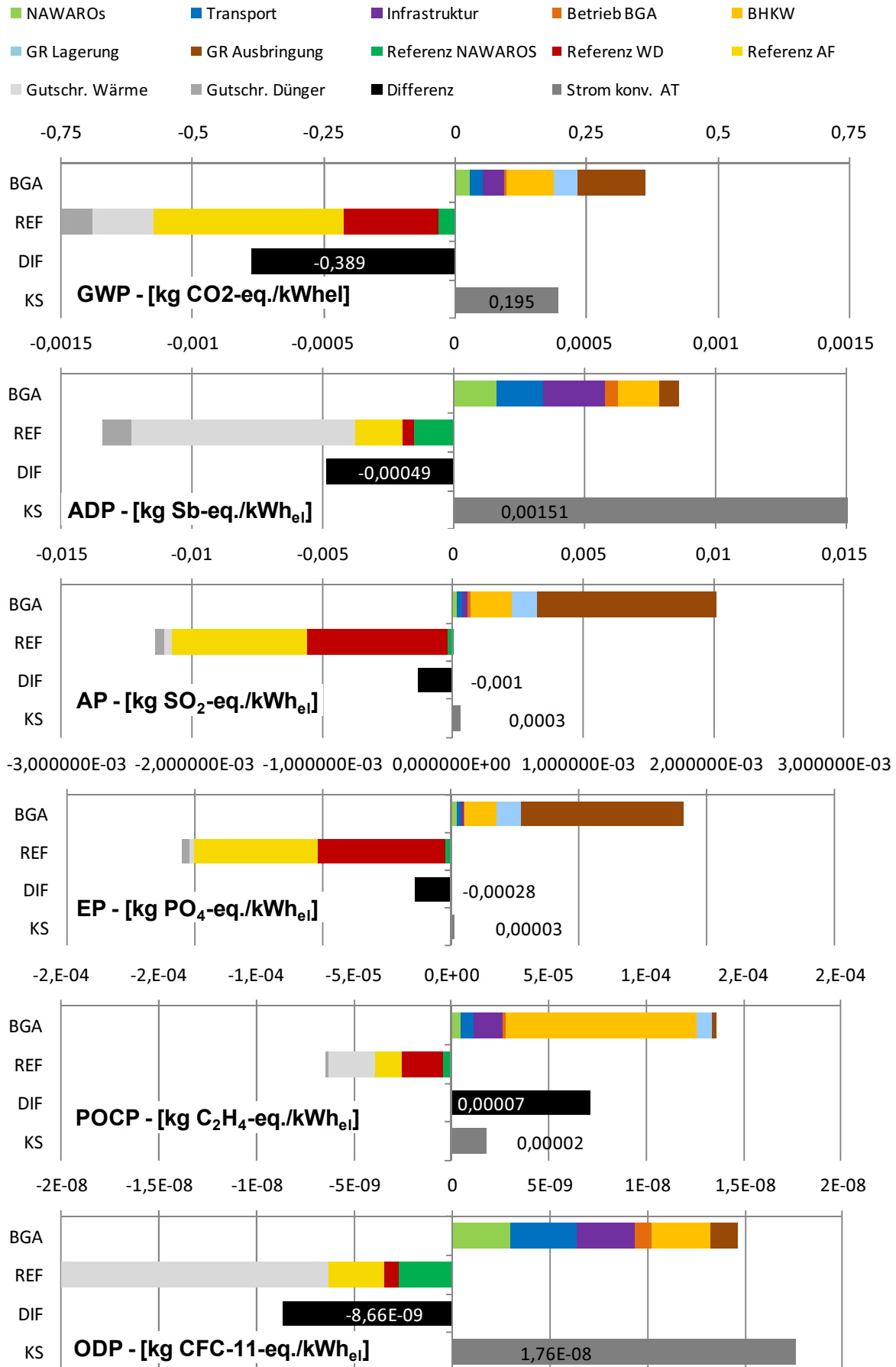


Abbildung 43: Gesamtergebnisse des Biogas-Systems für die Wirkungskategorien GWP, ADP, AP, EP, POCP und ODP

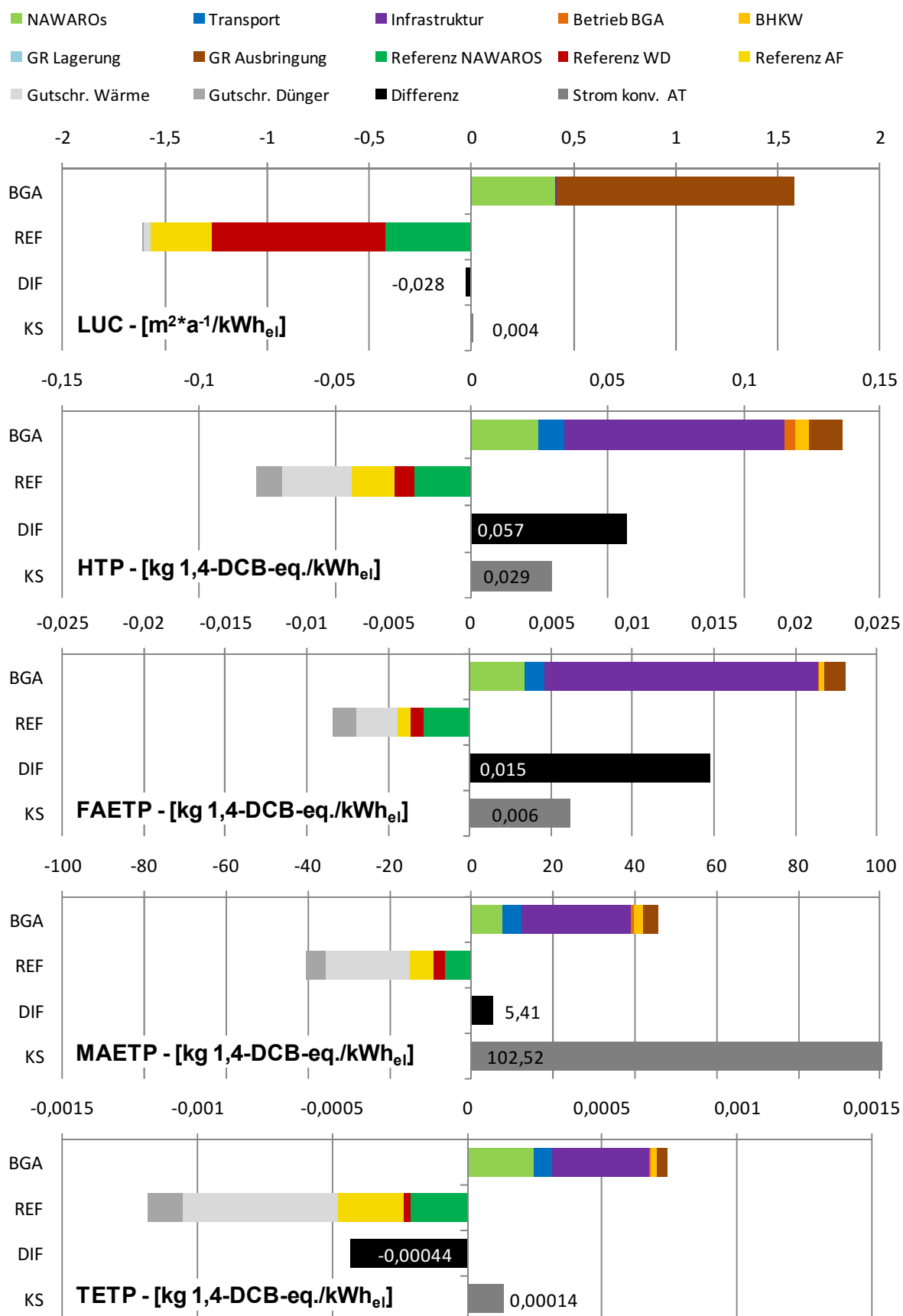


Abbildung 44: Gesamtergebnisse des Biogas-Systems für die Wirkungskategorien LUC, HTP, FAETP, MAETP und TAETP.

4.1.4. Sensitivitätsanalysen Biogas-System

Die Sensitivitätsanalysen zeigen den Einfluss angenommener Parameter auf das Gesamtergebnis. Die untersuchten Parameter beeinflussen die Basisergebnisse teilweise sehr stark (bis zu ca. 50%) und sind daher bei der Betrachtung der Basisergebnisse sowie beim Vergleich mit anderen Technologien zu beachten.

4.1.4.1. Sensitivitätsanalyse BHKW

Die für die BHKWs angenommenen Emissionsfaktoren für Methan, Kohlenmonoxid, Stickoxide und Schwefeldioxid haben Einfluss auf die Wirkungskategorien GWP, AP, EP und POCP. Die Sensitivitätsanalyse, dargestellt in Abbildung 45, berücksichtigt den Einfluss der Standardabweichung der Emissionsfaktoren (Mittelwert plus bzw. minus Standardabweichung) sowie den Einfluss eines vom Methangehalt im Biogas unabhängigen Methanschlupfes von 0,5%. Die Ergebnisse sind in % der Basiswerte (= gesamte durch den Betrieb der Biogasanlage entstehende Emissionen) dargestellt. Die Variation der Emissionsfaktoren zeigt den größten Einfluss auf das POCP ($\pm 22,8\%$), die Annahme, dass der Methanschlupf nur 0,5% beträgt reduziert das POCP um 11,5%. Versauerung und Eutrophierung zeigen eine Variation von $\pm 12,8$ bzw. $11,1\%$ respektive. Ein veränderter Methanschlupf wirkt sich auf diese Wirkungskategorien nicht aus. Das Treibhauspotential schließlich ändert sich mit der Standardabweichung der Emissionsfaktoren um $\pm 6,4\%$, der Einfluss eines verminderten Methanschlupfes wirkt sich auf diese Wirkungskategorie am meisten aus und würde eine Reduktion um $17,7\%$ bewirken.

Die in dieser Sensitivitätsanalyse untersuchten Variationen würden keine Veränderung der Trends der Gesamtergebnisse bezüglich Emissionen oder Einsparung sowie bezüglich des Vergleichs mit der konventionellen Stromproduktion bewirken.

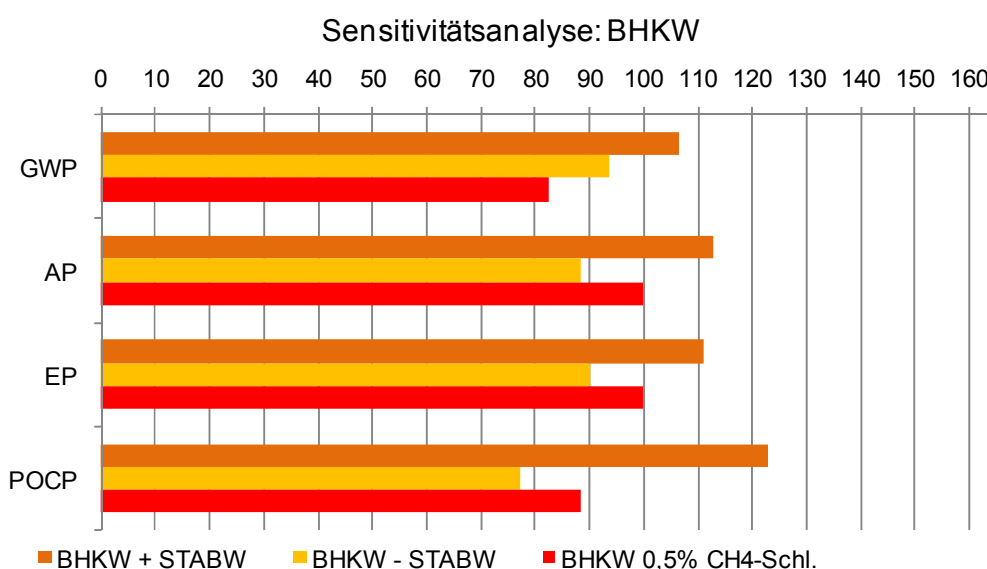


Abbildung 45: Sensitivitätsanalyse BHKW

4.1.4.2. Sensitivitätsanalyse: Gärrestlagerung und -ausbringung

Für die Berechnung der Lebenszyklusabschnitte Gärrestlagerung und Gärrestausbringung wurde mit Emissionsfaktoren für die Verbindungen Methan, Lachgas und Ammoniak gearbeitet, welche Einfluss auf die Wirkungskategorien GWP, POCP, AP und EP haben. Die Sensitivitätsanalyse (Abbildung 46) zeigt den Einfluss der Standardabweichung dieser Emissionsfaktoren (Mittelwert plus bzw. minus Standardabweichung) auf die gesamten, durch den Betrieb der Biogasanlage entstehenden, Emissionen. Die Ergebnisse sind in % der Basiswerte dargestellt. Bei der Variation der Emissionsfaktoren für die Gärrestlagerung (blaue Balken) kommt es im Vergleich zu den Basiswerten zu einer Veränderung um $\pm 5,7\%$ (POCP), $\pm 9,2\%$ (EP), $\pm 8,9\%$ (AP) und $\pm 10,3\%$ (GWP). Der Einfluss ist nicht zu vernachlässigen, würde die Grund-Trends der Gesamtergebnisse (4.1.3) bezüglich Emissionen oder Einsparungen bzw. bezüglich des Vergleichs mit der konventionellen Stromproduktion jedoch nicht umkehren.

Sehr großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat jedoch die Variation der Emissionsfaktoren für die Gärrestausbringung (rote Balken, Abbildung 46): sie bewirkt eine Variation des Gesamtergebnisses um $\pm 48,7\%$ für das EP bzw. $\pm 47,1\%$ für das AP sowie eine Variation von $\pm 24,3\%$ für das GWP, das POCP bleibt annähernd unverändert. Würde man mit den hohen Emissionsfaktoren rechnen (Mittelwert + Standardabweichung) und für die Referenznutzung Wirtschaftsdünger die Basis-Emissionsfaktoren belassen, so würde sich das Gesamtergebnis in den Wirkungskategorien AP und EP von Einsparungen in Emissionen umkehren und somit auch schlechter als die konventionelle Stromproduktion abschneiden. Für die Wirkungskategorien GWP und POCP würde sich am Grundtrend der Basis-Gesamtergebnisse nichts ändern. Da jedoch die Ableitung der Emissionsfaktoren für das Gärrest- und das Wirtschaftsdüngermanagement aus den gleichen Literaturstellen stammt, müsste man, wenn man für die Ausbringung die „Emissionsfaktoren hoch“ annimmt, auch für die Referenznutzung Wirtschaftsdünger die „Emissionsfaktoren hoch“ annehmen, wodurch sich die Schwankung annähernd aufhebt. Siehe auch Punkt 4.5 (Belastbarkeit der Ergebnisse) Abbildung 74.

Hauptverantwortlich für die große Variation des Versauerungspotentials sind die Ammoniakemissionen, die bei der Gärrestausbringung entstehen. Der aus der Literatur abgeleitete „durchschnittliche“ Emissionsfaktor weist eine Standardabweichung von 74% auf. Diese hohe Standardabweichung lässt sich durch die unzähligen Einflussgrößen, die die Ammoniakemissionen beeinflussen erklären (siehe Tabelle 21).

Hauptverantwortlich für die Variation des GWP sind die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Emissionsfaktors für Lachgas bei der Gärrestausbringung. Dieser wurde der österreichischen Treibhausgasbilanz (UBA 2009) entnommen, welche ihrerseits auf die vom IPCC festgelegten Werte zurückgreift.

In dieser Sensitivitätsanalyse wird deutlich sichtbar, wie wichtig die Bestimmung belastbarer Emissionsfaktoren für Ammoniak sowie für Lachgas bei der Gärrestausbringung wäre.

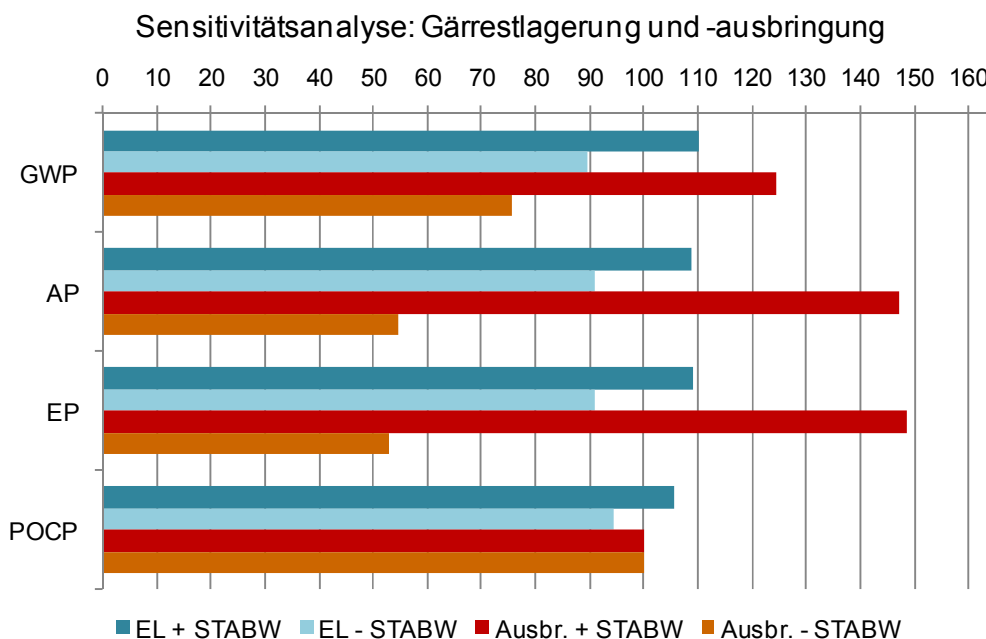


Abbildung 46: Sensitivitätsanalyse Gärrestlagerung und -ausbringung

4.1.4.3. Sensitivitätsanalyse: Einfluss indirekter N_2O Emissionen durch NH_3 - und NO_x -Emissionen auf das Treibhauspotential des Biogassystems

In der „CML-2001“-Wirkungsabschätzungsmethode, die für die vorliegende Arbeit verwendet wurde, wird NH_3 - sowie NO_x -Emissionen kein Treibhauspotential zugewiesen. Da in den IPCC Richtlinien 2006 diesen Verbindungen bei Emissionen in die Luft jedoch ein „indirektes“ Treibhauspotential zugewiesen wird, wird dieses indirekte Treibhauspotential in der folgenden Sensitivitätsanalyse dargestellt (Abbildung 47).

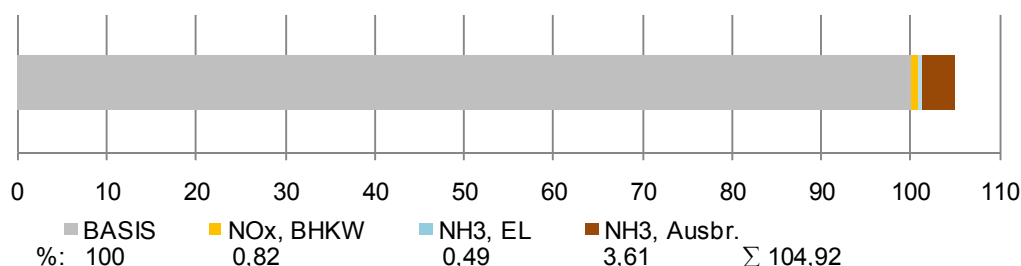


Abbildung 47: Sensitivitätsanalyse: GWP des Biogassystems inklusive indirekter N_2O -Emissionen

Es zeigt sich, dass sich das GWP des Basissystems unter Berücksichtigung der indirekten N_2O -Emissionen durch NO_x und NH_3 nur um 4,92% erhöhen würde. Der größte Anteil davon stammt von den NH_3 -Emissionen durch die Gärrestausrückführung (3,6%).

4.1.4.4. Sensitivitätsanalyse: Referenznutzung Wirtschaftsdünger

Für die Sensitivitätsanalyse der Referenznutzung Wirtschaftsdünger zeigt sich ein ähnliches Bild wie für die Gärrestlagerung bzw. -ausbringung. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung der Emissionsfaktoren für Ammoniak, Lachgas und Methan, zeigt sich eine große Variation der Basisergebnisse (= alle dem Biogassystem in Abzug zu bringende

Referenznutzungen bzw. Gutschriften) für die Wirkungskategorien GWP, AP, EP und POCP. Die Variation ist mit knapp 40% am Größten für das Versauerungs- und das Eutrophierungspotential. Wobei wiederum zu Beachten ist, dass für diese Berechnung die Basis Emissionsfaktoren für die Ausbringung angenommen wurden. Würden auch dafür die „Emissionsfaktoren hoch“ angenommen werden, würden sich die Schwankungen nahezu ausgleichen (siehe Abbildung 74). Das GWP schwankt um 18%, das POCP um 19%. Die Ursache für die große Schwankungsbreite liegt wiederum an der Tatsache, dass keine belastbaren Emissionsfaktoren bzw. Messdaten für die Ammoniak, Lachgas und Methanemissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung bzw. –ausbringung vorhanden sind.

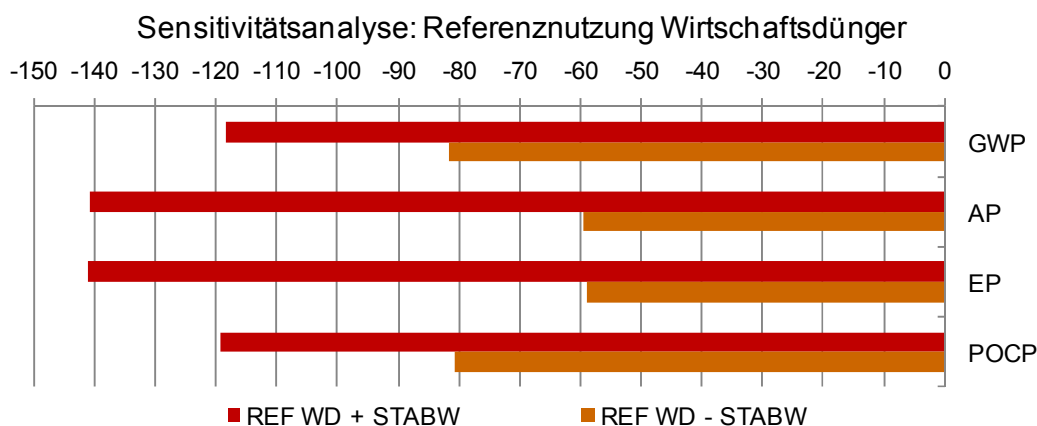


Abbildung 48: Sensitivitätsanalyse: Referenznutzung Wirtschaftsdünger

Würden für die Berechnung der Gesamtergebnisse die „Emissionsfaktoren hoch“ für die Berechnung der Referenznutzung Wirtschaftsdünger verwendet werden, würde sich an den Grundaussagen bezüglich Emissionen oder Einsparungen sowie bezüglich des Vergleichs mit der konventionellen Stromproduktion nichts ändern, die Einsparungen wären etwas größer bzw. die Emissionen des POCP etwas reduziert. Nimmt man jedoch die „Emissionsfaktoren niedrig“ für die Berechnung der Referenznutzung Wirtschaftsdünger an (bei Basis-Emissionsfaktoren für die Gärrestausrückführung), so würden sich die Gesamtergebnisse für die Wirkungskategorien AP und EP von Einsparungen in Emissionen umkehren, welche höher als jene der konventionellen Stromproduktion wären. Für die Wirkungskategorien GWP und POCP würde sich am Grundtrend der Basis-Gesamtergebnisse nichts ändern.

4.1.4.5. Sensitivitätsanalyse: Referenznutzung organische Abfälle

In dieser Sensitivitätsanalyse wird die Standardabweichung der Emissionsfaktoren für die Ammoniak-, Lachgas-, und Methanemissionen während der Kompostierung, sowie die Auswirkungen des Einsatzes eines Biofilters bei der Kompostierung dargestellt. Die Berücksichtigung der Standardabweichung bei den Emissionsfaktoren bewirkt eine Schwankung der Basisergebnisse (= alle dem Biogassystem in Abzug zu bringende Referenznutzungen bzw. Gutschriften) um $\pm 21,9\%$ für das GWP, $15,1\%$ für das POCP, $7,2\%$ für das AP und $7,3\%$ für das EP. Wie bereits bei den Sensitivitätsanalysen für die Gärrestlagerung und –ausbringung erwähnt, ist auch die Datengrundlage für Emissionsfaktoren bei der Kompostierung lückenhaft und teilweise widersprüchlich, sodass sich so große Schwankungsbreiten ergeben. Der Einfluss der „Emissionsfaktoren hoch“ bzw. „niedrig“ ist nicht zu vernachlässigen, würde die Grund-Trends der Gesamtergebnisse (4.1.3) bezüglich

Emissionen oder Einsparungen bzw. bezüglich des Vergleichs mit der konventionellen Stromproduktion jedoch nicht umkehren.

Der Einsatz eines Biofilters zur Reinigung der Kompost-Abluft würde die Basisergebnisse um 21,0% für das GWP, 19,3% für das AP, 19,6% für das EP und 10,4% für das POCP reduzieren. Bezüglich der Gesamtergebnisse würde diese Maßnahme zu einer Umkehr der Einsparungen in Emissionen für die Wirkungskategorien AP und EP bewirken, diese wären auch knapp höher als für die konventionelle Stromproduktion. In den Wirkungskategorien GWP und POCP würden zwar die Einsparungen etwas reduziert und die Emissionen etwas erhöht werden, es käme jedoch zu keiner Umkehr der Grundaussage der Basiswerte.

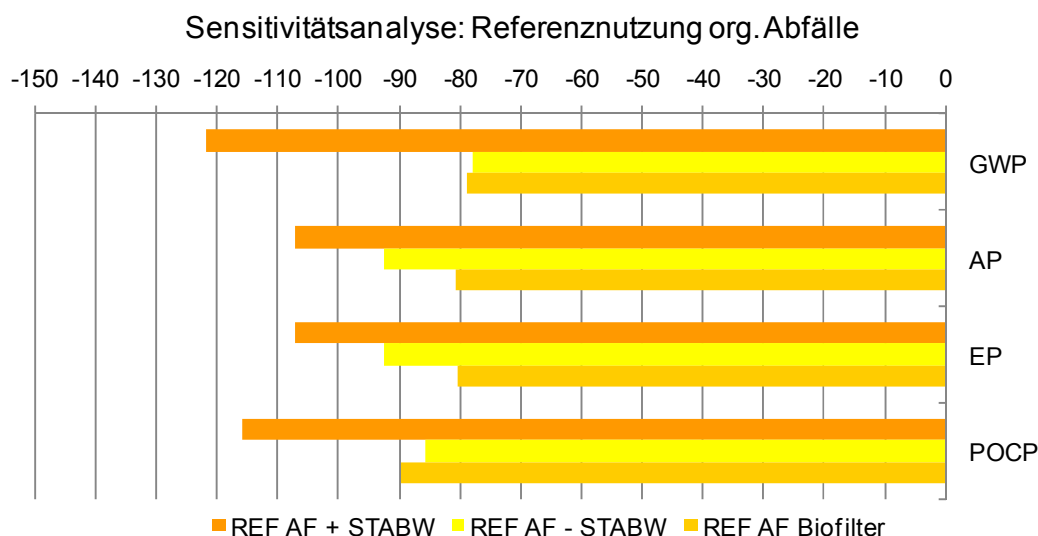


Abbildung 49: Sensitivitätsanalyse: Referenznutzung organische Abfälle

4.1.4.6. Sensitivitätsanalyse: Einfluss indirekter N_2O Emissionen durch NH_3 -Emissionen auf das Treibhauspotential der Referenznutzungen / Gutschriften

Wie für das Biogassystem wurde auch für die Referenznutzungen/Gutschriften das Treibhauspotential inklusive der indirekten N_2O -Emissionen durch NH_3 -Emissionen berechnet.

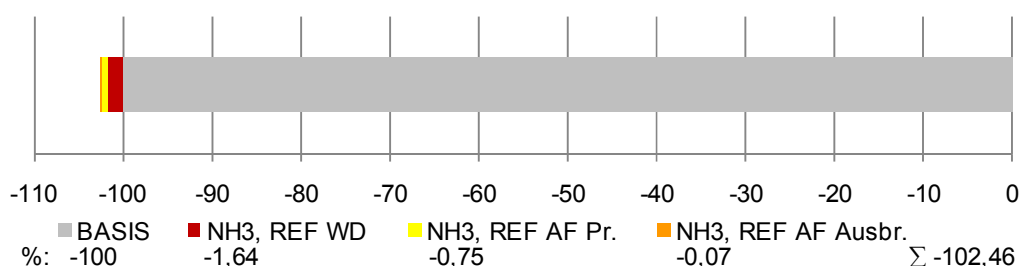


Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse: GWP der Referenznutzungen / Gutschriften inklusive indirekter N_2O -Emissionen

Das Basisergebnis erhöht sich dadurch um 2,46%, wobei die Hauptquelle NH_3 -Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement darstellen. Im Gegensatz zum Einfluss der Standardabweichung der Emissionsfaktoren, beeinflussen die indirekten N_2O -Emissionen das Basisergebnis nur unwesentlich.

4.1.4.7. Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Wärmebereitstellungstechnologie für die Gutschrift Wärmenutzung auf die Gesamtergebnisse der Referenznutzungen/ Gutschriften

In der Basis-Variante des modellierten Biogas-Systems wird davon ausgegangen, dass die in den Biogasanlagen produzierte und genutzte Wärme, den österreichischen Wärmemix 2005 (siehe 3.2.8) ersetzt (= Gutschrift Wärmenutzung). In dieser Sensitivitätsanalyse werden für die Gutschrift Wärmenutzung anstatt des österreichischen Wärmemixes 2005 verschiedene alternative Systeme zur Wärmebereitstellung angenommen. In Abbildung 51 ist die prozentuelle Veränderung der Basisergebnisse (= 100%, alle dem Biogassystem in Abzug zu bringende Referenznutzungen bzw. Gutschriften, wobei für die Gutschrift Wärmenutzung der österreichische Wärmemix 2005 verwendet wird) für die alternativen Wärmebereitstellungssysteme: Steinkohle, Heizöl, Erdgas, Brennholz und Strom für alle Wirkungskategorien dargestellt. Es zeigt sich, dass für die unterschiedlichen Alternativ-Systeme keine generellen, für alle Wirkungskategorien geltenden Aussagen gemacht werden können. Tendenziell gibt es jedoch in mehr Wirkungskategorien Einsparungen durch die Biogasanlagen und diese sind größer, wenn mit der produzierten Wärmemenge Steinkohle-, Heizöl- oder Strom- basierte Wärmebereitstellungssysteme ersetzt werden.

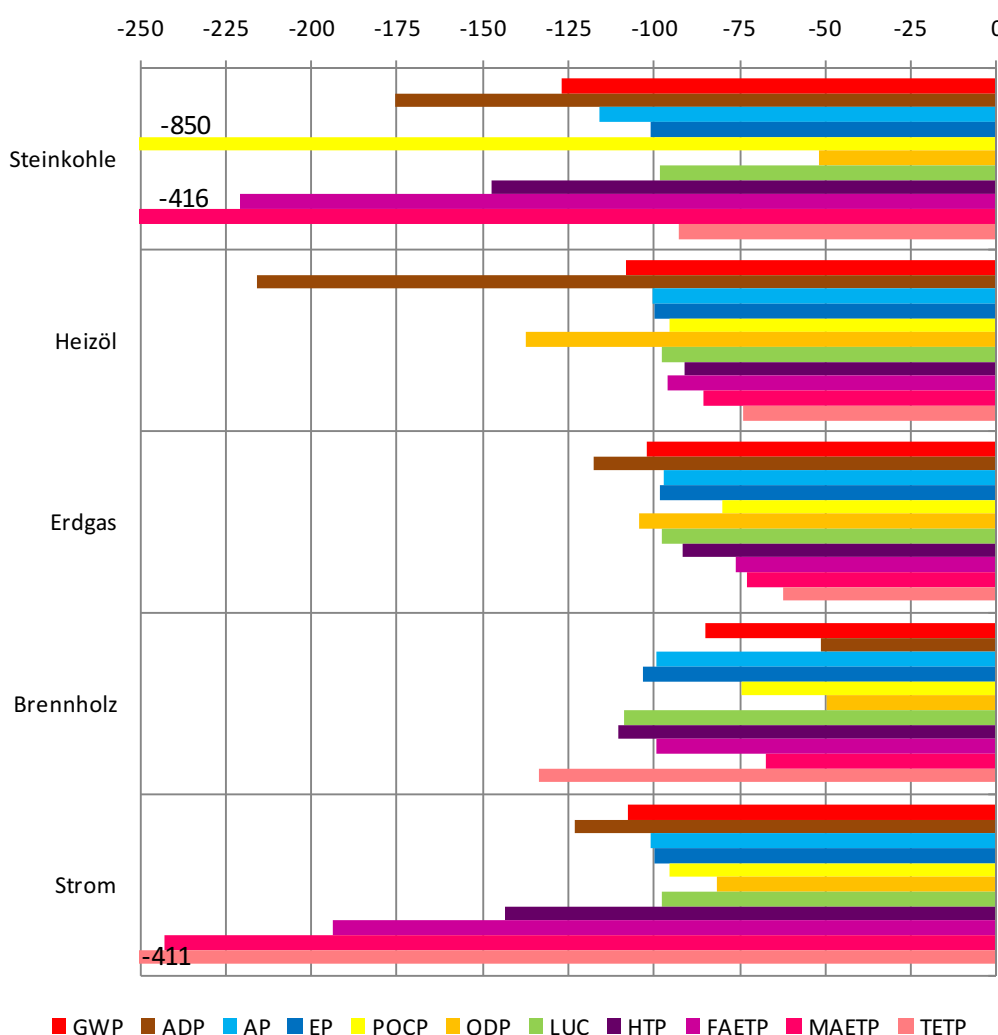


Abbildung 51: Sensitivitätsanalyse: Einfluss verschiedener Wärmebereitstellungstechnologien auf das Gesamtergebnis der Referenznutzungen/Gutschriften für das Biogas-System.

Das alternative Wärmebereitstellungssystem Steinkohle würde die Basisergebnisse in den Wirkungskategorien GWP (+27%), ADP (+75%), AP (+15%), POCP (+750%), HTP (+47%), FAETP (+120%) und MAETP (+316%) erhöhen, in den Wirkungskategorien ODP (-85%), TAETP (-17%) und LUC (-67%) reduzieren. Dadurch würde sich das Gesamtergebnis (4.1.3) folgendermaßen verändern: In den Wirkungskategorien POCP, HTP und FAETP, in denen die Basisvariante schlechter als die konventionelle österreichische Stromproduktion abschneidet, würde das Biogas-System nun besser abschneiden, die Emissionen in der Wirkungskategorie POCP würden sich sogar in Einsparungen umkehren. Für das MAETP würde sich ebenfalls eine Einsparung ergeben, das TAETP sowie das ODP würde hingegen von einer Einsparung in Emissionen umgekehrt werden, welche jedoch immer noch unter jenen der konventionellen Stromproduktion liegen würden. Die Flächennutzung und das Eutrophierungspotential blieben nahezu unverändert. In den Wirkungskategorien GWP, ADP und AP würde sich die Einsparung durch das Biogassystem vergrößern und damit weit unter den Emissionen der konventionellen Stromproduktion liegen.

Wählt man Heizöl als Wärmebereitstellungssystem für die Gutschrift Wärmenutzung, würden sich die Basisergebnisse in den Kategorien GWP (+8%), ADP (+115%) und ODP (+37%) erhöhen AP, EP und LUC blieben nahezu unverändert und für die Wirkungskategorien POCP (-5%), HTP (-10%), FAETP (-5%) und TAETP (-15%) ergäbe sich eine leichte Reduktion im Vergleich zu den Basisergebnissen. Für die Gesamtergebnisse hätte dies folgende Auswirkungen: In den Wirkungskategorien GWP, ADP und ODP würde sich die Einsparung des Biogas-Systems vergrößern, bei den Toxizitätspotentialen würden sich die Emissionen geringfügig erhöhen, womit das HTP, das FAETP und nun auch das TAETP über den Emissionen der konventionellen Stromproduktion liegen würde, das MAETP wäre weiterhin darunter. Für die übrigen Wirkungskategorien würde sich keine nennenswerte Veränderung ergeben.

Für das alternative Wärmebereitstellungssystem Erdgas ergibt sich vom Trend her ein ähnliches Bild wie für Heizöl, die Erhöhungen sind jedoch niedriger und die Reduktionen größer. Auch für die Gesamtergebnisse ergeben sich keine zusätzlichen Änderungen.

Wird Brennholz als alternatives Wärmebereitstellungssystem angenommen, würden sich im Vergleich zum österreichischen Wärmemix 2005 die Wirkungskategorien GWP (-15%), ADP (-49%), POCP (-26%), ODP (-51%) und MAETP (-33%) reduzieren, AP, EP und FAETP blieben nahezu unverändert und LUC (+8%), HTP (+10%) und TAETP (+33%) würden sich erhöhen. Auf die Gesamtergebnisse hätte diese Veränderung folgende Auswirkungen: In den Wirkungskategorien ADP und ODP würden sich die Einsparungen in Emissionen umkehren, diese lägen jedoch immer noch unter jenen der konventionellen Stromproduktion. Die Einsparungen beim GWP wären etwas geringer, die Emissionen beim POCP (über der konventionellen Stromproduktion) und MAETP (unter der konventionellen Stromproduktion) wären größer. Für LUC und TAETP ergäben sich nun Einsparungen, die Emissionen in der Wirkungskategorie HTP wären geringer als im Basissystem, jedoch weiterhin über der konventionellen Stromproduktion.

Als letztes Szenario wird die Veränderung der Basisergebnisse unter der Annahme des Ersatzes eines Wärmebereitstellungssystems mit Hilfe elektrischer Energie („Stromheizung“) untersucht. Dadurch würden sich die Basisergebnisse der Referenznutzungen/Gutschriften in den Wirkungskategorien GWP (+7%), ADP (+23%), HTP (+43%), FAETP (+93%), MAETP (+142%) und TAETP (+311%) erhöhen, AP, EP und LUC blieben nahezu unverändert und

POCP (-5%) und ODP (-19%) würden sich leicht reduzieren. Auf die Gesamtergebnisse hätte dies folgende Auswirkung: Bei den Toxizitätspotentialen lägen nun das TAETP, das MAETP und das HTP unter den Werten der konventionellen Stromproduktion, beim TAETP und beim MAETP ergäben sich sogar Einsparungen im Vergleich zur Situation ohne Biogasanlage. Auch die Emissionen in der Wirkungskategorie FAETP würden sich stark reduzieren (lägen jedoch immer noch knapp über jenen der konventionellen Produktion). Bei den übrigen Wirkungskategorien würde sich vom Trend her nichts gegenüber den Basis-Gesamtergebnissen ändern.

4.1.5. Verbesserungspotentiale Biogas-System

Abbildung 52 zeigt die Auswirkung 3 verschiedener Verbesserungspotentiale auf alle Wirkungskategorien. Die Ergebnisse sind in % der Basisergebnisse des Biogas-Systems dargestellt.

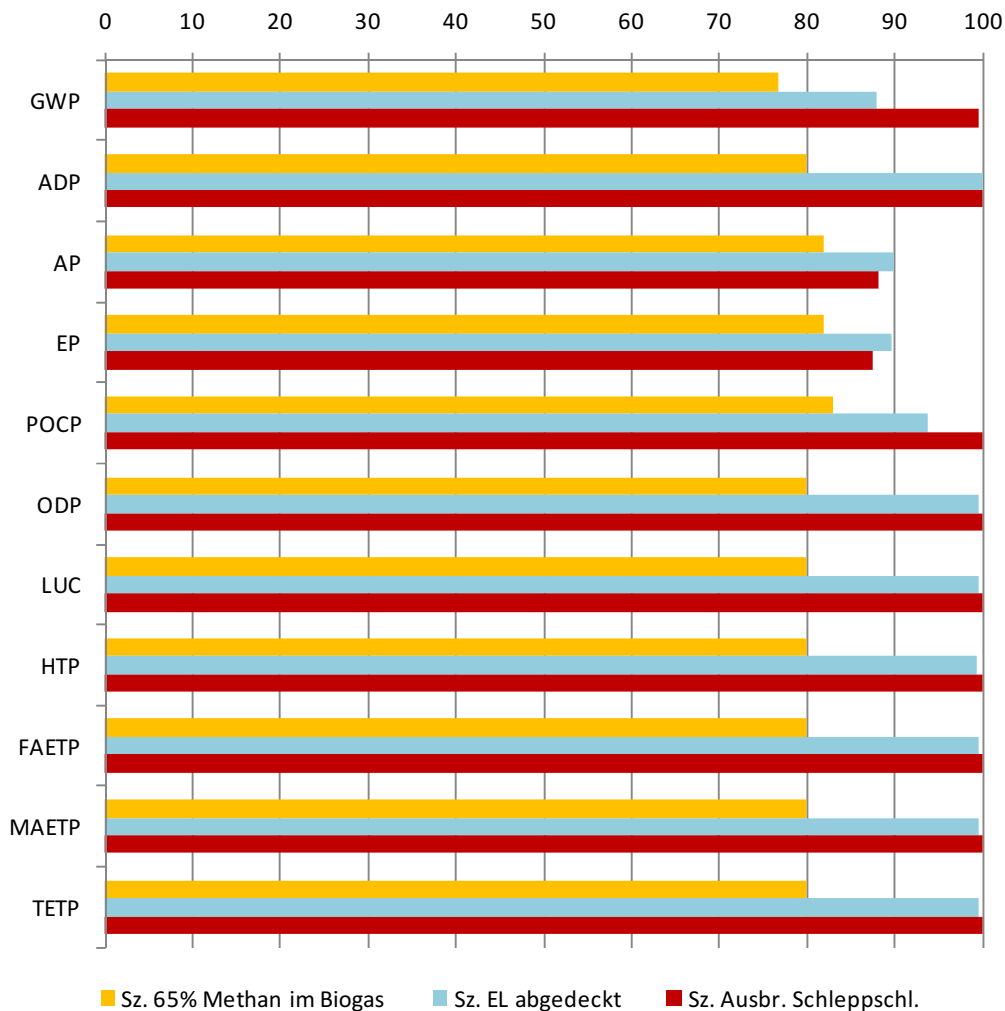


Abbildung 52: Verbesserungspotentiale des Biogas-Systems

4.1.5.1. Einfluss einer erhöhten Methankonzentration im Biogas

Die Verbrennung in Gasmotoren ist ein komplexer, kinetischer Prozess. 22,4% des Treibhauspotentials werden durch den sogen. Methanschluß (Methan, das im Gasmotor nicht verbrannt wird) verursacht. Diese Methanverluste sind von der Methankonzentration im Biogas abhängig (LfU 2002) und liegen für die untersuchten Anlagen im Mittel bei 1,5% (Minimum 0,4%, Maximum 1,8%) der produzierten Methanmenge. Um den Einfluss der Methankonzentration im Biogas auf die Gesamtergebnisse darzustellen, wurde ein hypothetisches Szenario entworfen, in dem für alle Anlagen eine Methankonzentration im Biogas von 65% angenommen wurde (ohne Änderungen im Substratmix oder beim Prozessmanagement zu berücksichtigen, die notwendig wären, um höhere Methankonzentrationen zu erreichen). Die reale Methankonzentration der untersuchten Anlagen liegt im Mittel bei 56% (Minimum: 49%, Maximum: 67%). Die Erhöhung der Methankonzentration auf 65% würde den Methanschluß auf durchschnittliche 1,1% reduzieren, sowie die Stromproduktion um 27,7% erhöhen. Die erhöhte Stromproduktion bewirkt eine Reduktion der Ergebnisse pro kWh_{el} für alle Wirkungskategorien um ca. 20%. Das Treibhauspotential würde durch die verringerten Methanemissionen aus dem BHKW zusätzlich um 3,3% (insgesamt 23,3%) reduziert werden, die Wirkungskategorien AP, EP und POCP würden sich nur um 18,11%; 18,06% bzw. 17,16% reduzieren, da die emittierten Mengen an NO_x und CO eine Funktion des Methan-Gehaltes im Biogas sowie der Luftüberschusszahl λ sind und sich somit in diesem Szenario ebenfalls erhöhen, was sich auf diese Wirkungskategorien auswirkt. Dieses Verbesserungspotential würde (von den drei hier untersuchten) die größte Reduktion der Umweltwirkung des Biogassystems bewirken. Es ist in Abbildung 52 als oranger Balken dargestellt. In Bezug auf die Gesamtergebnisse würde dieses Verbesserungspotential generell die Einsparungen durch das Biogasanlagen erhöhen sowie die Emissionen reduzieren. Im Falle des HTP wären die Emissionen damit gleich hoch wie die der konventionellen Stromproduktion, für das MAETP würden sich die Emissionen in Einsparungen umkehren.

4.1.5.2. Einfluss eines gasdicht geschlossenen Gärrest-Endlagers

Weitere 12,2% des Treibhauspotentials werden durch Emissionen aus den offenen Gärrest-Endlagern verursacht. Daher ist auch das Verbesserungspotential dieses Lebenszyklusabschnittes hoch, obwohl zu beachten bleibt, dass es sich bei den verwendeten Werten um berechnete und nicht um gemessene Werte handelt, welche die schon erwähnte Unsicherheit beinhalten. Eine Möglichkeit um die Emissionen aus der Gärrestlagerung zu vermeiden, ist die Gas-dichte Abdeckung der Endlager. Zusätzlich zu den vermiedenen Emissionen kann das im Endlager produzierte Methan dem BHKW zugeführt werden, was eine leichte Steigerung der Stromproduktion bewirkt. Durch dieses Verbesserungspotential könnte das Treibhauspotential der 41 untersuchten Anlagen im Mittel um 12% reduziert werden (vermiedene CH₄- und N₂O-Emissionen), das Versauerungs- und Eutrophierungspotential würden sich um ca. 10% reduzieren (vermiedene NH₃-Emissionen) und das photochemische Oxidantienbildungspotential um ca. 6% (vermiedene CH₄-Emissionen). Je nach Anlagenkonfiguration kann das Verbesserungspotential auch deutlich höher ausfallen. Die erhöhte Stromproduktion wirkt sich nur sehr gering auf die Gesamtergebnisse pro kWh_{el} aus: sie reduziert die Ergebnisse in allen Wirkungskategorien um 0,6%. Bezüglich des Gesamtergebnisses würden sich durch dieses Verbesserungspotential die Einsparungen in

den Wirkungskategorien GWP, AP und EP erhöhen, sowie die Emissionen des POCP reduzieren, es würde jedoch zu keiner Umkehr der Grundaussagen der Basiswerte kommen.

4.1.5.3. Einfluss der Gärrest-Ausbringtechnik

Wie bereits unter Punkt 3.2.5.2 (Gärrestausbringung) dargestellt, ist die Gärrestausbringung hauptverantwortlich für das Versauerungs- und Eutrophierungspotential des Biogas-Systems. Die dafür verantwortliche Substanz ist Ammoniak. Die Ammoniakemissionen bei der Ausbringung sind nach Edelman et al. 2001 neben der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration und der Menge des ausgebrachten Gärrestes auch von der Beschaffenheit des Bodens, seiner Feuchtigkeit, der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windstärke, dem Wachstumsstadium der Pflanzen sowie der Verdünnung der Gärreste abhängig. Reduktionen können durch die Beachtung der Wetterverhältnisse während der Ausbringung (nicht warm und trocken, besser am Abend als Mittags) sowie durch Verdünnung der Gärreste erzielt werden. Die Gärrest-Ausbringtechnik hat jedoch das größte Emissionsreduktionspotential. In der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche Ausbringmethoden zur Reduktion der Ammoniak-Emissionen berücksichtigt (Tabelle 23). Diese Ausbringtechniken unterscheiden sich jedoch bezüglich Investitionskosten, Bodenbelastung, Energieverbrauch und der Möglichkeit eines Einsatzes in straken Hanglagen, was allgemeine Schlussfolgerungen erschwert.

In dem in Abbildung 52 durch den roten Balken dargestellten Szenario, wird angenommen dass 100% des auszubringenden Gärrestes (der 41 untersuchten Anlagen) mit der Schleppschlauch-Ausbringtechnik ausgebracht werden (im Vergleich zu 35% in der realen Situation). Der Energieverbrauch des Ausbringungsprozesses wurde auf Grund mangelnder Daten im Vergleich zum Basisszenario nicht verändert. Dieses Verbesserungspotential würde das Versauerungspotential um 12% und das Eutrophierungspotential um 12,5% reduzieren. Die Reduktion des HTP um 0,7% durch die verringerten Ammoniakemissionen ist kaum erwähnenswert. Die übrigen Wirkungskategorien werden durch dieses Verbesserungspotential nicht beeinflusst (Das Treibhauspotential würde um 0,5% reduziert werden, da im Vergleich zum Basisszenario, in dem 5% der Gärreste mit der Injektionstechnik ausgebracht werden, welche eine Verdreifachung der Lachgasemissionen bewirken, nun hypothetisch auch mit dem Schleppschlauch ausgebracht werden). Bezüglich des Gesamtergebnisses würden sich durch dieses Verbesserungspotential die Einsparungen in den Wirkungskategorien GWP, AP und EP erhöhen, sowie die Emissionen des POCP reduzieren, es würde jedoch zu keiner Umkehr der Grundaussagen der Basiswerte kommen.

4.2. Holz-System

4.2.1. Betriebsparameter der untersuchten Anlagen des Holz-Systems

Die Betriebsparameter der untersuchten Anlagen sind in Tabelle 31 aufgeführt. Die Anlagen unterscheiden sich vor allem bezüglich Anlagengröße und Design und dem verwendeten Verfahren. Die eingesetzten Rohstoffe sind bei allen untersuchten Anlagen unbehandelte Waldhackschnitzel, da im Ökostromgesetz für dieses Substrat die höchsten Einspeisetarife vergütet werden.

Tabelle 31: Betriebsparameter der untersuchten Anlagen des Holz-Systems (Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung)

Betriebsparameter	Einheit	MITTELWERT	MIN	MAX	STABW
Biomasse Input	Srm/a	204020	84430	255689	80269
durchschnittl. Transportdistanz	km	67,4	37,0	85,1	21,2
Netto-Stromproduktion	MWh _{el} /a	32363	13790	42080	12637
Wärmenutzung	MWh _{th} /a	34268	16170	70000	24972
el. Wirkungsgrad	%	19,8	17,5	21,9	1,8
therm. Nutzungsgrad	%	24,7	8,4	46,9	18,8

4.2.2. Ergebnisse der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien:

Emissionen allgemein

Tabelle 32 zeigt die Wirkungsindikator-Ergebnisse für die Emissionen der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte sowie die Summe aller Lebenszyklusabschnitte für alle Wirkungskategorien pro kWh_{el}. Es handelt sich dabei jeweils um den Mittelwert der untersuchten Anlagen um einen ersten Einblick in die Größenordnung der Emissionen sowie der Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte am Gesamtergebnis zu verschaffen.

Tabelle 32: Emissionen der Lebenszyklusabschnitte des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien pro kWh_{el}

	Einheit	NAVARO	STABW	Transport	STABW	Betrieb Anlage	STABW	Backup-Sys.	STABW	Infrastruktur	STABW	SUMME	STABW
ADP	kg CO ₂ -eq.	2,7E-04	7,7E-05	1,4E-04	5,0E-05	7,1E-05	1,1E-04	1,6E-05	2,4E-05	6,5E-05	2,8E-05	5,6E-04	1,5E-04
GWP	kg Sb-eq.	4,0E-02	1,1E-02	1,9E-02	6,8E-03	1,4E-02	2,4E-02	3,4E-04	5,0E-04	7,1E-03	3,0E-03	8,1E-02	2,7E-02
AP	kg SO ₂ -eq.	3,4E-04	1,1E-04	1,4E-04	4,9E-05	1,5E-03	8,8E-04	7,0E-06	9,0E-06	5,6E-05	3,0E-05	2,0E-03	8,9E-04
EP	kg PO ₄ -eq.	6,7E-05	1,9E-05	2,3E-05	7,9E-06	3,1E-04	2,0E-04	9,9E-07	1,2E-06	6,2E-06	2,7E-06	4,0E-04	2,0E-04
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq.	1,4E-05	3,1E-06	3,8E-06	1,3E-06	1,5E-05	1,6E-05	2,4E-07	3,5E-07	4,5E-06	2,1E-06	3,7E-05	1,6E-05
ODP	kg CFC-11-eq.	4,8E-09	1,4E-09	2,7E-09	9,6E-10	8,7E-10	1,1E-09	3,2E-10	4,7E-10	4,9E-10	2,4E-10	9,2E-09	2,1E-09
HTP	kg 1,4-DCB-eq.	2,4E-02	7,9E-03	6,2E-03	1,1E-03	8,6E-03	5,2E-03	2,5E-04	3,6E-04	2,6E-02	1,7E-02	6,5E-02	1,9E-02
TAETP	kg 1,4-DCB-eq.	1,4E-04	3,6E-05	6,0E-05	1,9E-05	2,3E-04	4,5E-04	2,2E-06	3,2E-06	1,9E-04	9,8E-05	6,3E-04	4,6E-04
FAETP	kg 1,4-DCB-eq.	3,2E-03	8,5E-04	1,0E-03	2,4E-04	3,3E-02	1,1E-02	2,5E-05	3,7E-05	3,8E-03	1,7E-03	4,1E-02	1,1E-02
MAETP	kg 1,4-DCB-eq.	6,0E+00	1,7E+00	3,5E+00	7,9E-01	2,0E+01	8,1E+00	2,2E-01	3,2E-01	6,6E+00	2,8E+00	3,6E+01	8,7E+00
LUC	m ² a ⁻¹	1,2E+00	8,7E-01	5,6E-04	7,1E-05	7,5E-03	1,5E-02	4,8E-06	7,1E-06	9,6E-04	9,3E-05	1,2E+00	8,7E-01

NAWAROs.....	Lebenszyklusabschnitt: „Breistellung der nachwachsenden Rohstoffe (Mittelwert der 4 Anlagen)
Transport.....	Lebenszyklusabschnitt: Transport der Substrate zur Anlage (Mittelwert der 4 Anlagen)
Betrieb BGA.....	Lebenszyklusabschnitt: Betrieb der Biogasanlage (Aufwände für Lagerung, Beschickung, Schmiermittel, etc. sowie Emissionen aus der Verbrennung und Entsorgung der Asche) (Mittelwert der 4 Anlagen)
Infrastruktur.....	Lebenszyklusabschnitt: Infrastruktur der BGA (inkl. Lager, Feuerung/Vergasungseinrichtung, Kessel, Gasmotor, Rauchgasreinigung, etc.) (Mittelwert der 41 Anlagen)
STABW.....	Standardabweichung der 41 Anlagen

Anhand von Abbildung 53 soll der Beitrag der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte zu den einzelnen Wirkungskategorien vorab kurz diskutiert werden, eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse aller untersuchten Anlagen in den einzelnen Wirkungskategorien folgt im Anschluss daran.

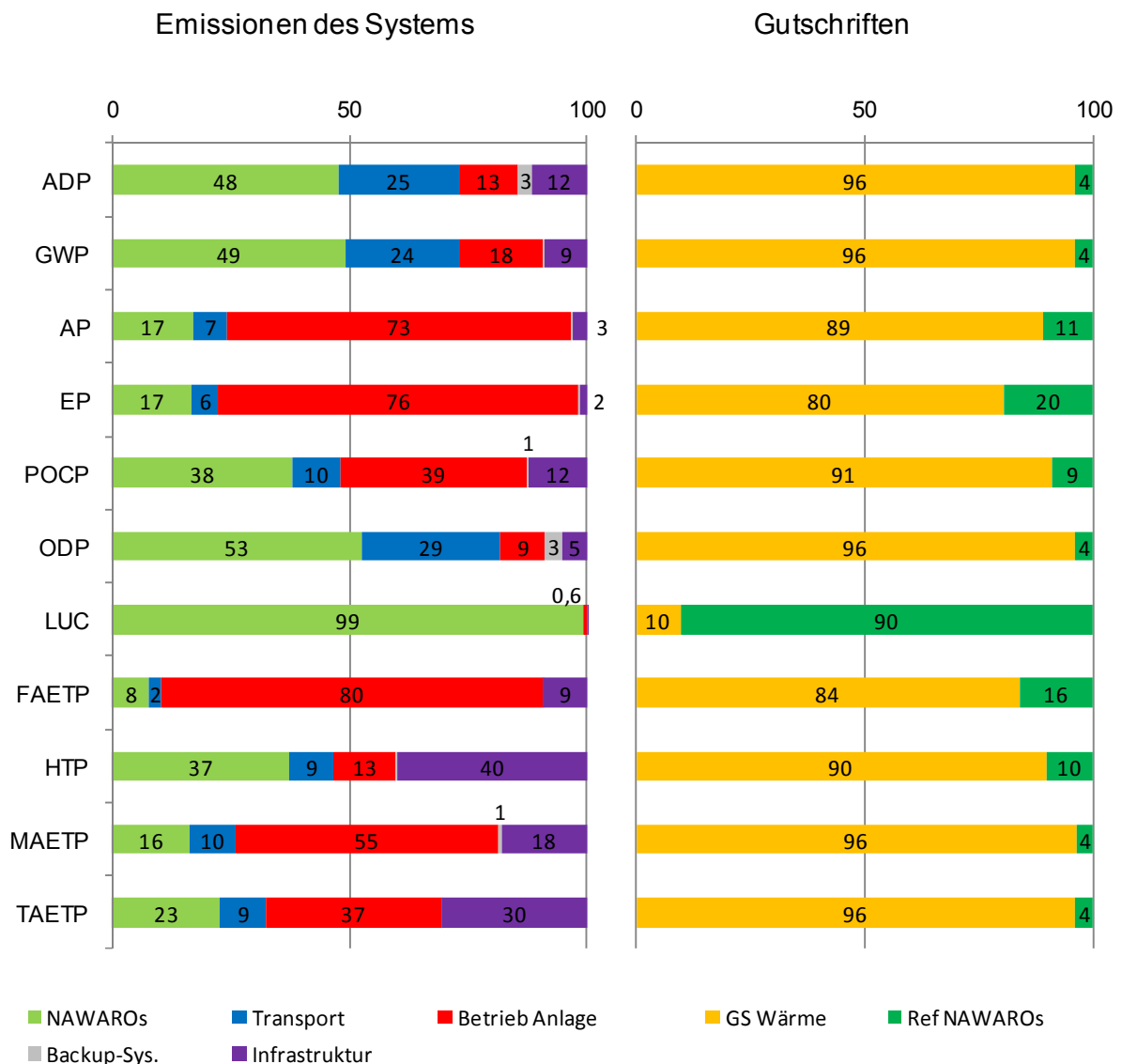


Abbildung 53: Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des „Holz-Systems“ an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften in allen Wirkungskategorien.

Der Anteil der Produktion nachwachsender Rohstoffe (Wald-Hackschnitzel) an den Gesamtergebnissen in den verschiedenen Wirkungskategorien liegt zwischen 13 und 99%. Mit Abstand am größten ist er für die Wirkungskategorie Landnutzung. Auch in den Wirkungskategorien Ozonabbaupotential, Treibhauspotential und Verbrauch abiotischer Ressourcen trägt diese Wirkungskategorie mit ca. 50% maßgeblich zum Gesamtergebnis bei. Der Anteil an den Toxizitätspotentialen sowie am photochemischen Oxidantienbildungspotential liegt zwischen 13 und 38%. Mit 17% ist der Anteil für die Versauerung und Eutrophierung eher gering.

Der Anteil des Transportes an den Gesamtergebnissen liegt für alle Wirkungskategorien unter 30%. Am höchsten ist er für die Kategorien ODP, ADP und GWP. Für die übrigen Wirkungskategorien liegt er zwischen 2 und 10%.

Der Betrieb der Anlagen wirkt sich am stärksten auf die Wirkungskategorien FAETP (80%) EP (76%) sowie AP (73%) aus. Der Beitrag zu den Wirkungskategorien TAETP, POCP und MAETP liegt zwischen 37 und 55%. Zu den übrigen Wirkungskategorien trägt dieser Lebenszyklusabschnitt zwischen 0,6% (Landnutzung) und 18% (GWP) bei.

Bei manchen Anlagen wurden im untersuchten Jahr auch in geringem Ausmaß Backup-Systeme (meist mit Heizöl befeuert) benötigt. Der Einfluss dieses Lebenszyklusabschnittes auf die Gesamtergebnisse liegt jedoch immer unter 3%.

Der Einfluss der Infrastruktur auf die Gesamtergebnisse ist am größten für die Toxizitätspotentiale (9-40%) gefolgt von den Wirkungskategorien ADP, POCP und GWP. Für die übrigen Wirkungskategorien liegt der Anteil der Infrastruktur am Gesamtergebnis zwischen 0,1 und 5%.

Referenznutzungen und Gutschriften allgemein

Tabelle 33 zeigt die Emissionen der Referenznutzungen bzw. Gutschriften (Mittelwert aller Anlagen) bezogen auf 1 kWh_{el} der zugehörigen Anlagen.

Tabelle 33: Emissionen der Referenznutzungen und Gutschriften des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien bezogen auf 1 kWh_{el}

		GS Wärme	STABW	Ref NAWAROS	STABW	SUMME	STABW
	Einheit						
GWP	kg CO ₂ -eq.	2,9E-01	2,3E-01	1,3E-02	5,4E-03	3,1E-01	2,3E-01
ADP	kg Sb-eq.	2,1E-03	1,6E-03	8,6E-05	3,7E-05	2,2E-03	1,6E-03
AP	kg SO ₂ -eq.	8,1E-04	6,3E-04	1,0E-04	4,6E-05	9,1E-04	6,4E-04
EP	kg PO ₄ -eq.	9,2E-05	7,2E-05	2,2E-05	8,6E-06	1,1E-04	7,3E-05
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq.	5,8E-05	4,5E-05	5,8E-06	2,1E-06	6,3E-05	4,5E-05
ODP	kg CFC-11-eq.	3,7E-08	2,9E-08	1,6E-09	6,6E-10	3,9E-08	2,9E-08
HTP	kg 1,4-DCB-eq.	6,3E-02	4,9E-02	7,3E-03	3,1E-03	7,0E-02	4,9E-02
TAETP	kg 1,4-DCB-eq.	1,4E-03	1,1E-03	5,9E-05	2,0E-05	1,5E-03	1,1E-03
FAETP	kg 1,4-DCB-eq.	6,2E-03	4,8E-03	1,2E-03	4,1E-04	7,4E-03	4,9E-03
MAETP	kg 1,4-DCB-eq.	5,1E+01	4,0E+01	1,9E+00	8,4E-01	5,3E+01	4,0E+01
LUC	m ² a ⁻¹	9,1E-02	7,1E-02	8,4E-01	9,0E-01	9,3E-01	9,1E-01

Die Ergebnisse sind grafisch in Abbildung 53 dargestellt. Es zeigt sich sehr deutlich, dass die Gutschrift für die Wärmenutzung hauptverantwortlich für die Gesamtergebnisse in fast allen

Wirkungskategorien ist (Anteile zwischen 80 und 96%). Nur in der Wirkungskategorie Landnutzung ist die Referenznutzung der nachwachsenden Rohstoffe für 90% der Gesamt-Gutschriften verantwortlich.

Verbrauch abiotischer Ressourcen (ADP)

Wie in Abbildung 54 dargestellt, ist der Lebenszyklusabschnitt, der emissionsseitig am meisten zum Verbrauch abiotischer Ressourcen beiträgt die Produktion der NAWAROs gefolgt vom Transport. Hauptquellen für diese Wirkungskategorie sind die Verwendung fossiler Brennstoffe und die Herstellung von Baumaterialien bzw. forstwirtschaftlichen Maschinen und Transportmitteln. Bei Anlage 4 ist der Beitrag des Lebenszyklusabschnittes Betrieb der Anlage deutlich größer als bei den übrigen Anlagen. Die ist dadurch zu erklären, dass es sich bei dieser Anlage um eine Vergasungsanlage handelt, welche zur Vergasung Olivin und Kalkstein benötigt, welche beide zu den abiotischen Ressourcen zählen und welche zu ihrer Bereitstellung fossile Energie benötigen. Der Beitrag des Backup-Systems ist für alle Wirkungskategorien gering, da jedoch Heizöl als Energieträger verwendet wird, ist er in der Wirkungskategorie ADP vergleichsweise am höchsten (3%).

Auf Seite der Gutschriften ist vor allem die Wärmenutzung für den Gesamtverbrauch abiotischer Ressourcen verantwortlich.

Insgesamt schneidet Anlage 4 aufgrund des hohen thermischen Nutzungsgrades (46,9%) am besten ab. Anlage 1 schneidet am schlechtesten ab, wobei auch bei dieser Anlage eine Einsparung an abiotischen Ressourcen erzielt werden kann. Ohne Beachtung der Gutschriften liegen alle Anlagen sehr knapp beisammen, wobei Anlage 4 mit 0,000497 kg Sb.-eq./kWh_{el} am besten und Anlage 2 mit 0,000606 kg Sb.-eq./kWh_{el} am schlechtesten abschneidet. Der Mittelwert der Holz-Systeme liegt ohne Beachtung der Gutschriften unter jenem der Biogas-Systeme, mit Beachtung der Gutschriften kann eine höhere Einsparung als mit den Biogas-Systemen erreicht werden (Mittelwert Biogas-Systeme: -0,00049 kg Sb.-eq./kWh_{el}; Mittelwert Holz-Systeme: 0,00162 kg Sb.-eq./kWh_{el}).

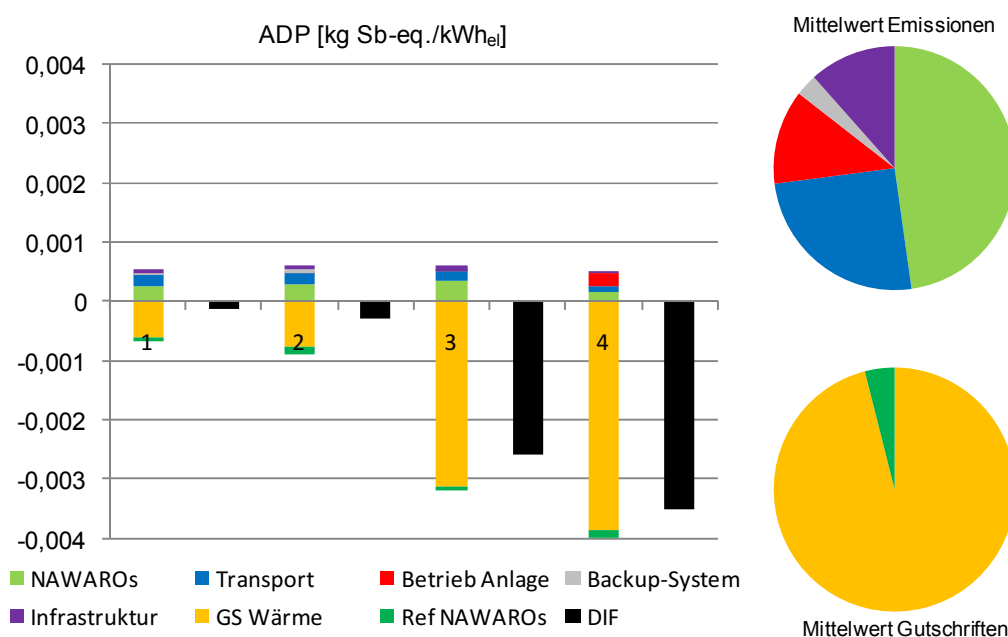


Abbildung 54: Detaillierte Ergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Verbrauch abiotischer Ressourcen für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Treibhauspotential (GWP)

Wie auch schon beim ADP sind beim Treibhauspotential emissionsseitig vor allem die Lebenszyklusabschnitte Produktion der NAWAROs, Transport sowie auch der Betrieb der Anlagen für die Gesamtemissionen verantwortlich. Beim Betrieb der Anlagen sticht wieder Anlage 4 (Vergasung) heraus, bei welcher die Emissionen in diesem Lebenszyklusabschnitt deutlich höher als bei den anderen Anlagen sind (Abbildung 55). Neben Olivin und Kalkstein für die Vergasung verwendet diese Anlage auch Biodiesel für den Betrieb des Scrubbers zur Gasreinigung, was sich auch auf das Treibhauspotential auswirkt.

Hauptverantwortlich für das Treibhauspotential des Holz-Systems sind CO₂-Emissionen fossilen Ursprungs (91%), welche durch die Verwendung fossiler Treibstoffe für die Produktion, den Transport, die Herstellung von Betriebsmitteln, etc. entstehen (siehe Abbildung 56).

Insgesamt ist wieder die Gutschrift für die Wärmenutzung in Abhängigkeit vom thermischen Nutzungsgrad für das Gesamtergebnis ausschlaggebend. Deshalb ist auch die Reihenfolge der Anlagen gleich wie beim ADP.

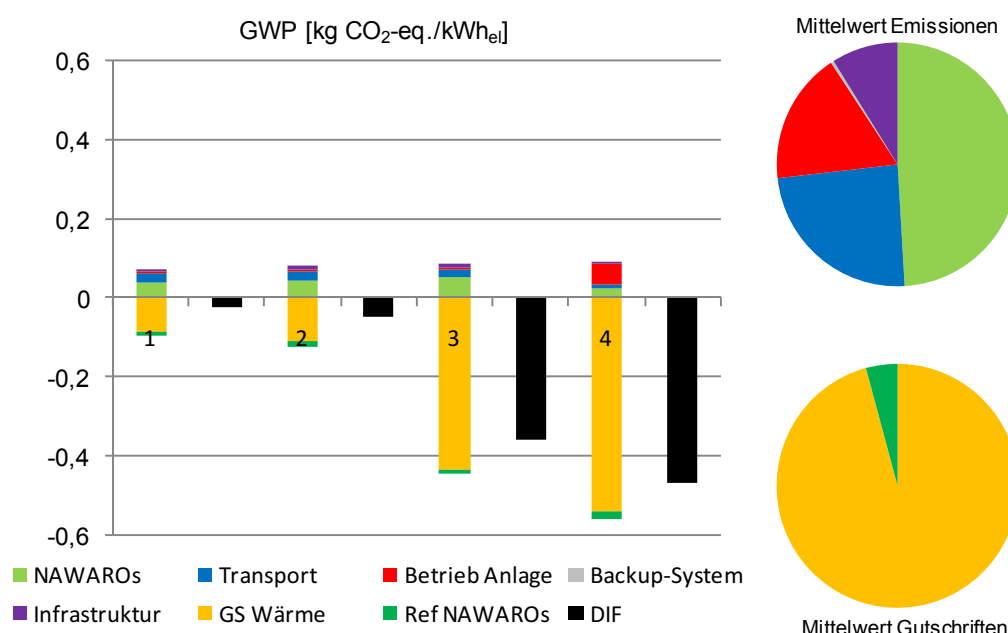


Abbildung 55: Detailliergegebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Treibhauspotential für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Ohne Beachtung der Gutschriften würde beim GWP jedoch Anlage 1 am besten und Anlage 4 am schlechtesten abschneiden, wobei die Treibhausgas-Emissionen der Anlagen wieder sehr knapp beieinander liegen (0,073 bis 0,087 kg CO₂-eq./kWh_{el}).

Im Vergleich zum Biogas-System können im Mittelwert aller Anlagen unter Beachtung der Gutschriften etwas weniger Treibhausgasemissionen eingespart werden (Mittelwert Biogas-Systeme: -0,389 kg CO₂-eq./kWh_{el}; Mittelwert Holz-Systeme: -0,224 kg CO₂-eq./kWh_{el}), was durch die großen Gutschriften für die Referenznutzungen der Wirtschaftsdünger und der organischen Reststoffe im Biogas-System zu erklären ist. Ohne Beachtung der Gutschriften liegen die Treibhausgasemissionen des Holzsystems jedoch deutlich unter jenen des Biogassystems (Mittelwert Biogas-Systeme: 0,362 kg CO₂-eq./kWh_{el}; Mittelwert Holz-Systeme: 0,080 kg CO₂-eq./kWh_{el}), was durch die hohen Treibhausgasemissionen der

Lebenszyklusabschnitte Biogas-BHKW sowie Gärrestlagerung und –ausbringung im Biogas-System zu erklären ist.

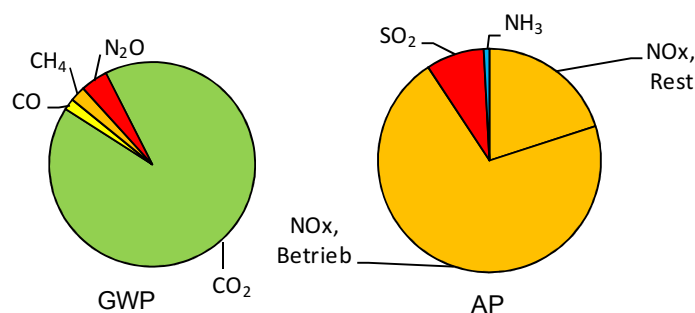


Abbildung 56: Anteil einzelner Substanzen an den Gesamtemissionen des Holz-Systems für die Wirkungskategorien GWP und AP.

Versauerung (AP) und Eutrophierung (EP)

Für diese Wirkungskategorien ist der Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Anlage auf der einen bzw. Gutschrift Wärmenutzung auf der anderen Seite hauptverantwortlich. Geringere Bedeutung kommt der Produktion der NAWAROs sowie dem Transport zu.

91% des Versauerungspotentials werden durch NO_x -Emissionen verursacht, wobei knapp 70% durch den Betrieb der Anlage verursacht werden, der Rest entsteht durch vorgelagerte Verbrennungsprozesse (z.B. NAWARO-Produktion, Transport), genauso wie SO_2 - und NH_3 -Emissionen, die rund 8 bzw. 1% des Versauerungspotentials bewirken (siehe Abbildung 56).

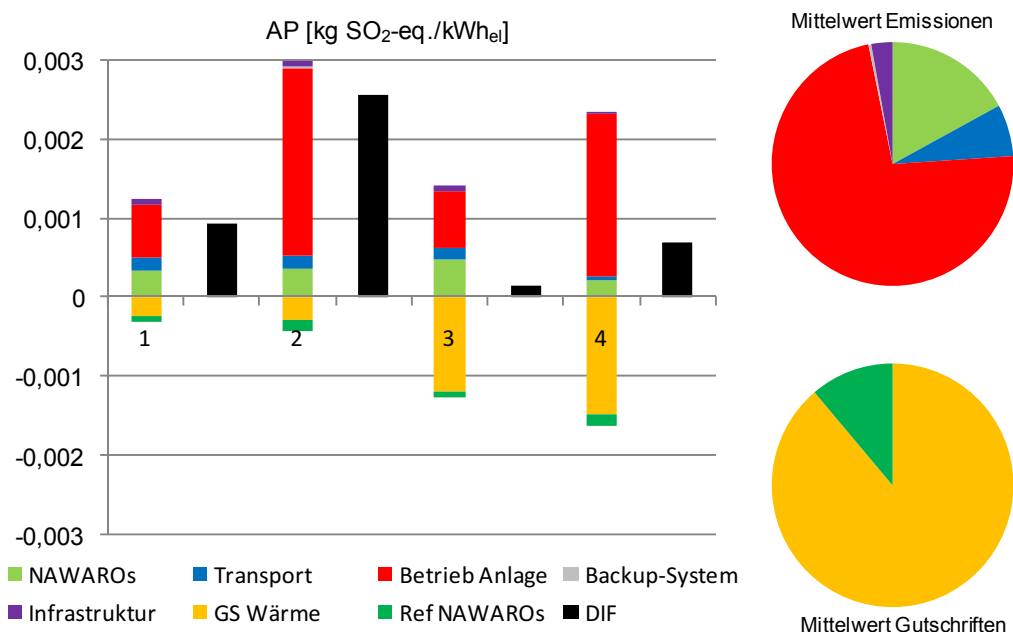


Abbildung 57: Detaillierergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Versauerung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

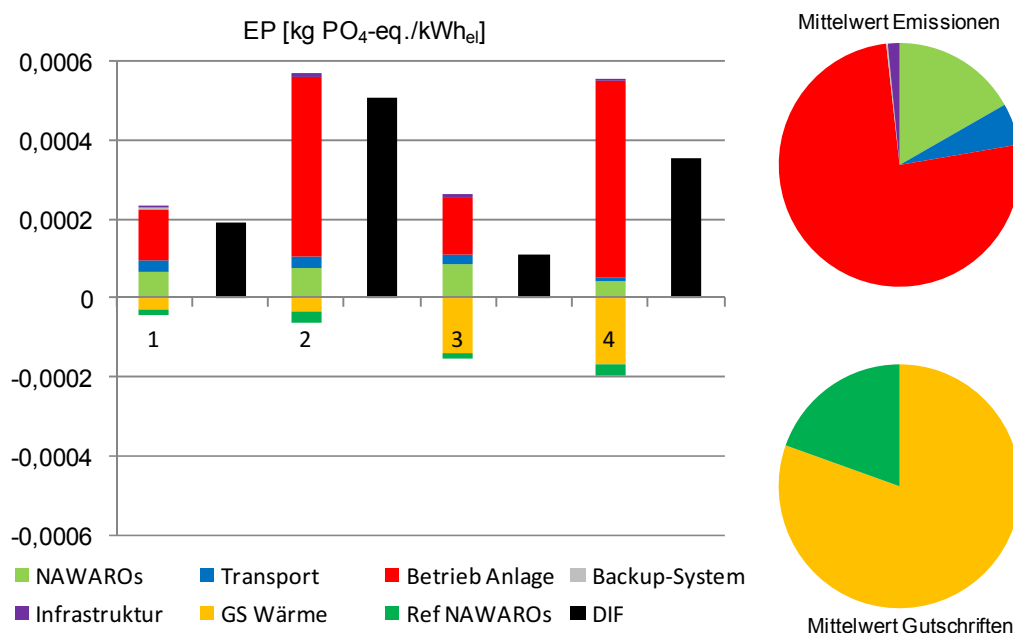


Abbildung 58: Detaillierergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Eutrophierung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Aufgrund der geringen Gutschriften können für keine der untersuchten Anlagen Einsparungen in diesen Wirkungskategorien erzielt werden. Mit (genauso wie ohne) Beachtung der Gutschriften schneidet Anlage 2 am schlechtesten und Anlage 1 am besten ab (siehe Abbildung 57 und Abbildung 58)

Verglichen mit dem Biogas-System liegen die reinen Emissionen (ohne Beachtung der Gutschriften) für das Holz-System um den Faktor 10 (AP) bzw. 5 (EP) niedriger, für das Biogas-System ergeben sich jedoch auf Grund der hohen Gutschriften für die Referenznutzungen Wirtschaftsdünger und organische Reststoffe unter Beachtung der Gutschriften insgesamt geringfügige Einsparungen.

Photochemisches Oxidantienbildungspotential (POCP)

Das POCP wird emissionsseitig zu etwa gleichen Teilen durch die Lebenszyklusabschnitte Produktion der NAWAROs und Betrieb der Anlage verursacht. Auf Seite der Gutschriften ist die Gutschrift für die Wärmenutzung hauptverantwortlich. Bei Anlage 4 fällt wieder der, im Vergleich zu den anderen Anlagen, höhere Beitrag des Betriebs der Anlage zum Gesamtergebnis auf. Dieses wird durch die zusätzlich für die Vergasung benötigten Betriebsmittel verursacht (siehe Abbildung 59).

Insgesamt ergeben sich für Anlagen mit einem hohen thermischen Nutzungsgrad Einsparungen und für Anlagen mit einem geringeren thermischen Nutzungsgrad geringfügige Emissionen.

Im Vergleich zum Biogassystem schneidet das Holz-System mit und ohne Beachtung der Gutschriften besser ab: ohne Beachtung der Gutschriften liegen die Emissionen im Mittelwert ca. um den Faktor 3 niedriger und mit Beachtung der Gutschriften kann mit dem Holz-System im Gegensatz zum Biogas-System eine Einsparung erzielt werden.

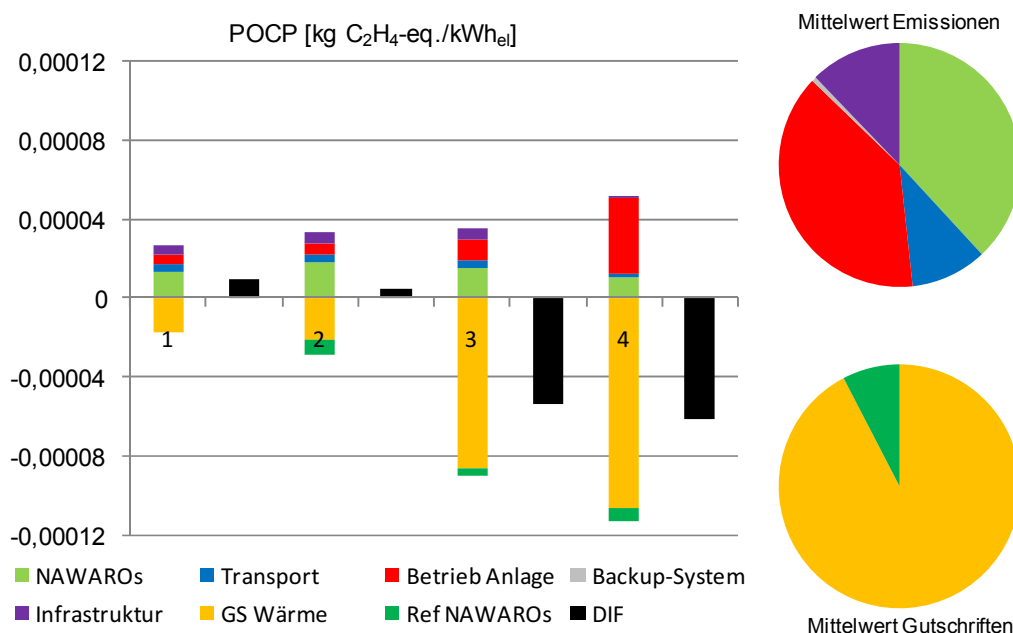


Abbildung 59: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie photochemische Oxidantienbildung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Ozonabbau (ODP)

Die hauptverursachenden Lebenszyklusabschnitte in der Wirkungskategorie Ozonabbau sind die Produktion der NAWAROs, der Transport sowie die Gutschrift Wärme.

Abhängig vom thermischen Nutzungsgrad der Anlage kann für alle untersuchten Anlagen eine Einsparung erreicht werden (Abbildung 60). Im Vergleich zum Biogas-System, ist diese Einsparung im Mittelwert etwas höher, wobei die reinen Emissionen (ohne Beachtung der Gutschriften) für beide Systeme in der gleichen Größenordnung liegen.

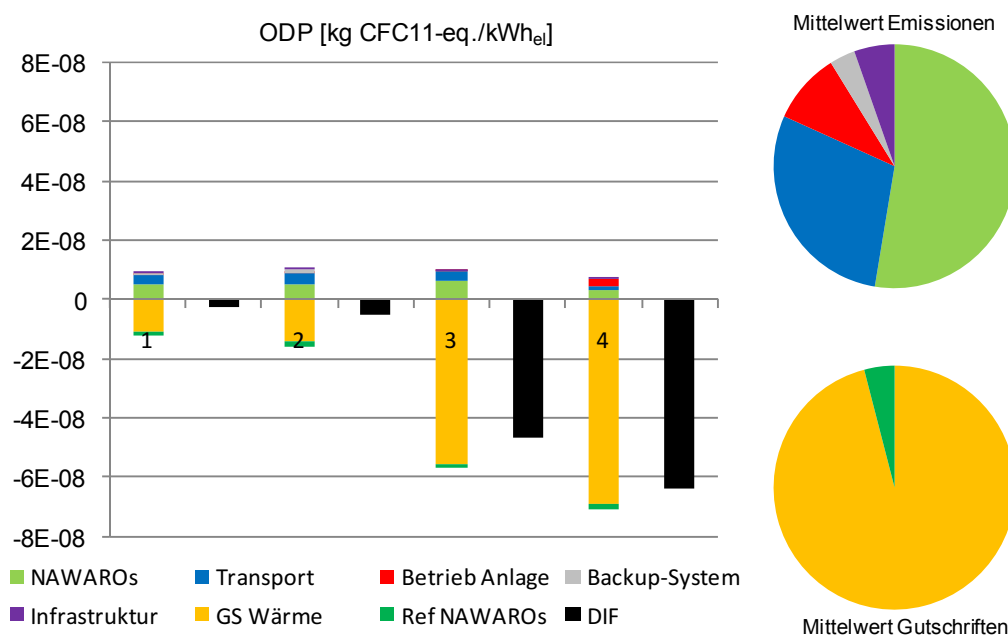


Abbildung 60: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Ozonabbau für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Landnutzung (LUC)

Hauptverantwortlich für die Landnutzung ist der Lebenszyklusabschnitt Produktion der NAWAROs. Da im österreichischen Wärmeerzeugungsmix auch Brennholz enthalten ist, hat auch die Gutschrift Wärmenutzung je nach Ausmaß der Wärmenutzung einen sichtbaren Anteil an den Gesamtgutschriften. Im Falle der Anlage 4 wird der Einfluss des Betriebsmittels Biodiesel sichtbar (wenn auch der Anteil mit 0,1% der Gesamtaufwendung sehr gering ist), welcher ebenfalls Fläche für seine Produktion benötigt (siehe Abbildung 61).

Der Flächenbedarf sinkt zwar in Abhängigkeit vom thermischen Nutzungsgrad, es kann aber für keine Anlage des Holz-Systems eine Einsparung an landwirtschaftlicher Fläche erzielt werden, wodurch der Aufwand in dieser Wirkungskategorie größer als im Biogas-System (Einsparung) ist.

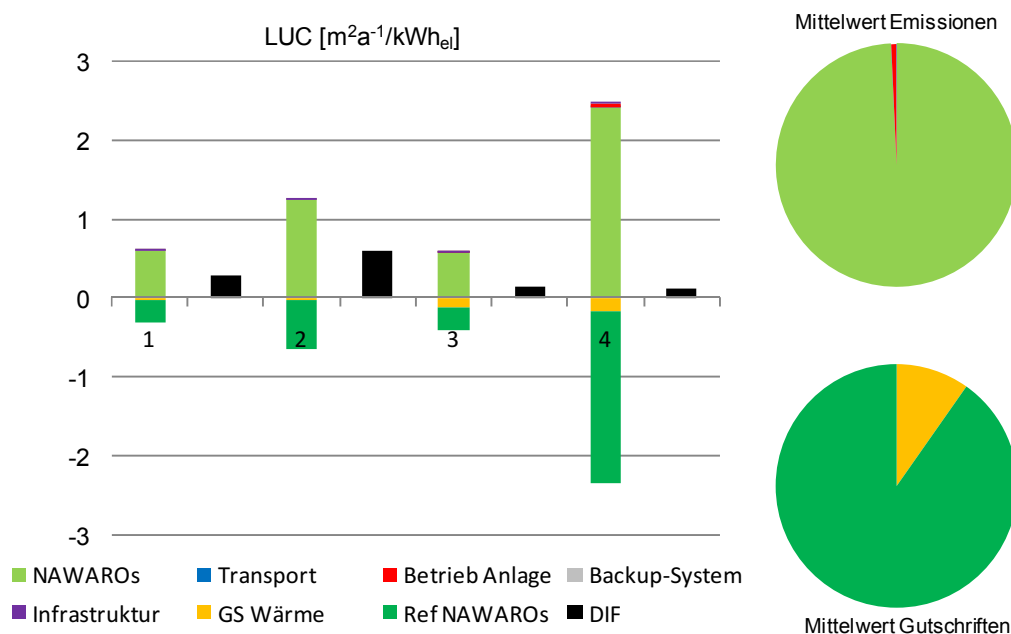


Abbildung 61: Detaillierte Ergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Landnutzung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

Humantoxizität und terrestrische Ökotoxizität

Die Emissionsprofile für diese beiden Wirkungskategorien sind ähnlich, weshalb sie gemeinsam diskutiert werden (Abbildung 62 und Abbildung 63). Hauptverantwortlich für die Gesamtemissionen sind die Lebenszyklusabschnitte Produktion der NAWAROs, Infrastruktur, sowie die Gutschrift Wärmenutzung.

Vor allem für die terrestrische Ökotoxizität ist der Beitrag des Betriebes der Anlage für Anlage 4 (Vergasung) höher als für die anderen Anlagen, was auf die Verwendung von Biodiesel für den Betrieb des Scrubbers zur Gasreinigung zurückzuführen ist, welcher die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln erfordert, welche ein hohes Wirkungspotential in dieser Wirkungskategorie aufweisen.

Für das HTP weisen die Anlagen mit hohem thermischen Nutzungsgrad Einsparungen, jene mit niedrigerem thermischen Nutzungsgrad Emissionen auf (siehe Abbildung 62). Im Mittelwert ergibt sich jedoch eine geringe Einsparung im Gegensatz zu Emissionen im Biogas-System.

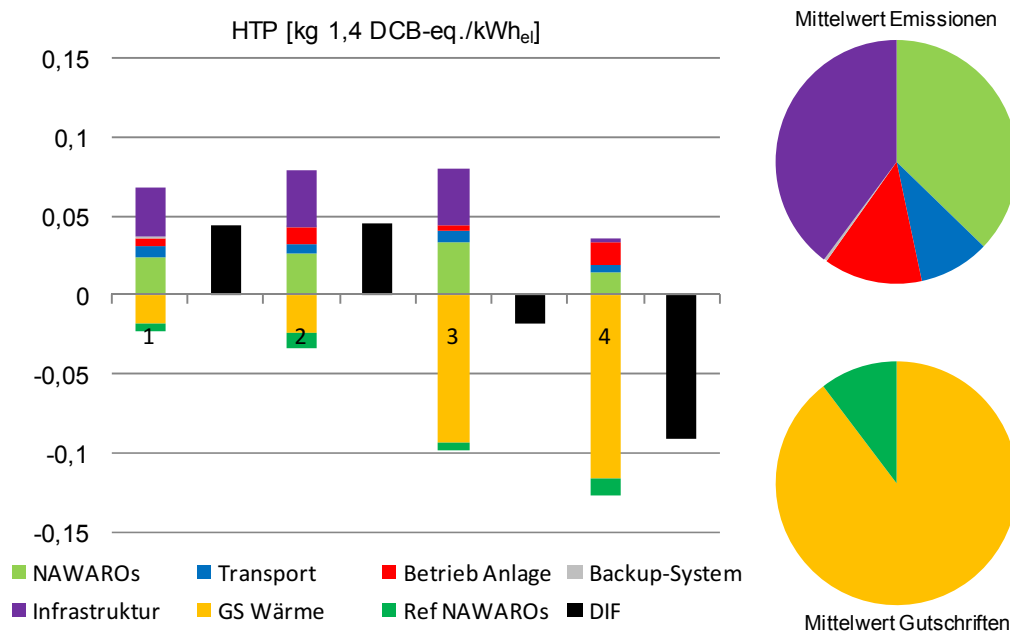


Abbildung 62: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Humantoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

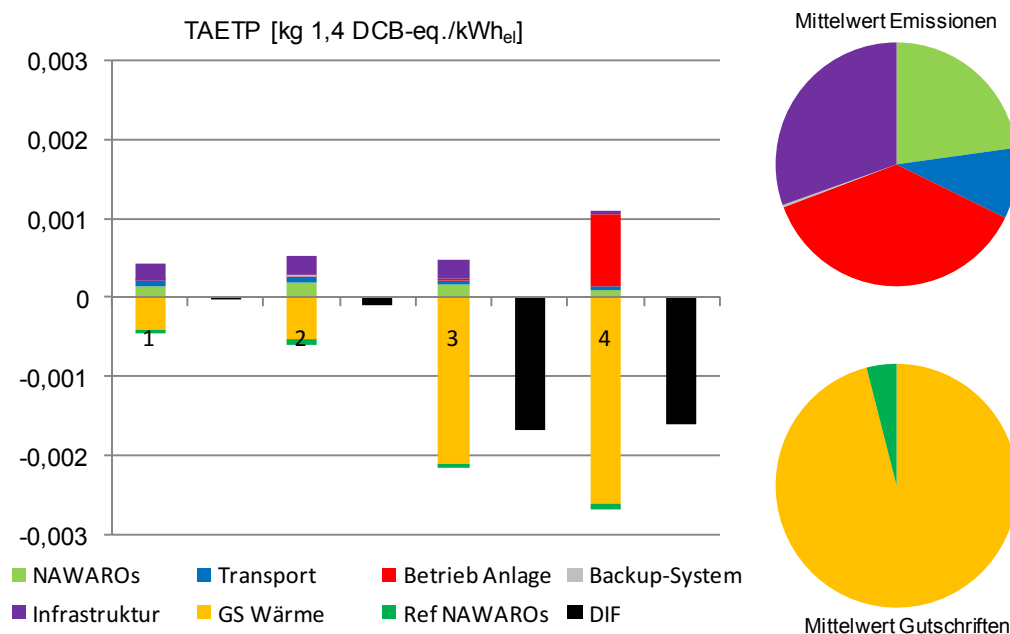


Abbildung 63: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie terrestrische Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

In der Wirkungskategorie TAETP können für alle Anlagen Einsparungen erzielt werden, welche je nach Ausmaß der Wärmenutzung höher, oder annähernd null ausfallen (Abbildung 63), im Mittelwert jedoch etwa doppelt so hoch wie die Einsparungen durch das Biogas-System sind.

Süß- und Salzwasserökotoxizität (FAETP und MAETP)

Die Emissionsprofile der Wirkungskategorien FAETP und MAETP ähneln sich ebenfalls, weshalb sie gemeinsam diskutiert werden (Abbildung 64 und Abbildung 65).

Hauptverantwortlich für die Gesamtemissionen sind die Lebenszyklusabschnitte Betrieb der Anlage (besonders für das FAETP) sowie die Gutschrift für die Wärmenutzung. Innerhalb des Betriebes der Anlage ist die Entsorgung der anfallenden Asche in Deponien hauptverantwortlich für die toxische Wirkung (50% der Gesamtemissionen). Dies erklärt auch den Unterschied zwischen Anlage 1 und 2 (die sonst sehr ähnliche Inputdaten aufweisen): Bei Anlage 1 werden knapp 40% der Asche auf Felder ausgebracht, die daher nicht in Deponien entsorgt werden müssen.

Insgesamt können in der Wirkungskategorie FAETP keine Einsparungen erzielt werden und die Emissionen liegen auch leicht über jenen des Biogas-Systems.

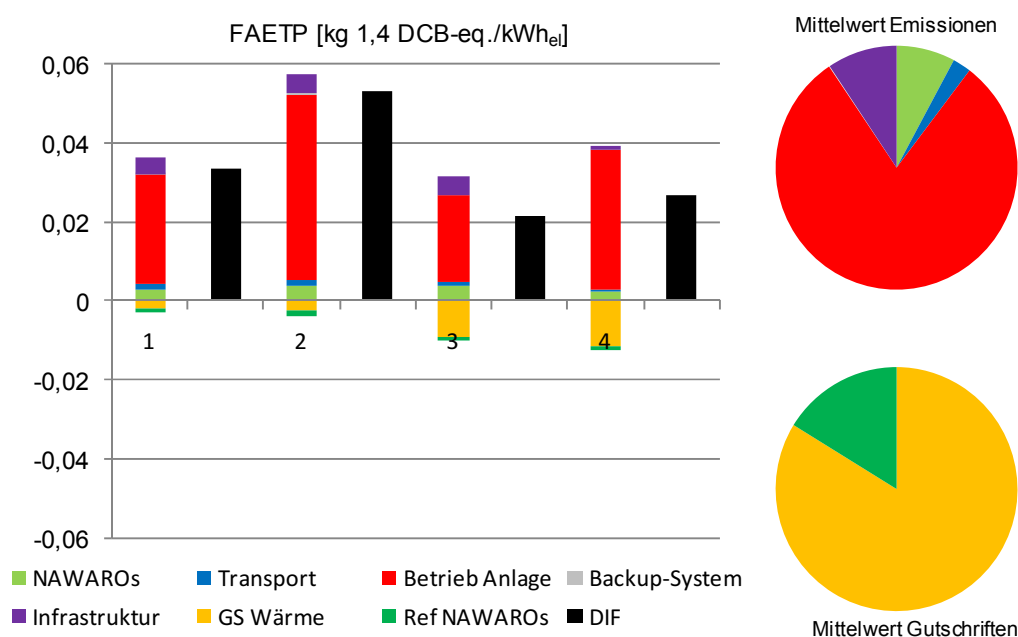


Abbildung 64: Detaillierungsergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Süßwasser-Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

In der Wirkungskategorie MAETP kann für Anlagen mit hohem thermischen Nutzungsgrad eine Einsparung, für jene mit geringerem keine Einsparung erzielt werden. Im Mittelwert ergibt sich jedoch eine Einsparung im Gegensatz zu geringfügigen Emissionen für den Mittelwert der Biogasanlagen in dieser Wirkungskategorie.

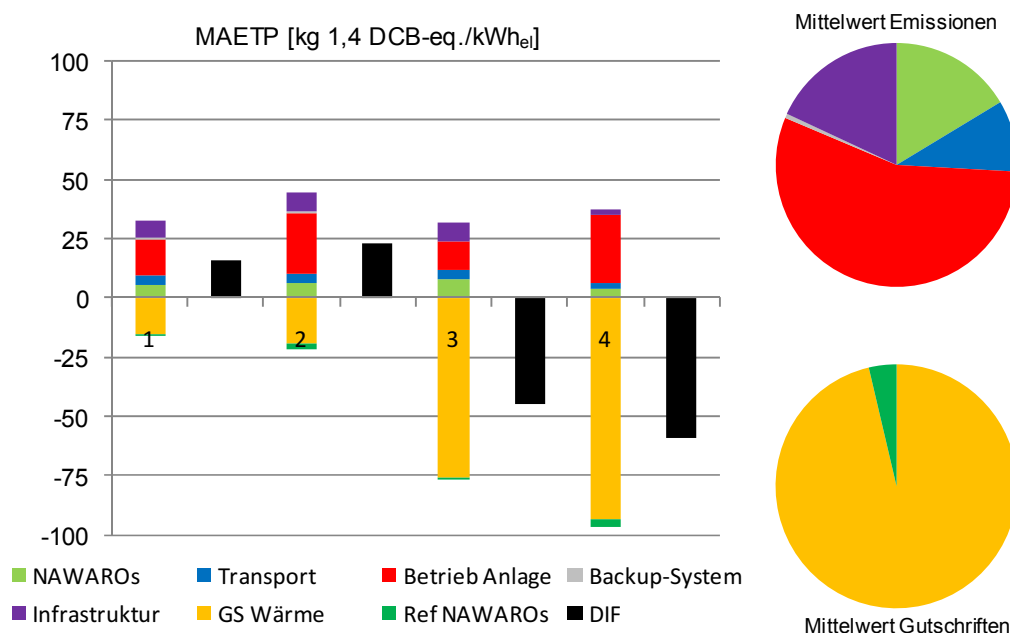


Abbildung 65: Detaillierergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Salzwasser-Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.

4.2.3. Gesamtergebnisse des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien

Wie bereits erwähnt, können die Gesamtergebnisse des untersuchten Systems sowohl positiv (=Emissionen im Vergleich zur Situation ohne Verbrennungs-/Vergasungsanlage) als auch negativ (=Einsparungen im Vergleich zur Situation ohne Verbrennungs-/Vergasungsanlage) ausfallen. In Abbildung 66 und Abbildung 67 sind für jede Wirkungskategorie 4 Balken dargestellt: der oberste Balken (SYS) stellt die Emissionen des Holz-Systems dar, der zweite Balken (REF) stellt die Gutschriften und Referenznutzungen dar, der dritte Balken (DIF, schwarz) stellt die Differenz zwischen Emissionen und Gutschriften/Referenznutzungen dar und der vierte Balken (KS, grau) stellt die Emissionen des konventionellen Systems zur Stromerzeugung in Österreich dar. Im Durchschnitt aller untersuchten Anlagen ergeben sich für die Wirkungskategorien GWP, ADP, POCP, ODP, HTP, TAETP und MAETP Einsparungen, für die Wirkungskategorien AP, EP, LUC und FAETP ergeben sich zusätzliche Emissionen.

Im Vergleich zum österreichischen Strom-Produktionsmix, schneidet das Holz-System in fast allen Wirkungskategorien besser ab, nur in den Wirkungskategorien, in denen Emissionen auftreten, sind diese auch höher als jene des österreichischen Strommixes: AP (ca. 3-fach), EP (ca. 10-fach), LUC (80-fach) und FAETP (ca. 5,5-fach). Hauptverursacher der Emissionen des Holz-Systems in den Wirkungskategorien, in denen Emissionen auftreten (AP, EP, FAETP) ist der Betrieb der Anlage sowie die Produktion der NAWAROs für den Flächenverbrauch (LUC), welche auch in den übrigen Kategorien eine bedeutende Rolle spielt. Bei der Betrachtung des Balkens für die Referenznutzungen/Gutschriften fällt auf, dass die Gutschrift Wärmenutzung einen sehr starken Einfluss auf das Gesamtergebnis hat.

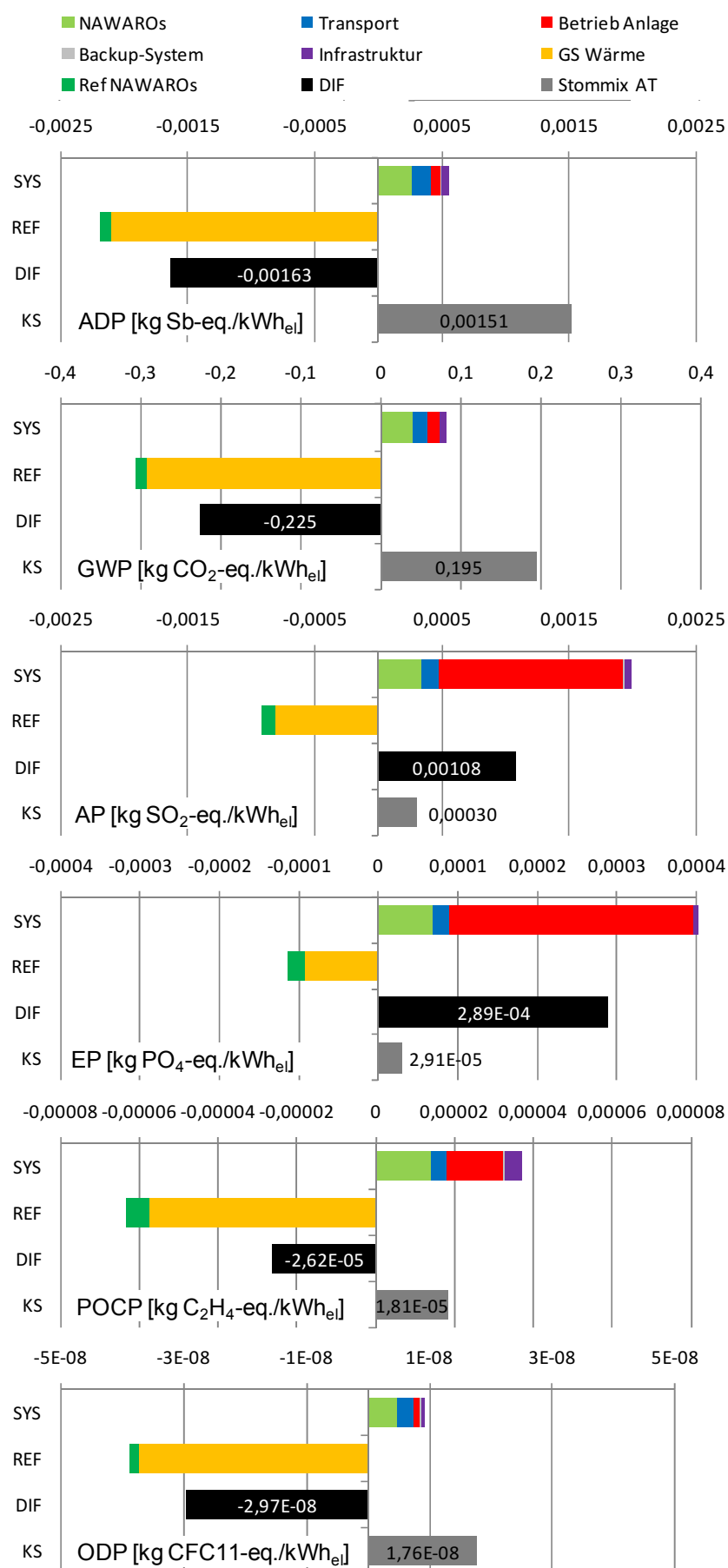


Abbildung 66: Gesamtergebnisse des Holz-Systems für die Wirkungskategorien GWP, ADP, AP, EP, POCP und ODP

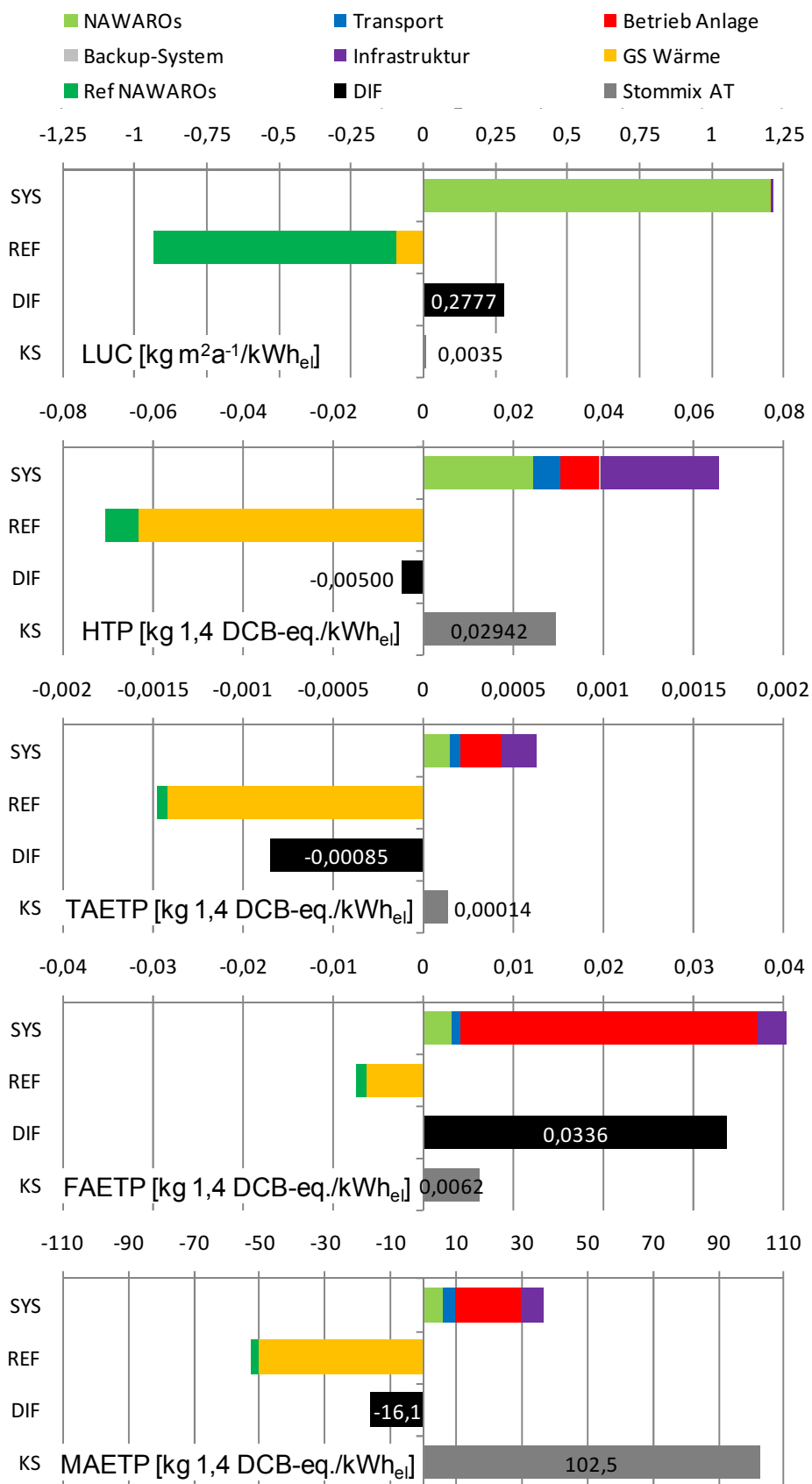


Abbildung 67: Gesamtergebnisse des Holz-Systems für die Wirkungskategorien LUC sowie die Toxizitätspotentiale

4.2.4. Sensitivitätsanalysen Holz-System

Die Sensitivitätsanalysen zeigen den Einfluss angenommener Parameter auf das Gesamtergebnis. Die untersuchten Parameter beeinflussen die Basisergebnisse teilweise sehr stark und sind daher bei der Betrachtung der Basisergebnisse sowie beim Vergleich mit anderen Technologien zu beachten.

4.2.4.1. Sensitivitätsanalyse: Produktivität bei der Produktion der NAWAROs

Der Beitrag der Produktion der nachwachsenden Rohstoffe zu den einzelnen Wirkungskategorien hat mit 13% bis 99% teilweise einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Daher wurde in einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss der in der Berechnung angenommenen Werte für die Produktivität [S_{rm}/PSH_{15}] der einzelnen Arbeitsschritte untersucht (siehe Abbildung 68). Eine 20%ige Erhöhung bzw. Reduktion der angenommenen Produktivitäten (siehe Tabelle 13) würde die Gesamtergebnisse (emissionsseitig) zwischen 2,6% und 8,2% reduzieren bzw. zwischen 1,9% und 12,1% erhöhen. Der größte Einfluss zeigt sich dabei auf die Wirkungskategorien ODP, ADP und GWP (auf welche sich der Verbrauch bzw. die Verbrennung fossiler Kraftstoffe besonders stark auswirkt). Die Wirkungskategorie LUC wird durch diese Variation der Inputparameter nicht beeinflusst.

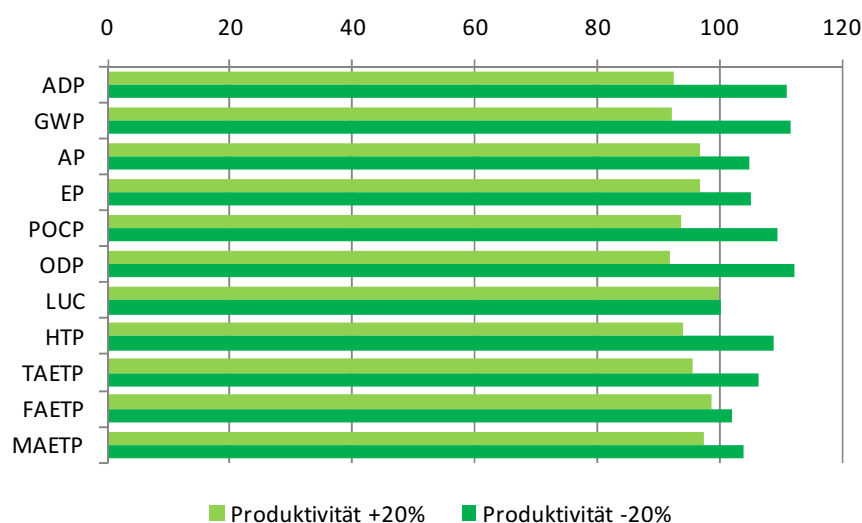


Abbildung 68: Sensitivitätsanalyse: Produktivität bei der Produktion der NAWAROs

Insgesamt würden die in dieser Sensitivitätsanalyse untersuchten Variationen für fast alle Wirkungskategorien keine Veränderung der Trends der Gesamtergebnisse bezüglich Emissionen oder Einsparung sowie bezüglich des Vergleichs mit der konventionellen Stromproduktion bewirken. Nur in der Wirkungskategorie HTP würde die sich die mit den Basisdaten erzielte Einsparung in eine minimale Emission verändern, welche jedoch weiterhin unter den Emissionen des konventionellen Systems liegen würde.

4.2.4.2. Sensitivitätsanalyse: Emissionen bei der Verbrennung

Die bei der Verbrennung entstehenden CO₂-, NO_x-, SO₂- sowie Staub-Emissionen haben Einfluss auf die Wirkungskategorien GWP, AP, EP, POCP sowie HTP. Daher wurde in der folgenden Sensitivitätsanalyse der Einfluss einer 20%igen Variation der Emissionswerte untersucht (siehe Abbildung 69). Diese wirkt sich am stärksten auf die Wirkungskategorien AP ($\pm 13\%$) und EP ($\pm 12\%$) aus. Das POCP würde sich um $\pm 5\%$ verändern, wohingegen der Einfluss auf das HTP ($\pm 1\%$) sowie auf das GWP ($\pm 0,3\%$) sehr geringfügig ist. Obwohl der Einfluss dieser Variation auf das Gesamtergebnis gerade in zwei der Wirkungskategorien in denen das Holz-System schlechter als die konventionelle Stromerzeugung in Österreich abschneidet, nicht zu vernachlässigen ist, würde er keine Veränderung der Trends der Gesamtergebnisse bezüglich Emissionen oder Einsparung sowie bezüglich des Vergleichs mit der konventionellen Stromproduktion bewirken.

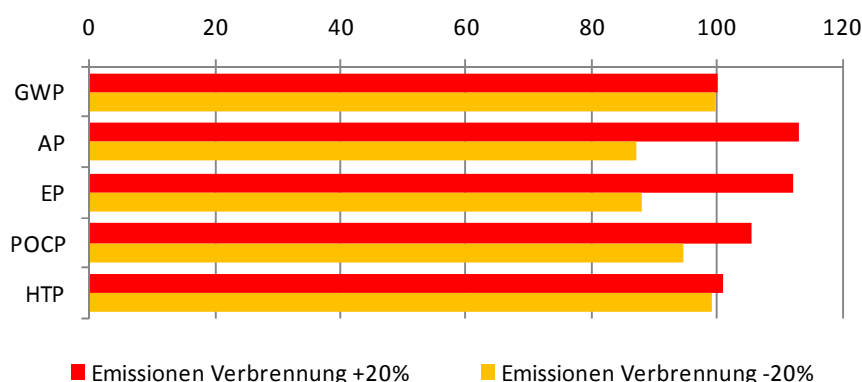


Abbildung 69: Sensitivitätsanalyse: Emissionen durch die Verbrennung

4.2.4.3. Sensitivitätsanalyse: Wassergehalt der transportierten Biomasse

Nachdem der Transport der nachwachsenden Rohstoffe zu den Anlagen für einige Wirkungskategorien bis zu 1/3 der Emissionen ausmacht wurde auch für diesen Lebenszyklusabschnitt eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (siehe Abbildung 70). Dabei wurde der Einfluss des Wassergehaltes der transportierten Biomasse auf die Gesamtergebnisse (emissionsseitig) untersucht. Wobei davon ausgegangen wird, dass die Biomasse dann vor Ort auf den erhobenen Wassergehalt abtrocknet und sich Verbrennungs-/Vergasungstechnisch keine Änderung in Bezug auf das Basis-Szenario ergibt. Ein Wassergehalt von 50% würde die Emissionen/ Aufwendungen zwischen 0,6% und 7,1% erhöhen; ein Wassergehalt von 25% würde sie zwischen 0,4% und 4,7% reduzieren. Der größte Einfluss zeigt sich wieder auf die Wirkungskategorien ODP, ADP und GWP. Keinen Einfluss hat diese Sensitivität auf den Flächenverbrauch.

Insgesamt würden die in dieser Sensitivitätsanalyse untersuchten Variationen für alle Wirkungskategorien keine Veränderung der Trends der Gesamtergebnisse bezüglich Emissionen oder Einsparung sowie bezüglich des Vergleichs mit der konventionellen Stromproduktion bewirken.

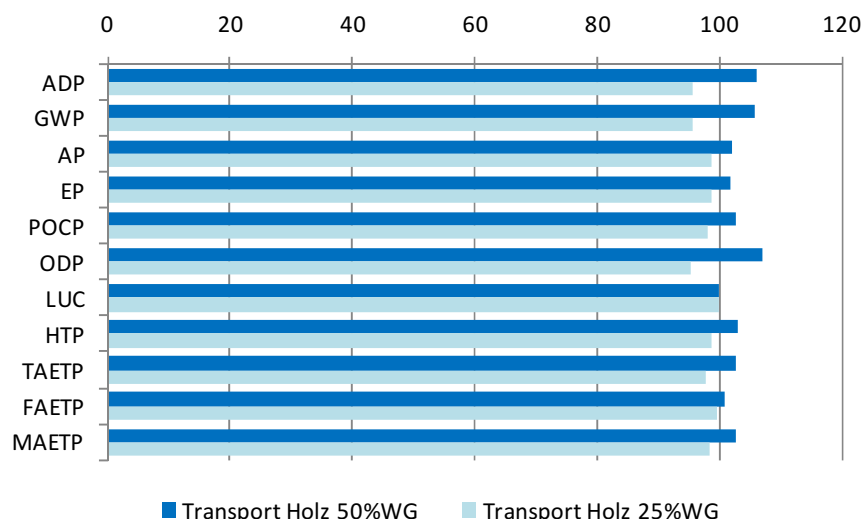


Abbildung 70: Sensitivitätsanalyse: Wassergehalt der transportierten Biomasse

4.2.4.4. Sensitivitätsanalyse: Einfluss indirekter N_2O Emissionen durch NO_x -Emissionen auf das Treibhauspotential des Holz-Systems

Wie bereits für das Biogas-System wurde auch für das Holz-System der Einfluss der indirekten Treibhauswirkung von NO_x -Emissionen untersucht, welchen in der „CML-2001“-Wirkungsabschätzungsmethode, kein Treibhauspotential zugewiesen wird. Das Ergebnis ist in Abbildung 71 dargestellt. Durch NO_x -Emissionen würde sich das GWP um 4,5% erhöhen, wobei 3,5% davon aus der Verbrennung der Biomasse selbst und 1% aus vorgelagerten Verbrennungsprozessen stammen.

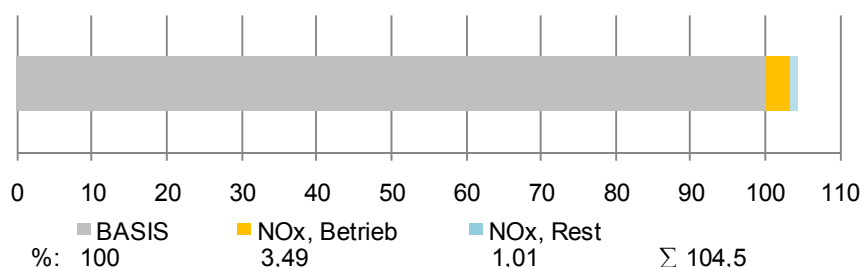


Abbildung 71: Sensitivitätsanalyse: GWP des Holz-Systems inklusive indirekter N_2O -Emissionen

4.2.4.5. Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Wärmebereitstellungstechnologie für die Gutschrift Wärmenutzung auf die Gesamtergebnisse der Referenznutzungen / Gutschriften

Wie bereits bei der Sensitivitätsanalyse des Biogas-Systems (Punkt 4.1.4.7) erläutert, wird in der Basis-Variante des modellierten Systems davon ausgegangen, dass die in den Biomasseanlagen produzierte und genutzte Wärme, den österreichischen Wärmemix 2005 (siehe 3.2.8) ersetzt (= Gutschrift Wärmenutzung). In dieser Sensitivitätsanalyse werden für die Gutschrift Wärmenutzung anstatt des österreichischen Wärmemixes 2005 verschiedene alternative Systeme zur Wärmebereitstellung angenommen. In Abbildung 72 ist die prozentuelle Veränderung der Basis-Gutschriften für die alternativen Wärmebereitstellungssysteme: Steinkohle, Heizöl, Erdgas, Brennholz und Strom für alle Wirkungs-

kategorien dargestellt. Es zeigt sich, dass für die unterschiedlichen Alternativ-Systeme keine generellen, für alle Wirkungskategorien geltenden Aussagen gemacht werden können. Tendenziell gibt es jedoch in mehr Wirkungskategorien Einsparungen durch die Verbrennungs-/Vergasungsanlagen und diese sind größer, wenn mit der produzierten Wärmemenge Steinkohle-, Heizöl- oder Strom- basierte Wärmebereitstellungssysteme ersetzt werden.

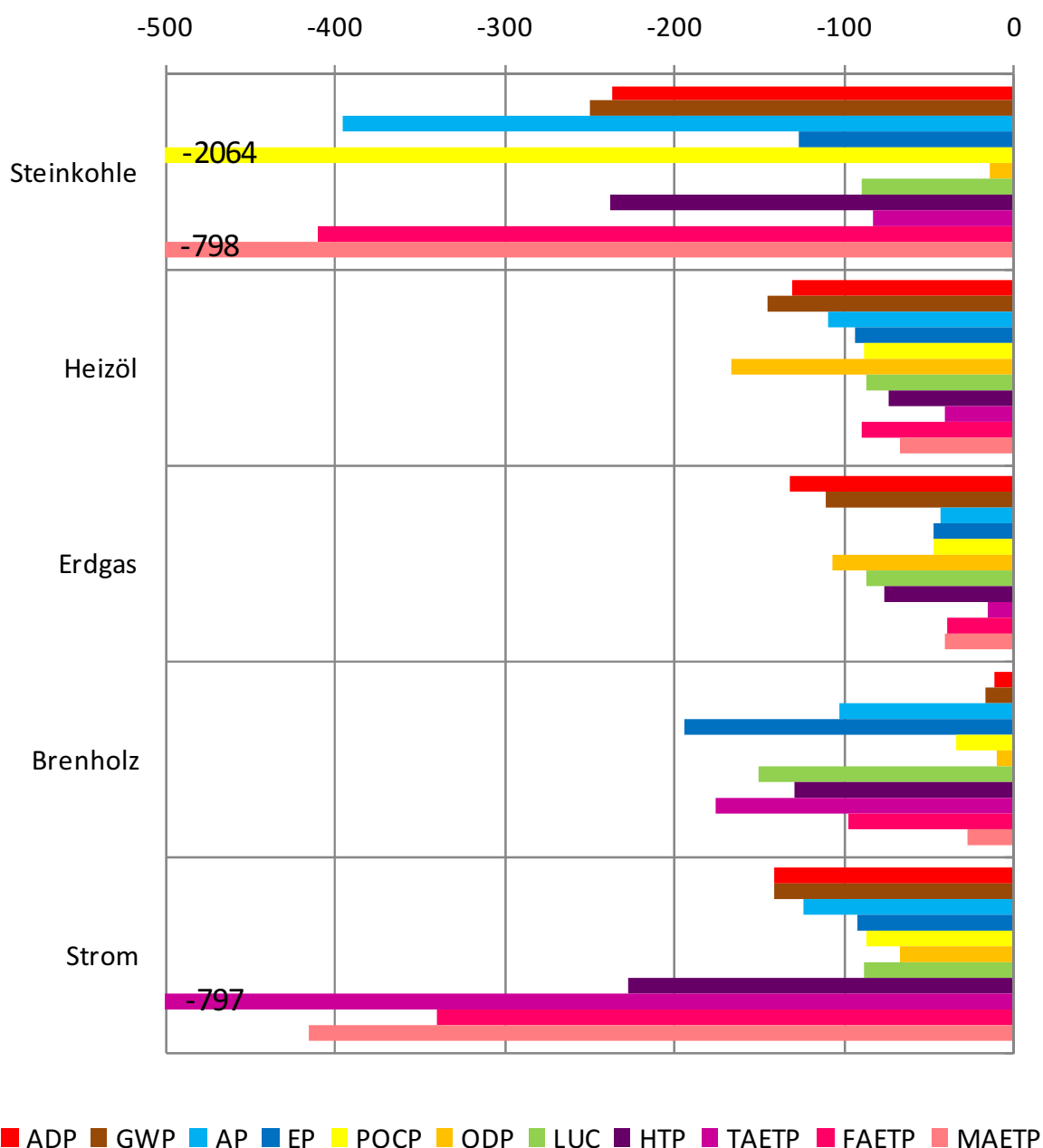


Abbildung 72: Sensitivitätsanalyse: Einfluss verschiedener Wärmebereitstellungssysteme auf das Gesamtergebnis der Referenznutzungen/Gutschriften für das Holz-System.

Das alternative Wärmebereitstellungssystem Steinkohle würde die Basisergebnisse der Gutschriften in den Wirkungskategorien ADP (+136%), GWP (+149%), AP (+295%), EP (+27%), POCP (+1964%), HTP (+137%), FAETP (+310%) und MAETP (+698%) erhöhen und in den Wirkungskategorien ODP (-85%), TAETP (-16%) und LUC (-10%) reduzieren.

Dadurch würde sich das Gesamtergebnis (4.2.3) folgendermaßen verändern: Die Gutschriften in den Wirkungskategorien ADP, GWP, POCP, HTP und MAEP würden sich vergrößern, die Gutschrift in der Wirkungskategorie TAETP würde geringer als im Basis-Szenario ausfallen. In der Wirkungskategorie AP würden sich die Emissionen aus dem Basis-Szenario in Gutschriften umwandeln, die Emissionen des EP und des FAETP würden sich reduzieren, jedoch weiterhin über jenen des konventionellen Systems liegen, jene des LUC würden sich geringfügig erhöhen. In der Wirkungskategorie ODP würden nun Emissionen auftreten, welche jedoch geringer als jene des konventionellen Systems wären.

Wählt man Heizöl als Wärmebereitstellungssystem für die Gutschrift Wärmenutzung, würden sich die Basisergebnisse der Gutschriften in den Kategorien ADP (+31%), GWP (+46%), AP (+10%) und ODP (+67%) erhöhen und für die Wirkungskategorien EP (-6%), POCP (-12%), LUC (-13%), HTP (-26%), TAETP (-59%), FAETP (-10%) und MAETP (-32%) ergäbe sich eine Reduktion im Vergleich zu den Basisergebnissen. Für die Gesamtergebnisse hätte dies folgende Auswirkungen: In den Wirkungskategorien GWP, ADP und ODP würde sich die Einsparung des Biogassystems vergrößern, bei den Toxizitätspotentialen und dem Flächenverbrauch würden sich die Emissionen erhöhen, womit sich für alle 4 Wirkungskategorien Emissionen ergeben würden, wobei das FAETP und LUC über den Emissionen der konventionellen Stromproduktion liegen würden. In den Wirkungskategorien AP, EP und POCP würde sich am Trend der Basisergebnisse nichts verändern.

Für das alternative Wärmebereitstellungssystem Erdgas ergibt sich vom Trend her ein ähnliches Bild wie für Heizöl, die Erhöhungen sind jedoch niedriger und die Reduktionen größer. Für die Gesamtergebnisse ergeben sich die gleichen Änderungen wie für das Szenario mit Heizöl, nur in der Wirkungskategorie POCP käme es im Erdgas – Szenario insgesamt zu Emissionen, welche jedoch unter den Emissionen des konventionellen Systems liegen würden und nicht zu Einsparungen wie im Basisszenario.

Wird Brennholz als alternatives Wärmebereitstellungssystem angenommen, würden sich die Ergebnisse der Gutschriften im Vergleich zum österreichischen Wärmemix 2005 in den Wirkungskategorien ADP (-88%), GWP (-83%), POCP (-66%), ODP (-89%), FAETP (-2%) und MAETP (-77%) reduzieren und die Ergebnisse in den Wirkungskategorien AP (+4%), EP(+94%), LUC (+50%), HTP (+30%) und TAETP (+76%) würden sich erhöhen. Auf die Gesamtergebnisse hätte diese Veränderung folgende Auswirkungen: In den Wirkungskategorien ADP, GWP, POCP, ODP und MAETP würden sich die Einsparungen des Basis-szenarios in Emissionen umkehren, diese lägen jedoch immer noch unter jenen der konventionellen Stromproduktion (bzw. das POCP gleich mit der konventionellen Stromproduktion). Für AP und EP würden sich die Emissionen leicht reduzieren, lägen jedoch immer noch über jenen der konventionellen Stromproduktion. Für HTP und TAETP würden sich die Einsparungen erhöhen, für LUC ergäben sich nun Einsparungen und die Emissionen in der Wirkungskategorie FAETP würden sich leicht erhöhen.

Als letztes Szenario wird die Veränderung der Basisergebnisse unter der Annahme des Ersatzes eines Wärmebereitstellungssystems mit Hilfe elektrischer Energie („Stromheizung“) untersucht. Dadurch würden sich die Basisergebnisse der Gutschriften in den Wirkungskategorien ADP (+42%), GWP (+42%), AP (+24%), HTP (+127%), TAETP (+697%), FAETP (+240%) und MAETP (+315%) erhöhen und in den Wirkungskategorien EP, (-7%), POCP (-12%), ODP (-32%) und LUC (-11%) würden sie sich reduzieren. Auf die Gesamtergebnisse hätte dies folgende Auswirkung: In den Wirkungskategorien ADP, GWP, HTP, TAETP und

MAETP würden sich die Einsparungen vergrößern. Die Emissionen des AP und des FAETP würden sich reduzieren, lägen jedoch immer noch über jenen des konventionellen Systems. Beim EP und LUC würden sich die Emissionen leicht erhöhen und in den Wirkungskategorien POCP und ODP würden sich die Einsparungen leicht reduzieren.

4.2.5. Verbesserungspotentiale Holz-System

4.2.5.1. Einfluss einer weitergehenden Abgasreinigung

Im Basis-Szenario treten nur in den Wirkungskategorien AP, EP, LUC und FAETP Emissionen auf. Für die ersten beiden Wirkungskategorien werden diese zu einem großen Teil von den NO_x -Emissionen durch die Verbrennung/Vergasung der Biomasse verursacht. Sowohl die NO_x - als auch die Staubemissionen können jedoch durch eine erweiterte Abgasreinigung reduziert werden (siehe Punkt 3.2.4). Wie groß dieses Verbesserungspotential ist, ist in Abbildung 73 dargestellt. Es zeigt sich, dass die, durch die erweiterte Abgasreinigung auftretenden Ammoniakemissionen, zwar eine Veränderung der Anteile der verschiedenen verursachenden Substanzen an den Gesamtemissionen bewirken (siehe Abbildung 73). Der Anteil des Ammoniaks an den Gesamtemissionen erhöht sich von ca. 1% auf 27% und der Anteil der NO_x -Emissionen aus dem Betrieb reduziert sich von 71% auf 29%. Trotzdem könnte für das Versauerungspotential eine Reduktion der Emissionen um 27% und für das Eutrophierungspotential um 24% erreicht werden. Die Reduktion der Staubemissionen würde zusätzlich eine Reduktion des HTP um ca. 3% bewirken.

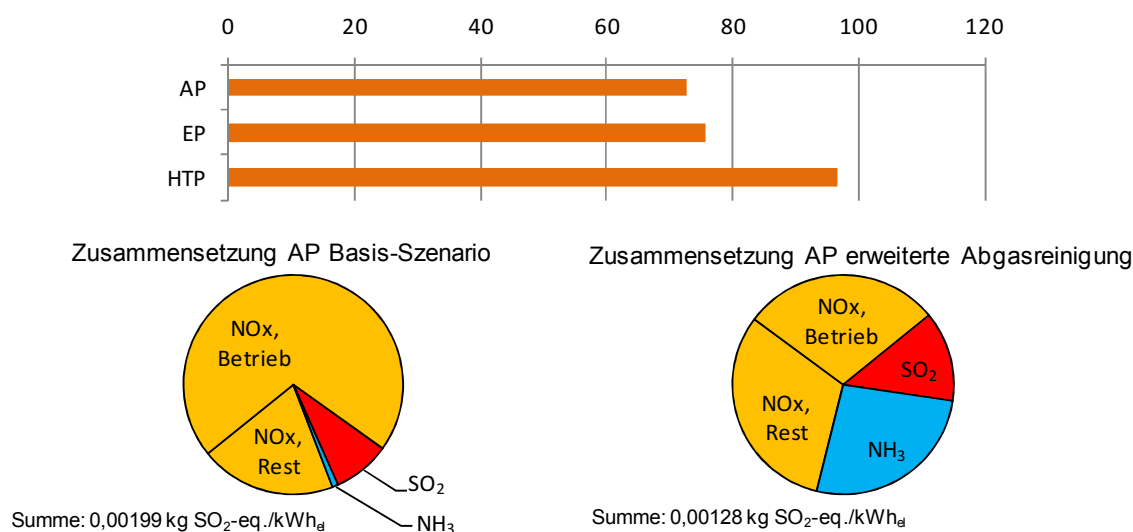


Abbildung 73: Verbesserungspotential: erweiterte Abgasreinigung

4.3. Vergleich der Ergebnisse mit Literaturdaten

In Bezug auf die Erstellung einer Lebenszyklusanalyse unterscheiden sich die Biomasse-Technologien wie bereits erwähnt in einigen Aspekten deutlich von den übrigen Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung. Während bei jenen Technologien, die fließende Energieressourcen umwandeln (Windkraft, Wasserkraft, Photovoltaik), die Lebenszyklusabschnitte „Herstellung der Baumaterialien“, „Bau der Anlage“ sowie teilweise „Abriss und Entsorgung der Infrastruktur“ den Hauptteil des Gesamtergebnisses ausmachen, wird dieser bei den Biomasse-Technologien durch die Bereitstellung des Brennstoffes bzw. den Betrieb der Anlage verursacht. Die Datengrundlage bezüglich Energieaufwand bzw. Emissionen für die Herstellung von verschiedensten Baumaterialien, die den Hauptteil einer LCA für beispielsweise Wind- oder Wasserkraft ausmachen, gilt als weitaus mehr abgesichert als die Datengrundlage bezüglich gasförmiger Emissionen aus der Land- und Forstwirtschaft, welche mitunter den Hauptteil einer LCA für Biomasse-Technologien ausmachen.

Weiters weisen Biomasse-Technologien meist eine größere Komplexität der Stoffströme auf: Zum einen fallen pro Agrar- oder Forstprodukt bzw. als Endprodukte des Umwandlungsprozesses oft mehrere Koppelprodukte an, deren Nutzen in einer adäquaten Form alloziert werden muss. Zum anderen haben viele Produkte ihrerseits schon eine stoffliche Verwendung hinter sich oder können anderweitig als Reststoffe gewertet werden, so dass für ihre Produktion keine oder nur geringe Aufwendungen bilanziert werden müssen und dem System zusätzlich vermiedene Emissionen durch die konventionelle Entsorgung/Verwertung gutgeschrieben werden können. Aufgrund der genannten Eigenschaften von Biomasse-Technologien ist eine große Anzahl unterschiedlicher Systemgrenzen, Allokationsverfahren sowie funktioneller Einheiten möglich.

Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit kann beispielsweise kWh bzw. MJ erzeugte elektrische Energie dienen (Edelmann et al. 2001, Jungbluth et al. 2003, Scholwin et al. 2006). Eine weitere Möglichkeit ist der Bezug der Umweltbelastungen auf die gesamte produzierte Energie (x kWh Strom + $1-x$ kWh Wärme) (Pucker et al. 2010), auf die TJ eingesetzten Brennstoff (Jungmeier et al. 1998) oder die MJ produzierten Biogases (Gärtner et al. 2008). Vor allem für das Biogas-System gibt es für landwirtschaftliche Biogasanlagen auch die Betrachtung auf Betriebsebene bezogen auf „ha und Jahr“ (Scholwin et al. 2006) oder "die jährliche Behandlung von Substrat in 1 m³ Faulraum einer landwirtschaftlichen Biogasanlage“ (Edelmann et al. 2001). In der vorliegenden Arbeit wurde auf Grund des angestrebten Vergleichs der Biomasse-Technologien untereinander sowie mit weiteren Stromerzeugungstechnologien als funktionelle Einheit die kWh erzeugter elektrischer Strom gewählt.

Systemgrenze

Weitgehend einheitlich erfolgt das Ziehen der Systemgrenze bezüglich den eingesetzten Substraten in der Literatur sowie in dieser Arbeit: für eigens für die energetische Verwertung angebaute Biomasse wird der gesamte Produktionsprozess bilanziert, für Reststoffe wird nur der Transport zur Anlage bilanziert. Unterschiedlich erfolgt jedoch der Umgang mit dem Einbezug eventueller Referenznutzungen der eingesetzten Substrate.

Referenznutzung Wirtschaftsdünger

Während im Biogas-System weitgehend Konsens darüber besteht, dass die unvergorene Wirtschaftsdüngerlagerung und –ausbringung (=Referenznutzung für das Substrat Wirtschaftsdünger) Emissionen verursacht, welche durch den Betrieb einer Biogasanlage vermieden werden, erfolgt der konkrete Umgang mit dieser Referenznutzung unterschiedlich. Edelmann et al. 2001 sowie Spielmann et al. 2007 beispielsweise bilanzieren für die Gärrestlagerung und -ausbringung nur die Mehremissionen, die im Vergleich zur unvergorenen Wirtschaftsdüngerlagerung bzw. -ausbringung entstehen. In den Arbeiten von Gärtner et al. 2008, Kaltschmitt und Streicher 2009 und Pucker et al. 2010 werden dem Biogas-System die gesamten Emissionen, die durch die Gärrestlagerung und –ausbringung verursacht werden angelastet, dafür wird für die Emissionen, die bei der unvergorenen Wirtschaftsdüngerlagerung und –ausbringung entstehen würden eine Gutschrift erteilt. Auch wenn beide Möglichkeiten wohl das gleiche Gesamtergebnis verursachen können, machen sie doch für die getrennte Darstellung der Emissionen des Systems einen großen Unterschied aus. In der vorliegenden Arbeit wurde auf Grund der größeren Transparenz der Darstellung die getrennte Bilanzierung/Darstellung für die gesamten Emissionen aus der Gärrestlagerung und –ausbringung sowie der Gutschrift für das Referenzsystem Wirtschaftsdünger gewählt.

Referenznutzung nachwachsende Rohstoffe

Für das Substrat nachwachsende Rohstoffe wird in vielen Fällen keine Referenznutzung der dafür benötigten Fläche bilanziert. In einigen Studien wird die Referenznutzung der für die Produktion der NAWAROs benötigten Fläche berücksichtigt (Scholwin et al. 2006) und dem Biomasse-System gutgeschrieben oder darüber hinaus auch die alternative Produktion der in dieser Referenznutzung erzeugten Produkte (z.B. Nahrungsmittel, Tierfutter) wiederum dem Biomasse-System angelastet (Pucker et al. 2010). In der vorliegenden Arbeit wurden die durch die Referenznutzung der für die NAWARO-Produktion benötigten Fläche verursachten Umweltbelastungen dem Biomasse-System gutgeschrieben.

Referenznutzung organische Reststoffe

Auch für das Substrat organische Reststoffe wird beispielsweise bei Edelmann et al. 2001 keine Referenznutzung definiert. In der Studie von Gärtner et al. 2008 wird als eine Option die Vergärung von Bioabfällen mit ihrer Referenznutzung der Kompostierung verglichen. Nur Pucker et al. 2010 bilanzieren die Referenznutzung von Reststoffe als Gutschrift. Auch in der vorliegenden Arbeit wurde als Referenznutzung organischer Reststoffe die Kompostierung definiert, deren Umweltbelastungen dem Biogas-System gutgeschrieben werden.

Koppelprodukt Wärme

Die Allokation des Koppelprodukts Wärme wird in der Literatur unterschiedlich gelöst: bei Edelmann et al. 2001 beispielsweise werden die Umweltbelastungen der Energiegewinnung entsprechend der genutzten Energiemengen auf Strom und Wärme verteilt. Diese Allokationsmethode ist insofern mit einem Mangel behaftet, als eine kWh Wärme aus nicht erneuerbaren Energieträgern weniger Umweltbelastung bringt, als eine kWh Strom: Zur Bereitstellung von Strom aus nicht erneuerbaren Ressourcen wird deutlich mehr Energie - mit entsprechend mehr Umweltbelastung - benötigt als für Wärme, daher wird bei dieser Allokationsmethode die Stromgewinnung bevorzugt (Edelmann et al. 2001).

Bei Jungbluth et al. 2003, Setterwall 2003 und Spielmann et al. 2007 erfolgt die Allokation auf Basis des Exergieinhaltes der erzeugten Strom- und Wärmemengen. Eine weitere Möglichkeit ist die Systemerweiterung: das Erteilen einer Gutschrift. Dabei werden die Umweltbelastungen, die bei der Produktion der gleichen Wärmemenge mit einer alternativen Wärmebereitstellungstechnologie auftreten würden, dem betrachteten System gutgeschrieben. Die Wahl der alternativen Bereitstellungstechnologie kann jedoch einen großen Einfluss auf die Gesamtergebnisse haben (siehe Punkt 4.1.4.7 bzw. 4.2.4.5).

In der Arbeit von Edelmann et al. 2001 wird auch die Gutschriften-Methode für die Allokation der produzierten Wärme angewandt, wobei ein Low-NO_x-Erdgasbrenner als alternative Bereitstellungstechnologie angenommen wird.

In der Studie von Gärtner et al. 2008 wird bezogen auf die funktionelle Einheit „MJ Biogas“ sowohl eine Gutschrift für den daraus erzeugten Strom als auch für die erzeugte Wärme jeweils nach der sogen. Marginalbetrachtung verrechnet. Diese basiert auf Studien, in denen untersucht wurde, in welchem Ausmaß verschiedene Erneuerbare Energien bei dem zurzeit vorhandenen Kraftwerkspark bzw. bei der üblichen Wärmeerzeugung konventionelle Energieträger ersetzen. Daraus ergibt sich für Deutschland beispielsweise für die Stromerzeugung aus Biogas eine Brennstoffsubstitution von 70 % Steinkohle und 30 % Erdgas sowie für die Wärmeerzeugung der ersetzte Wärmebereitstellungsmix mit 56,9 % Erdgas, 40,5 % Heizöl und 2,6 % Kohle. („Gutachten zur CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien“, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, 2005).

In der Studie von Kaltschmitt und Streicher 2009 wird das Koppelprodukt Wärme mit Wärme substituiert, die aus Heizöl extra leicht mit einem modernen Brenner bereitgestellt wird.

Bei der Allokationsmethode nach Energiemengen, werden die Umweltbelastungen proportional auf Strom und Wärme aufgeteilt wodurch sich beispielsweise abhängig von Optimierungsvarianten bzw. emissionsreduzierenden Maßnahmen im Biomasse-System für unterschiedliche Anlagen unterschiedliche Umweltbelastungen für 1 kWh Wärme ergeben. Bei der Gutschriften-Methode hingegen wird unabhängig von Optimierungspotentialen im System (beispielsweise der Art der Gärrestausrückführung) eine Gutschrift im Betrag der tatsächlich eingesparten Umweltbelastung erteilt. Daher wurde für die vorliegende Arbeit auch um Kontinuität bezüglich der bisherigen Betrachtungsweise der Referenznutzungen zu gewährleisten, die Gutschriften-Methode für die Allokation des Koppelproduktes Wärme gewählt.

Die bisher erläuterten Unterschiede bezüglich Systemgrenzen, Allokationsverfahren und funktionellen Einheiten machen einen Vergleich der Ergebnisse verschiedener Studien oft schwierig bis unmöglich. Weiters kann mit den in den Studien präsentierten Ergebnissen und Daten oft nicht auf die Sachbilanzergebnisse zurückgerechnet werden, um danach einen einheitlichen Vergleich der Ergebnisse verschiedener Studien zu ermöglichen. Auch die Bandbreite der betrachteten Wirkungskategorien umfasst in den meisten Studien nur den fossilen Energieaufwand und den Treibhauseffekt sowie eventuell Versauerung oder Luftschadstoffe und nicht die gesamte Bandbreite der in dieser Arbeit erfassten Wirkungskategorien. Trotzdem wurde versucht die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit jenen aus der Literatur zu vergleichen. Vor allem für das Biogas-System mussten die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit für einen Vergleich mit Literaturergebnissen an die Rahmenbedingungen der zu vergleichenden Studien angepasst/umgerechnet werden.

Biogas-System

In der Arbeit von Edelman et al. 2001 über die Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas wird zwar grundsätzlich die Wirkungsabschätzungs-Methode Ecoindicator 99 verwendet. Ergänzend ist jedoch auch das Treibhauspotential angegeben, welches je nach Substraten und Optimierungs-Varianten (umgerechnet) zwischen 0,291 und -0,490 kg CO₂-eq./kWh_{el} liegt. (Ergebnisse dieser Arbeit: 0,362 bis -0,389 kg CO₂-eq./kWh_{el})

In der Arbeit von Scholwin et al 2006 werden die Umweltwirkungen der Stromproduktion aus landwirtschaftlichem Biogas ausgehend von Vieh haltenden Betrieben mit einer definierten Fläche, die in unterschiedlichem Ausmaß den Viehbestand reduziert um auch nachwachsende Rohstoffe zur Ko-Vergärung einsetzen zu können, untersucht. Bewertet werden die Wirkungskategorien Treibhauspotential, Versauerung, Eutrophierung und Primärenergieaufwand. Die Auswertung erfolgt auf verschiedenen Ebenen (Betriebsebene: z.B. Emissionen in kg pro ha und Jahr; Stromerzeugungsebene: Emissionen in kg pro MWh Strom) jeweils im Vergleich zum Referenzbetrieb ohne Biogasanlage (zu vergleichen mit den Gutschriften für die Referenznutzungen der Substrate in der vorliegenden Arbeit). Es zeigt sich, dass bei einem Vergleich der reinen Emissionen, die Mittelwerte der vorliegenden Arbeit etwas höher (1,5 bis 3-fach), jedoch in der gleichen Größenordnung wie die Ergebnisse von Scholwin et al. (Maximalwerte) liegen (siehe Tabelle 34).

Tabelle 34: Vergleich der Ergebnisse des Biogas-Systems mit den Ergebnissen von Scholwin et al. 2006

Wirkungskategorie	Scholwin et al. 2006 Minimum	Scholwin et al. 2006 Maximum	Vorliegende Arbeit (Emissionen)
GWP [kg CO ₂ -eq./kWh _{el}]	0,20000	0,25000	0,36150
AP [kg SO ₂ -eq./kWh _{el}]	0,00100	0,00350	0,01009
EP [kg PO ₄ -eq./kWh _{el}]	0,00005	0,00055	0,00182

Auch im Ecoinvent Report Nr. 17 über Bioenergie (Jungbluth et al. 2007) beschäftigt sich ein Teil mit der Stromproduktion aus Biogas (Spielmann et al. 2007). Dabei werden für die Biogasproduktion unterschiedliche Substrate wie beispielsweise Wirtschaftsdünger, Gras, Bioabfälle, Fett- und Öl-Rückstände und auch Klärschlamm unterschieden. Für den Vergleich mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit kommt die Variante mit einer Kombination aus 23% Bioabfall, 22% Wirtschaftsdünger und 55% Fett- und Öl-Rückstände in Betracht. Weiters wird in den verschiedenen Varianten zwischen Zündstrahl- und Gasmotor sowie zwischen offenem und geschlossenem Endlager unterschieden. Da in der Studie von Spielmann et al. bei der Berechnung der Emissionen aus der Gärrestlagerung und -ausbringung nur die im Vergleich zur unvergorenen Ausbringung anfallenden Mehr-emissionen bilanziert werden, werden für den Vergleich mit der vorliegenden Arbeit die Ergebnisse der Gesamtemissionen abzüglich der Gutschrift für das Referenzsystem Wirtschaftsdünger verwendet. Tabelle 35 zeigt den Vergleich der Ergebnisse.

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse besonders in den Wirkungskategorien GWP, AP, EP, POCP und ODP in der gleichen Größenordnung liegen (wobei in der Studie von Spielmann et al. die Abdeckung des Endlagers einen besonders großen Einfluss auf diese Wirkungskategorien hat). Für die Wirkungskategorie ADP sowie die Toxizitätspotentiale liegen die Ergebnisse der Vergleichsstudie tendenziell niedriger als in der vorliegenden Arbeit: für die Ko-Vergärung mit Gasmotor und abgedecktem Endlager zwischen 20% und 60% der Ergebnisse (Mittelwert aller Anlagen) bzw. für die Ko-Vergärung mit Gasmotor und offenem

Endlager zwischen 35% und 80% der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit (Mittelwert aller Anlagen).

Tabelle 35: Vergleich der Ergebnisse des Biogas-Systems mit den Ergebnissen von Spielmann et al. 2007 (die Ergebnisse wurden auf die jeweilige Einheit pro kWh_{el} umgerechnet)

Wirkungs-kategorie	Ko-Vergärung, Gasmotor, EL offen	Ko-Vergärung, Gasmotor, EL abgedeckt	Ko-Vergärung, Zündstrahlmotor, EL abgedeckt	Vorliegende Arbeit (Emissionen abzüglich REF WD)
ADP	0,0003	0,0002	0,0007	0,0008
GWP	0,4271	0,1855	0,2833	0,1820
AP	0,0072	0,0028	0,0035	0,0047
EP	0,0013	0,0005	0,0006	0,0008
POCP	1,14E-04	3,37E-05	4,87E-05	0,0001
ODP	5,66E-09	2,43E-08	1,54E-08	0,0000
LUC	0,0061	0,0205	0,0182	0,7365
HTP	0,0440	0,0301	0,0332	0,1288
TAETP	0,0005	0,0004	0,0004	0,0007
FAETP	0,0151	0,0114	0,0107	0,0223
MAETP	34,6053	27,0235	29,8537	43,6125

In der Studie von Kaltschmitt und Streicher 2009 werden unterschiedliche landwirtschaftliche Biogasanlagen, die ausschließlich Maissilage und/oder Gülle als Substrate verwenden untersucht. In den in Tabelle 36 dargestellten Ergebnissen ist bereits eine Gutschrift für die im Vergleich zur konventionellen Güllelagerung vermiedenen Methanemissionen, sowie eine Gutschrift für die genutzte Wärme enthalten.

Tabelle 36: Vergleich der Ergebnisse des Biogas-Systems (adaptiert) mit den Ergebnissen von Kaltschmitt und Streicher 2009.

Wirkungskategorie	MG250	MG500	M500	M1000	Vorl. Arbeit (Em. – (REF WD + GS Wärme))
GWP [kg CO ₂ -eq./kWh _{el}]	0,095	0,093	0,197	0,194	0,062
AP [kg SO ₂ -eq./kWh _{el}]	0,0023	0,0022	0,0024	0,0023	0,0044

M ... Maissilage; G ... Gülle; 250 bis 1000 ... elektrische Leistung der Anlagen

Die Berücksichtigung der Gutschrift für die vermiedenen Methanemissionen bei der unvergorenen Güllelagerung bewirkt einen deutlichen Unterschied der Ergebnisse für das Treibhauspotential zwischen Anlagen die Gülle verwenden und reinen NAWARO-Anlagen. Das durchschnittliche Ergebnis der vorliegenden Arbeit liegt etwas unter jenem der Maissilage-Gülle-Anlagen von Kaltschmitt und Streicher. Für das Versauerungspotential liegen die Ergebnisse der verschiedenen Anlagentypen bei Kaltschmitt und Streicher sehr eng beisammen und niedriger als die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit. Dies kann einerseits durch unterschiedliche Annahmen zu den Ammoniak-Emissionen bei der Gärrestausbringung (die zwar in der Arbeit von Kaltschmitt und Streicher nicht genau ausgewiesen werden, unterschiedliche Annahmen dazu sind auf Grund der großen Unsicherheiten bei deren Bestimmung jedoch sehr wahrscheinlich) und andererseits durch die unterschiedliche Wahl der Wärmebereitstellungstechnologie für die Gutschrift Wärmenutzung (Heizöl vs. Wärmemix Österreich) erklärt werden.

In der Studie von Pucker et al. 2010 werden zwar grundsätzlich sehr ähnliche Lebenszyklusabschnitte, wie in der vorliegenden Arbeit, definiert, die Zuordnung zu Emissionen und Gutschriften bzw. die Wahl der funktionellen Einheit und der Vergleich mit anderen Energie-

systemen erfolgt jedoch unterschiedlich: während in der vorliegenden Arbeit alle Ergebnisse auf 1 kWh elektrischen Strom bezogen werden, dient in der Studie von Pucker et al. 1 kWh gesamte produzierte Energie (zusammengesetzt aus x kWh Strom + (1-x) kWh Wärme) als funktionelle Einheit. Die Referenznutzungen der Substrate werden dem Biogas-System angerechnet, wobei keine getrennte Darstellung der Emissionen des Biogas-Systems und der Referenz-Systeme erfolgt. Die so erhaltenen Ergebnisse werden mit der gleichen Menge an Strom und Wärme, produziert durch Vergleichs-Technologien, verglichen. Bei dem Versuch die in der Studie von Pucker et al. 2010 ermittelten Ergebnisse mit jenen aus der vorliegenden Arbeit (Emissionen abzüglich Referenznutzungen) in den Wirkungskategorien GWP und AP zu Vergleichen, stellte sich heraus, dass diese deutlich unter jenen von Pucker et al. 2010 liegen (siehe Tabelle 40).

Tabelle 37: Vergleich der Ergebnisse des Biogas-Systems mit den Ergebnissen von Pucker et al. 2010 (die Ergebnisse wurden auf die jeweilige Einheit pro kWh_{el} umgerechnet)

Wirkungskategorie	BGA 1	BGA 2	BGA 3	BGA 4	BGA 6	Vorl. Arbeit (Em. - REF)
GWP [kg CO ₂ -eq./kWh _{el}]	-0,0115	0,1508	0,1831	0,2676	0,1022	-0,2117
AP [kg SO ₂ -eq./kWh _{el}]	0,0020	0,0054	0,0034	0,0062	0,0071	-0,0007

Während sich in der vorliegenden Arbeit in den Wirkungskategorien Treibhauspotential und Versauerung nach Abzug der Gutschriften für die Referenznutzungen bereits Einsparungen ergeben, kommt dies in der Studie von Pucker et al. 2010 nur bei einer Anlage beim Treibhauspotential vor, wohingegen alle anderen Anlagen Emissionen aufweisen. Eine mögliche Ursache für die stark unterschiedlichen Ergebnisse könnte in der Annahme der Emissionsfaktoren für die Referenznutzung Kompostierung bzw. generell im Anteil der organischen Reststoffe am Substratmix liegen. Während sich in der vorliegenden Arbeit für den Mittelwert der untersuchten Anlagen ein Anteil der organischen Reststoffe am Substratmix von 20% ergibt, liegt der Anteil der Reststoffe am Substratmix bei den Anlagen von Pucker et al. bei 100%, 44%, 9%, 0%, 0% und 30% respektive. Für die Anlage, die zu 100% Reststoffe verwendet, treten auch in dieser Studie die geringsten Emissionen bezogen auf die kWh elektrische Energie auf.

Es zeigt sich also, dass die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit für das Biogas-System soweit ein Vergleich möglich ist, in der gleichen Größenordnung wie in der Literatur liegen.

Holz-System

Eine der ersten Lebenszyklusanalysen zum Thema Biomasse-BHKW stammt von Jungmeier et al. aus dem Jahr 1998. Sie beschäftigt sich mit den Umweltauswirkungen eines 1,3 MW_{el} Biomasse BHKWs, welches zu 35% mit Industrierestholz und zu 65% mit Waldhackgut betrieben wird und ca. 14% Strom und 86% Wärme (bezogen auf den jährlichen Energieinhalt) produziert. Einen Vergleich der Ergebnisse bezogen auf die jährliche Stromproduktion mit den Ergebnissen des Holz-Systems (nur Emissionen) zeigt Tabelle 38. Die in der Studie von Jungmeier et al. 1998 angegebenen Ergebnisse für die Einzelsubstanzen SO₂, NO_x, CO, CO₂, CH₄ und N₂O wurden in die entsprechenden Wirkungspotentiale umgerechnet und auf die jährliche Stromproduktion bezogen.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse in den Wirkungskategorien AP, EP und POCP. Die Ergebnisse für das GWP liegen zwar in der gleichen Größenordnung, weichen jedoch stärker voneinander ab. Dieser Unterschied könnte durch die unterschiedlichen Annahmen zu den Umweltwirkungen der Infrastruktur der Anlage erklärt werden. In

der Studie von Jungmeier et al. 1998 werden 70% der CO₂-eq.-Emissionen durch die Errichtung der Anlage (vor allem durch die Produktion von Stahl und Beton) verursacht, während der Anteil der Infrastruktur des Holz-Systems der vorliegenden Arbeit für das GWP im Mittelwert nur bei 9% liegt. Die Ergebnisse für das Treibhauspotential ohne Berücksichtigung der Infrastruktur sind in Tabelle 38 in Klammern dargestellt).

Tabelle 38: Vergleich der Ergebnisse des Holz-Systems mit den Ergebnissen von Jungmeier et al. 1998, Settlerwall et al. 2003 und Jungbluth et al. 2002 (die Ergebnisse wurden auf die jeweilige Einheit der Wirkungskategorie pro kWh_{el} umgerechnet)

Wirkungskategorie	Biomasse BHKW Jungmeier et al. 1998	Biomasse BHKW Settlerwall et al. 2003	Holz-BHKW Jungbluth et al. 2002	Holz-System Vorliegende Arbeit
GWP	0,1391 (0,0417)	0,0306	0,036 bis 0,058	0,0806 (0,07335)
AP	0,0033	0,0001		0,0020
EP	0,0005			0,0004
POCP	3,65E-05			3,72E-05

In dem EU-Projekt ECLIPSE (Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for present and future Power Systems in Europe) wurden Sachbilanzdaten für neue, dezentralisierte Energiesysteme (Photovoltaik, Wind, Biomasse, kleine BHKWs und Brennstoffzellen) erarbeitet. Für Biomasse befeuerte BHKWs (Settlerwall et al. 2003) ergeben sich (nach Umrechnung der Einzelsubstanzen SO₂, NO_x, CO₂ und CH₄ in die entsprechenden Wirkungspotentiale bezogen auf die jährliche Stromproduktion) die in Tabelle 38 dargestellten Ergebnisse, welche deutlich unter jenen des Holz-Systems in der vorliegenden Arbeit liegen. Eine mögliche Erklärung dafür könnte die Tatsache sein, dass das betrachtete Biomasse-BHKW eine deutlich höhere elektrische Nennleistung als die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Systeme aufweist (9 MW_{el} im Vergleich zu durchschnittlich 5 MW_{el}) und bereits bei den Ergebnissen des Biogas-Systems darauf hingewiesen wurde, dass größere Anlagen in einigen Wirkungskategorien geringere Emissionen pro kWh_{el} aufweisen als kleine Anlagen.

In der Arbeit von Jungbluth et al. 2002 über die Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz wird zwar grundsätzlich die Wirkungsabschätzungs-Methode Ecoindicator 99 verwendet. Ergänzend ist jedoch auch das Treibhauspotential angegeben, welches zwischen 0,036 und 0,058 kg CO₂-eq./kWh_{el} liegt und damit nur knapp unter dem in der vorliegenden Arbeit für den Mittelwert der Holz-Systeme errechneten Wert.

Der Vergleich mit den Ergebnissen aus der Arbeit von Kaltschmitt und Streicher 2009 ist schwierig, da die dort untersuchten Anlagen entweder bedeutend größer sind (el. Leistung von ca. 20 MW) oder auf die Wärmeproduktion ausgelegt sind und Strom das Koppelprodukt der Wärmeproduktion ist (thermische Leistung 5 MW, elektrische Leistung 0,7 MW). Weiters wird nicht ausschließlich Waldhackgut, sondern auch Industriebhackgut sowie Sägerestholz und Rinde eingesetzt. Die Ergebnisse beinhalten bereits eine Gutschrift für die genutzte Wärme. Trotzdem sind die Ergebnisse im Vergleich mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit (Emissionen – Gutschrift Wärme) in Tabelle 39 dargestellt.

Tabelle 39: Vergleich der Ergebnisse des Holz-Systems (adaptiert) mit den Ergebnissen von Kaltschmitt und Streicher 2009

Wirkungskategorie	HKW 100 SR/WHG	HKW 50 IHG/R	HKW 50 IHG/R	Holz-System Vorl. Arbeit (Emissionen –GS Wärme)
GWP	-1,66	-0,33	-0,81	-0,21
AP	-0,0019	0,0004	-0,0008	0,0012

HKW ... Heizkraftwerk; 100 ... 100% Wärmenutzung; 50 ... 50% Wärmenutzung;
 SR ... Sägerestholz; WHG ... Waldhackgut; IHG ... Industriebhackgut; R ... Rinde

Wenn man beachtet, dass bei den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Anlagen, durchschnittlich nur ca. 40% der produzierten Wärme auch genutzt werden, und somit die Gutschrift für die Wärmenutzung geringer als bei den von Kaltschmitt und Streicher 2009 untersuchten Anlagen ist, liegen die Ergebnisse in einer vergleichbaren Größenordnung. Die Ergebnisse für die Versauerung liegen in der vorliegenden Arbeit über jenen aus der Studie von Kaltschmitt und Streicher, was jedoch durch die Wahl der Wärmebereitstellungstechnologie für die Gutschrift Wärmenutzung erklärt werden kann. Während bei Kaltschmitt und Streicher die Wärmebereitstellung aus Heizöl angenommen wird, wird in der vorliegenden Studie der österreichische Wärmemix angenommen, welcher ein geringeres Versauerungspotential als Heizöl aufweist.

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit für das Holz-System soweit ein Vergleich möglich ist, weitgehend in der gleichen Größenordnung wie in der Literatur bzw. tendenziell etwas höher als die Literaturwerte liegen.

4.4. Vergleich: Biogas- und Holz-System

In Tabelle 40 sind die, in dieser Arbeit ermittelten Gesamtemissionen sowie – Ergebnisse (inkl. Gutschriften) der beiden Systeme für alle Wirkungskategorien dargestellt.

Insgesamt ergeben sich für das Biogas-System unter Berücksichtigung der Gutschriften in der Basisvariante Einsparungen in den Wirkungskategorien ADP, GWP, AP, EP, ODP, LUC, und TAETP. In den Wirkungskategorien POCP, HTP, FAETP und MAETP kommt es auch nach Abzug der Gutschriften zu Emissionen, welche außer für das MAETP auch über jenen der konventionellen österreichischen Stromproduktion liegen.

Für das Holz-System ergeben sich unter Berücksichtigung der Gutschriften in der Basisvariante insgesamt Einsparungen in den Wirkungskategorien ADP, GWP, POCP, ODP, HTP, TAETP und MAETP. In den Wirkungskategorien AP, EP, LUC und FAETP kommt es auch nach Abzug der Gutschriften zu Emissionen, welche in allen Fällen über jenen der konventionellen österreichischen Stromproduktion liegen.

In den Wirkungskategorien ADP, POCP, ODP, HTP, TAETP sowie MAETP sind die Einsparungen des Holz-Systems größer als jene des Biogas-Systems. In den Wirkungskategorien GWP, AP, EP und LUC sind die Einsparungen des Biogassystems größer. In der Wirkungskategorie FAETP treten für beide Systeme Emissionen auf, welche für das Biogas-System geringer als für das Holz-System ausfallen.

Tabelle 40: Vergleich der Gesamt-Emissionen sowie -ergebnisse (inkl. Gutschriften) des Biogas- und des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien (Mittelwert aller Anlagen); + ... höhere Emissionen als das andere System; - ... geringere Emissionen; GS ... Gutschriften)

Wirkungskategorie	Einheit		Biogas-System		Holz-System	
ADP	kg Sb-eq./kWh _{el}	Emissionen	0,0009	+	0,0006	-
	kg Sb-eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	-0,0005	+	-0,0016	-
GWP	kg CO ₂ -eq./kWh _{el}	Emissionen	0,3615	+	0,0806	-
	kg CO ₂ -eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	-0,3891	-	-0,2255	+
AP	kg SO ₂ -eq./kWh _{el}	Emissionen	0,0101	+	0,0020	-
	kg SO ₂ -eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	-0,0013	-	0,0011	+
EP	kg PO ₄ -eq./kWh _{el}	Emissionen	0,0018	+	0,0004	-
	kg PO ₄ -eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	-0,0003	-	0,0003	+
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq./kWh _{el}	Emissionen	1,36E-04	+	3,72E-05	-
	kg C ₂ H ₄ -eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	7,13E-05	+	-2,62E-05	-
ODP	kg CFC-11-eq./kWh _{el}	Emissionen	1,46E-08	+	9,22E-09	-
	kg CFC-11-eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	-8,66E-09	+	-2,97E-08	-
LUC	kg m ² a ⁻¹ /kWh _{el}	Emissionen	1,5802	+	1,2111	-
	kg m ² a ⁻¹ /kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	-0,0280	-	0,2777	+
HTP	kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}	Emissionen	0,1359	+	0,0654	-
	kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	0,0570	+	-0,0050	-
TAETP	kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}	Emissionen	7,45E-04	+	6,30E-04	-
	kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	-4,36E-04	+	-8,48E-04	-
FAETP	kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}	Emissionen	0,0231	-	0,0410	+
	kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	0,0147	-	0,0336	+
MAETP	kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}	Emissionen	45,9347	+	36,4997	-
	kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}	Gesamt (inkl. GS)	5,4109	+	-16,1322	-

Lebenszyklusabschnitt Produktion nachwachsender Rohstoffe

Beim Vergleich der Beiträge der unterschiedlichen Lebenszyklusabschnitte zu den einzelnen Wirkungskategorien fällt auf, dass der Lebenszyklusabschnitt Produktion der NAWAROs im Holzsystem einen fast doppelt so großen Einfluss auf die Gesamtergebnisse hat wie im Biogas-System. Dieser Umstand kann durch die Tatsache erklärt werden, dass im Holz-System 100% der Substrate eigens für die thermische Verwertung „produziert“ werden, wohingegen im Biogas-System ein erheblicher Anteil der Substrate aus Abfallstoffen anderer Produktionssysteme besteht, für welche die Produktion nicht dem Biogas-System angerechnet wird. Der Anteil der Produktion der NAWAROs ist im Holz-System am größten für die Wirkungskategorien ADP, GWP, ODP und LUC. Im Biogas-System für die Wirkungskategorien ADP, ODP, LUC und TAETP. Der hohe Anteil am TAETP für das Biogas-System lässt sich durch die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln bei der Produktion, der für die Vergärung geeigneten nachwachsenden Rohstoffe erklären, welche ein hohes Wirkungspotential in dieser Wirkungskategorie aufweisen. Diese Beobachtung wird auch durch Literaturdaten bestätigt: Während in Studien über die Stromerzeugung aus Biogas der Anteil der Produktion der Substrate für das Treibhauspotential beispielsweise bei 10% (Skarka 2007) bzw. ca. 30% (Gärtner et al. 2008 für eine 100% mit Maissilage betriebene Anlage) liegt, wird für Holz-Systeme ein Anteil von 40% (Jungbluth et al. 2002), ca. 53% (Mörschner und Eltrop 2003) bis 62% (Mann und Spath 1997) angegeben.

Lebenszyklusabschnitt Transport

Der Anteil des Transportes an den Gesamtemissionen liegt für beide Systeme in der gleichen Größenordnung und ist am höchsten in den Wirkungskategorien ADP (Biogas-System 21%, Holz-System 25%), GWP (Biogas-System 7%, Holz-System 24%) und ODP (Biogas-System 23%, Holz-System 29%). Auch in der Literatur finden sich für das Biogas-System Anteile des Transportes am gesamten Treibhauspotential von ca. 10% (Skarka 2007) sowie von 12% (Mann und Spath 1997) für das Holz-System.

Lebenszyklusabschnitt Infrastruktur

Der Anteil der Infrastruktur an den Gesamtergebnissen in den einzelnen Wirkungskategorien ist im Biogas-System vor allem für die Toxizitätspotentiale sehr hoch (48-73%). Edlmann et al. 2001 stellen ebenfalls fest, dass der Lebenszyklusabschnitt Infrastruktur hauptsächlich gesundheitsschädliche Umweltwirkungen verursacht. Der Anteil ist für das Biogas-System tendenziell höher als im Holz-System. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass es sich bei den Biogasanlagen im Allgemeinen um kleinere Anlagen handelt, bei denen der Anteil der Infrastruktur pro kWh produziertem Strom mehr ins Gewicht fällt. In der Literatur finden sich unterschiedliche Werte zum Anteil der Infrastruktur an den Gesamtemissionen. In der Arbeit von Skarka 2007 wird für das Biogas-System ein Anteil am Treibhauseffekt von ca. 15% (zum Vergleich: Ergebnis des Biogas-Systems in der vorliegenden Arbeit: GWP: 11%) angegeben. Für das Holz-System geben Mörschner und Eltrop 2003 einen Anteil am Kumulierten Energieaufwand von ca. 11% an (diese Arbeit: ADP: 12%).

Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Anlage

Fasst man die Lebenszyklusabschnitte Betrieb der Biogasanlage, BHKW, Gärrestlagerung und Gärrestausrückführung zu einem Abschnitt zusammen und vergleicht diesen mit dem Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Anlage des Holz-Systems so zeigen sich doch deutliche Unterschiede zwischen den beiden Systemen: im Biogas-System ist dieser Abschnitt hauptverantwortlich für die Emissionen in den Wirkungskategorien AP und EP (>90%) sowie auch

GWP, POCP und LUC (>75%). Ähnliche Ergebnisse für den Anteil des Betriebs der Biogas-Anlagen finden sich auch bei Skarka 2007. In den Wirkungskategorien ADP und ODP liegt der Beitrag bei ca. einem Drittel und für die Toxizitätspotentiale um die 10%. Im Holz-System dagegen ist dieser Lebenszyklusabschnitt sehr wichtig für die Toxizitätspotentiale (vor allem FAETP und MAETP) und der Beitrag in den Wirkungskategorien ADP, GWP und POCP liegt um oder unter 30%. Nur in den Wirkungskategorien AP und EP ist auch für das Holz-System der Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Anlage bestimmend wenn auch mit einem geringeren Anteil als im Biogas-System (ca. 75%). Auch in der Arbeit von Jungbluth et al. 2002 liegt der Anteil der Emissionen des Betriebes der Holz-System-Anlagen an den gesamten Umweltwirkungen (Ecoindicator 99) zwischen 60 und 80%.

Verursachende Substanzen der Wirkungspotentiale

Beim Vergleich der Umweltwirkungen des Biogas- und des Holz-Systems fällt weiters auf, dass für einige Wirkungskategorien unterschiedliche Substanzen für die verschiedenen Wirkungspotentiale verantwortlich sind. Setzt sich beim Biogas-System das Treibhauspotential ca. zu je einem Drittel aus Methan-, Lachgas- und CO₂-Emissionen fossilen Ursprungs zusammen, wird es im Holz-System zu 91% aus CO₂-Emissionen fossilen Ursprungs verursacht und Lachgas- bzw. Methan-Emissionen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Auch das Versauerungspotential setzt sich bei den beiden Technologien unterschiedlich zusammen: während im Biogas-System 77% durch Ammoniakemissionen durch die Lagerung und Ausbringung des Gärrestes, ca. 13% durch NO_x-Emissionen aus dem BHKW, ca. 2% durch SO₂-Emissionen aus dem BHKW und ca. 10% durch vorgelagerte Ketten verursacht werden, sind im Holz-System die NO_x-Emissionen aus der Verbrennung für 70% der versauernden Wirkung verantwortlich, 8% werden durch SO₂-Emissionen aus der Verbrennung und ca. 22% durch vorgelagerte Ketten verursacht.

Einfluss der Gutschriften auf das Gesamtergebnis

Bei beiden Systemen haben die erteilten Gutschriften einen sehr großen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Im Holz-System ist hauptsächlich das Ausmaß der Wärmenutzung für die Größe der Gutschrift verantwortlich, das Referenzsystem für die Nutzung der NAWAROs spielt außer für die Wirkungskategorie Landnutzung eine untergeordnete Rolle (Anteil an den Gesamtgutschriften zwischen 4 und 20%).

Beim Biogas-System hat sowohl die Substratzusammensetzung, wie auch die Wärmenutzung einen großen Einfluss auf die Gesamtgutschriften. Wobei der Anteil für die Referenznutzung der Wirtschaftsdünger mit ca. 50% am größten in den Wirkungskategorien LUC, AP und EP und etwas geringer für das POCP (32%) und das GWP (24%) ist. Die Referenznutzung organischer Reststoffe hat ihren höchsten Anteil in den Wirkungskategorien GWP, AP und EP (ca. 45%), wobei ihr Anteil auch in den übrigen Wirkungskategorien zwischen 10 und 20% liegt. Die durchschnittliche Gutschrift für die Referenznutzung organischer Reststoffe liegt beim GWP beispielsweise genauso hoch wie die gesamten Emissionen des Biogas-Systems. Die Gutschrift Wärmenutzung liefert den größten Beitrag zu den Gesamtgutschriften in den Wirkungskategorien ADP und ODP (ca. 65%), der Anteil an MAETP und TAETP liegt bei ca. 50% und auch in den Wirkungskategorien POCP, FAETP und HTP liegt er bei ca. einem Drittel. Die Referenznutzung NAWAROs sowie die Gutschrift Dünger haben einen weniger großen Einfluss auf die Gesamtgutschriften.

4.5. Belastbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen der Erstellung der Lebenszyklusanalyse mussten verschiedene Annahmen getroffen bzw. Eingangsparameter berechnet werden, welche das Gesamtergebnis mehr oder weniger stark beeinflussen können. Detaillierte Ausführungen dazu finden sich unter den Punkten Sensitivitätsanalysen (4.1.4 und 4.2.4).

Mit Unsicherheiten behaftete Eingangsgrößen sind beispielsweise die Emissionen aus der Verbrennung des Biogases im BHKW. Die Auswirkungen der Emissionsfaktoren „hoch“ bzw. „niedrig“ auf das Gesamtergebnis in den Wirkungskategorien GWP, AP, EP sowie POCP ist in Abbildung 74 dargestellt. Diese sind in den Wirkungskategorien AP, EP und POCP zwar beträchtlich, würden die Grundtrends der Basis-Ergebnisse jedoch nicht ändern.

Besondere Bedeutung kommt in dieser Hinsicht im Biogas-System den Emissionsfaktoren für die Berechnung der Methan-, Lachgas-, und Ammoniakemissionen aus der Gärrest- bzw. Wirtschaftsdünger-Lagerung und -Ausbringung zu. Die Standardabweichung der aus der Literatur ermittelten Emissionsfaktoren liegt teilweise bei bis zu 90% was zu einer Bandbreite von möglichen Gesamt-Ergebnissen führt, welche in Abbildung 74 dargestellt ist. Die große Unsicherheit bei der Bestimmung dieser Emissionsfaktoren liegt vor allem daran, dass wie bereits erwähnt, nur wenige Studien zu den Emissionsfaktoren der Lagerung und Ausbringung von vergorener und unvergorener Gülle, Festmist und Kompost sowie zum Kompostierungsvorgang selbst vorliegen und die einzelnen Messwerte aufgrund der unzähligen Einflussgrößen stark schwanken. Wie bereits in der Sensitivitätsanalyse erläutert, kann dies einzeln betrachtet vor allem in den Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung zu veränderten Gesamt-Ergebnissen führen: die Variation der Emissionsfaktoren für die Berechnung der Emissionen der Ausbringung des Gärrestes sowie des Wirtschaftsdüngers können in diesen beiden Wirkungskategorien dazu führen, dass anstatt Einsparungen, Emissionen auftreten, welche zudem über jenen des österreichischen Produktionsmixes liegen. Wie bei den Sensitivitätsanalysen bereits angedeutet, wurden die Emissionsfaktoren für das Gärrest- und das Wirtschaftsdüngermanagement jedoch aus den gleichen Literaturstellen hergeleitet und allenfalls Mehremissionen des Gärrestes aufgrund der veränderten Eigenschaften (erhöhter pH-Wert und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt im Vergleich zu unvergorenem Wirtschaftsdünger) berücksichtigt. Daher erscheint es nur logisch die Emissionsfaktoren für beide Lebenszyklusabschnitte (Gärrestlagerung und –ausbringung sowie Referenznutzung Wirtschaftsdünger) nicht getrennt voneinander zu variieren. Dadurch ergibt sich zwar weiterhin eine beachtliche Schwankungsbreite (vor allem in den Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung), die Grundaussage der Basis-Gesamtergebnisse wird dadurch jedoch nicht verändert.

Für die Kompostierung organischer Reststoffe ergibt sich die größte Schwankungsbreite für das Treibhauspotential. Für das Gesamt-Ergebnis würden sich dadurch zwar weiterhin Einsparungen ergeben, diese wären nun jedoch geringfügig niedriger als die Einsparungen des Holz-Systems.

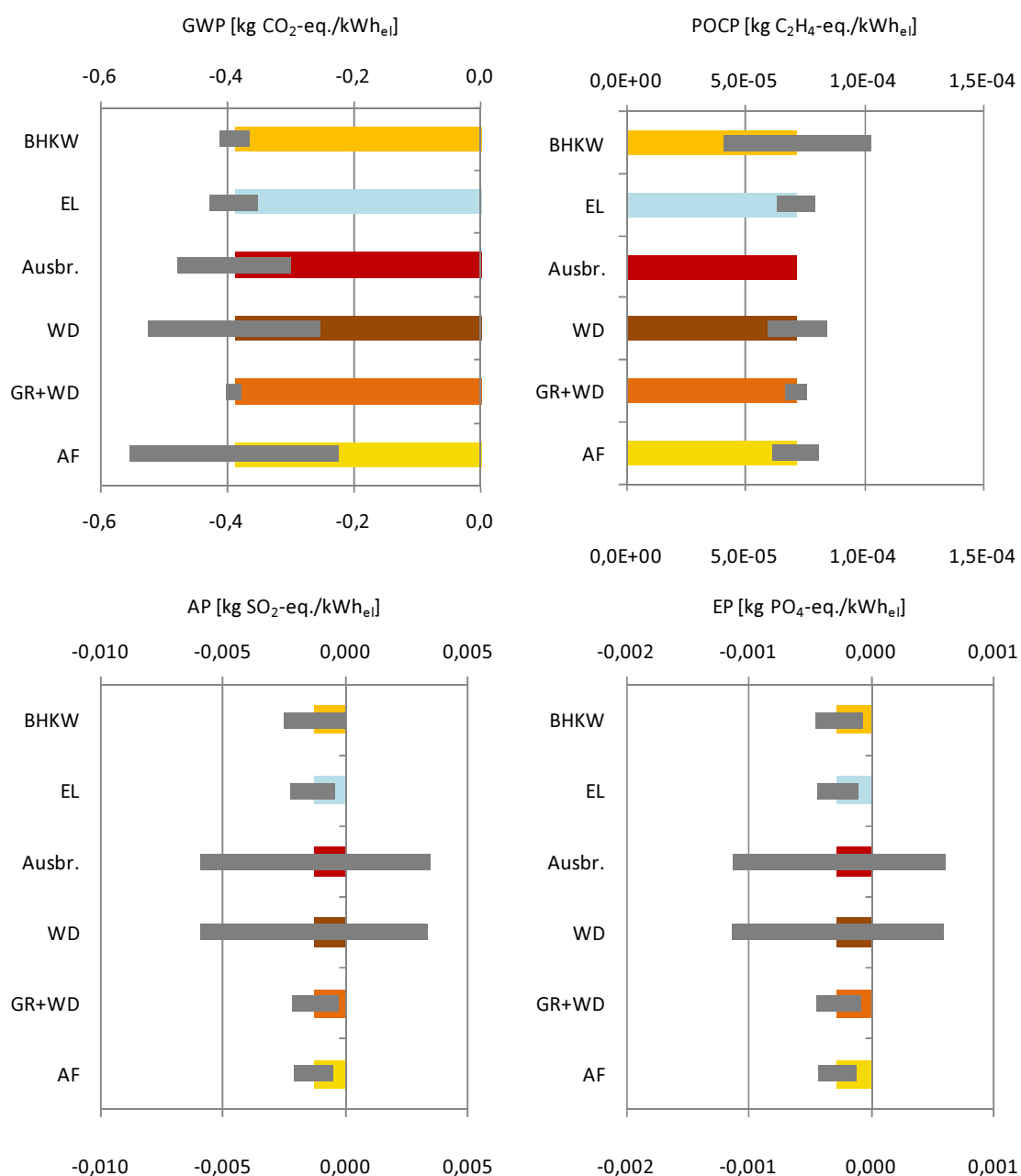


Abbildung 74: Einfluss der Unsicherheit der berechneten Emissionsfaktoren für die BHKW-Emissionen, die Lagerung und Ausbringung des Gärrestes bzw. der Wirtschaftsdünger sowie für die Kompostierung

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die durch die Unsicherheit der Emissionsfaktoren für die Ammoniak-, Lachgas- und Methanemissionen verursachten Schwankungsbreiten der Ergebnisse (in den Wirkungskategorien GWP, AP, EP und POCP) zwar beträchtlich sind, den Grund-Trend der Basis-Ergebnisse jedoch nicht umkehren würden und nur in einem Fall („Emissionsfaktor niedrig“ für REF AF) das Ergebnis des Vergleichs mit dem Holz-System in der Wirkungskategorie GWP umkehren würden.

4.6. Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener erneuerbarer und fossiler Technologien zur Stromerzeugung

In diesem Kapitel werden nun die in dieser Arbeit berechneten Umweltwirkungen für die Stromerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen mit Literaturdaten für weitere Technologien zur erneuerbaren sowie auch fossilen Stromerzeugung verglichen. Die Literaturdaten stammen aus der Ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent Centre 2007) und beziehen sich auf die Stromproduktion in Österreich und teilweise auch Europa im Jahr 2000. Folgende Technologien werden für den Vergleich herangezogen:

- durchschnittliches österreichisches Steinkohlekraftwerk (SK)
- durchschnittliches österreichisches Ölkraftwerk (EÖ)
- durchschnittliches österreichisches Erdgas-Kraftwerk (EG)
- durchschnittliche österreichische Wasserkraft: 75% Laufwasserkraftwerke, 25% Speicherkraftwerke (WaK)
- durchschnittliches österreichisches Pumpspeicherkraftwerk (WaK, PS)
- österreichische Photovoltaik (Mix aus Aufdach- und Gebäude-integrierten Anlagen) (PV)
- durchschnittlicher Windkraftmix (30kW, 150kW, 300kW, 600kW, 800kW für schweizer Verhältnisse) (WiK)
- österreichischer Produktionsmix (7,7% Steinkohle; 2,2% Braunkohle; 1,6% Erdöl; 8,2% Erdgas; 0,5% Industriegas; 77,1% Wasserkraft; 2,6% Pumpspeicherkraft; 0,1% Windkraft) (AT)
- UCTE⁸-Mix (ca. 15,5% Wasserkraft, 36,9% Kernenergie und 47,6% fossilen thermischen Kraftwerken) (UCTE)

Die Ergebnisse des Vergleichs sind in den Abbildung 75 und Abbildung 76 dargestellt und werden in den folgenden Absätzen diskutiert. Für die in dieser Arbeit detailliert untersuchten Technologien „Biogas“ und „Holz“ sind jeweils die Emissionen und Gutschriften des Systems hell sowie die Differenz daraus dunkel dargestellt.

Verbrauch abiotischer Ressourcen

Betrachtet man nur die Emissionen, schneidet in dieser Wirkungskategorie die Wasserkraft vor der Windkraft am besten ab. Danach folgt bereits das „Holz-System“ sehr knapp vor der Photovoltaik und dem Biogas-System. Es folgen der österreichische Stromproduktionsmix, die Pumpspeicherkraftwerke und der UCTE-Mix. An den letzten Stellen stehen erwartungsgemäß die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Steinkohle. Unter Beachtung der Gutschriften ergeben sich für das Biogas- und das Holz-System Einsparungen, wobei die des Holz-Systems ca. 3-mal so hoch wie jene des Biogas-Systems ausfallen.

Treibhauspotential

Vom Trend her ergibt sich für die Wirkungskategorie Treibhauspotential ein Ähnliches Bild wie für den Verbrauch abiotischer Ressourcen. Die ersten drei Stellen werden von den Technologien Wasserkraft, Windkraft und Photovoltaik eingenommen. Knapp über der Photovoltaik liegen die Emissionen des Holz-Systems. Die Emissionen des Biogas-Systems

⁸ UCTE ist die französische Abkürzung für die Union für die Koordinierung der Erzeugung und des Transports elektrischer Energie

betragen das 4-fache der Emissionen des Holz-Systems und liegen damit zwischen den Produktionsmischen Österreichs und der UCTE, wie auch die Pumpspeicherkraftwerke. An den letzten Stellen liegen wiederum die fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Steinkohle. Unter Beachtung der Gutschriften würden sich sowohl für das Holz- als auch für das Biogas-System Einsparungen ergeben, wobei die des Biogas-Systems um 1,7-mal höher wären.

Versauerung

Auch in der Wirkungskategorie Versauerung belegen Wasser- und Windkraft die ersten Ränge gefolgt vom österreichischen Produktionsmix und der Photovoltaik. Danach folgen sehr knapp beisammen die Pumpspeicherkraftwerke, Erdgas und Steinkohle sowie das Holz-System inklusive abgezogener Gutschriften. Ca. doppelt so hoch liegen die versauernden Emissionen des Holzsystems ohne Gutschriften, der Erdölkraftwerke und des UCTE-Mixes. Die Emissionen des Biogas-Systems liegen mit dem 5-fachen des Holz-Systems mit Abstand am höchsten. Andererseits ergibt sich nach Abzug der Gutschriften für das Biogas-System, als einzige Technologie eine Einsparung, welche in der Höhe der Emissionen des Erdgaskraftwerkes liegt.

Eutrophierung

Die Ergebnisse der Eutrophierung unterscheiden sich doch deutlich von jenen der Versauerung. An den ersten Stellen liegen wieder Wasser- und Windkraft. Danach folgt jedoch der österreichische Produktionsmix und dann mit ca. doppelt so hohen Emissionen die Technologien Pumpspeicher-, Erdgas und Steinkohlekraftwerk sowie der UCTE-Mix. Die Emissionen der Photovoltaik und des Erdölkraftwerkes liegen noch deutlich darüber wie auch die Emissionen des Holz-Systems mit und ohne Beachtung der Gutschriften. Die Emissionen des Biogas-Systems liegen wie auch bei der Versauerung ca. 5,5-mal so hoch wie die des Holz-Systems. Nach Abzug der Gutschriften ergeben sich jedoch wieder Einsparungen, welche in der Größenordnung der Emissionen des Photovoltaik-Systems liegen.

Photochemische Oxidantienbildung

In dieser Wirkungskategorie werden die ersten Plätze von den Technologien Wasserkraft, Windkraft, dem österreichischen Produktionsmix sowie der Photovoltaik belegt. Es folgen die Emissionen der Pumpspeicher-Technologie, des Holz-Systems, der Steinkohlekraftwerke sowie des Biogas-Systems (nach Abzug der Gutschriften). Darüber liegen noch die Emissionen der Erdgas- und Erdölkraftwerke sowie des UCTE-Mixes und die reinen Emissionen des Biogas-Systems. Nach Abzug der Gutschriften ergibt sich nur für das Holz-System eine Einsparung, welche in der Größenordnung der Emissionen des Photovoltaik-Systems liegt.

Ozonabbau

Für den Ozonabbau ergeben sich die niedrigsten Emissionen erneut für die Wasser- und Windkraft gefolgt vom Steinkohlekraftwerk und der Photovoltaik. Knapp darüber liegen die Emissionen des Holz- und des Biogas-Systems und danach folgen der österreichische und der UCTE-Produktionsmix sowie die Pumpspeicher-Technologie. Mit Abstand die höchsten Emissionen entstehen durch die Stromproduktion in Erdöl- und Erdgaskraftwerken. Unter Beachtung der Gutschriften würden sich sowohl für das Holz- als auch für das Biogas-System Einsparungen ergeben, wobei die des Holz-Systems um 3,4-mal höher wären.

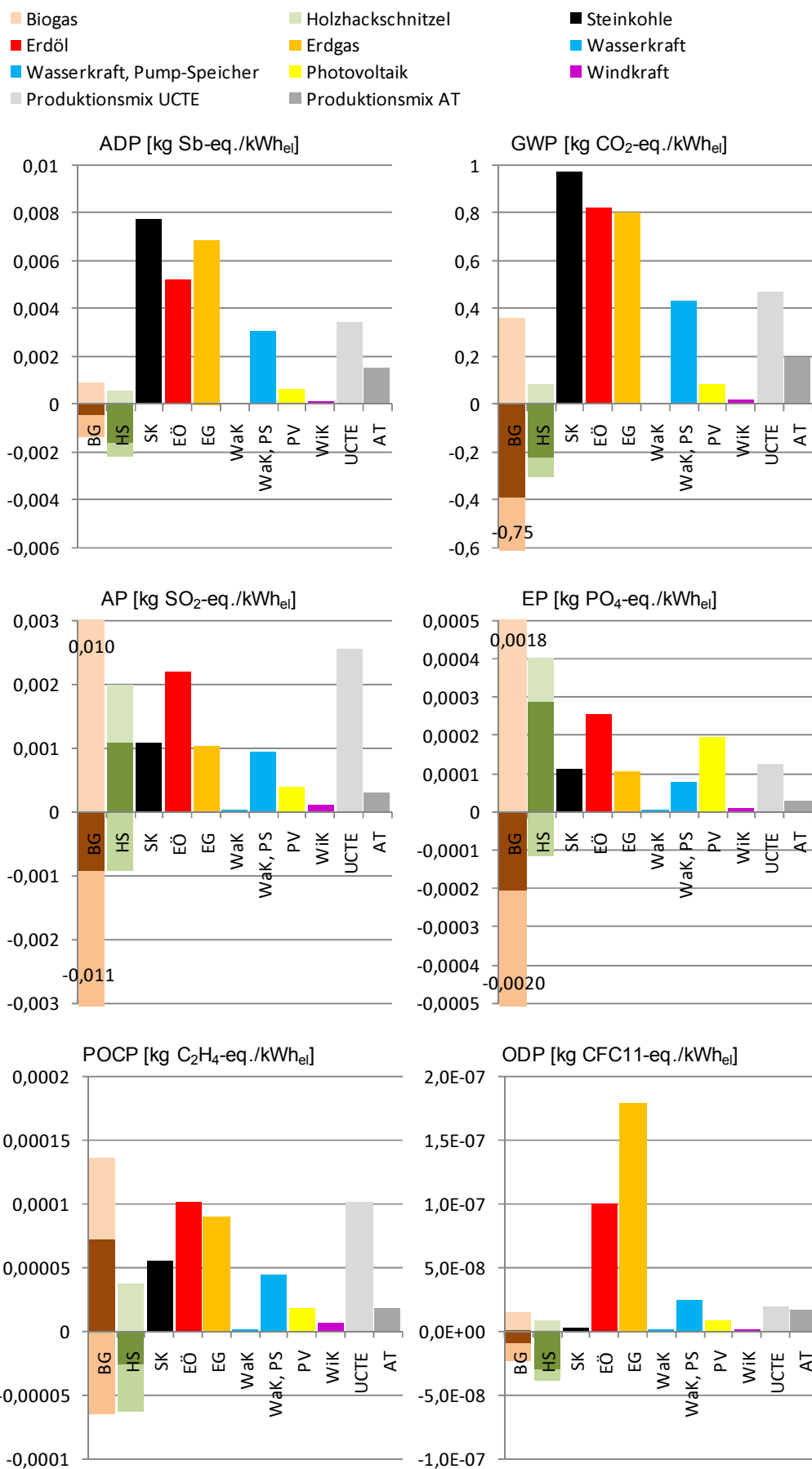


Abbildung 75: Vergleich der Umweltauswirkungen verschiedener Stromerzeugungstechnologien in den Wirkungskategorien ADP, GWP, AP, EP, POCP und ODP.

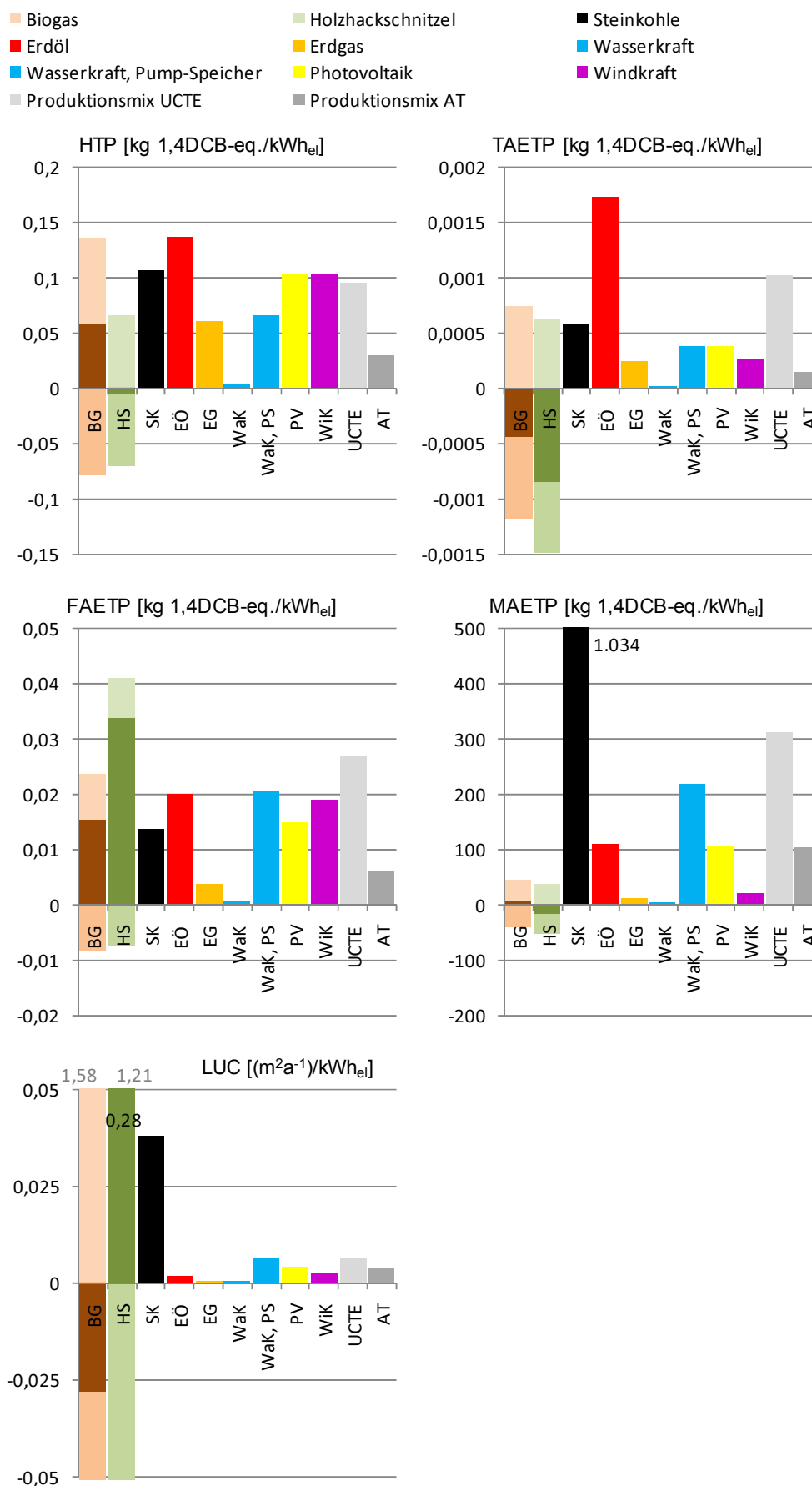


Abbildung 76: Vergleich der Umweltauswirkungen verschiedener Stromerzeugungstechnologien in den Wirkungskategorien HTP, TAETP, FAETP, MAETP und LUC.

Humantoxizität

In dieser Wirkungskategorie schneidet die Wasserkraft mit Abstand am besten ab, gefolgt von (dem von ihr geprägten) österreichischen Stromproduktionsmix. Es folgen das Biogas-System nach Abzug der Gutschriften, das Erdgaskraftwerk, die Emissionen aus dem Holz-System und das Pumpspeicherkraftwerk. Etwa doppelt so hoch liegen schließlich die Emissionen des UCTE-Stromproduktionsmixes, der Windkraft, der Photovoltaik und der Steinkohlekraftwerke und noch etwas darüber jene der Erdölkraftwerke und des Biogas-Systems. Nach Abzug der Gutschriften ergibt sich nur für das Holz-System eine geringe Einsparung an humantoxischen Emissionen.

Terrestrische Ökotoxizität

Für diese Wirkungskategorie ergibt sich das folgende Bild: die niedrigsten Emissionen entstehen abermals durch die Stromproduktion mittels Wasserkraft gefolgt vom österreichischen Stromproduktionsmix, Erdgaskraftwerken und Windkraftanlagen. Etwas darüber liegen die Emissionen aus den Pumpspeicherkraftwerken und Photovoltaik-Systemen. Es folgen die Steinkohlekraftwerke und das Holz-System. Etwa doppelt so hoch sind schließlich die Emissionen des UCTE-Produktionsmixes und des Biogas-Systems und die höchsten Emissionen weist das Erdölkraftwerk auf. Unter Beachtung der Gutschriften ergeben sich für das Biogas-System nahezu null Emissionen und für das Holz-System Einsparungen, welche höher als die Emissionen aus den Steinkohlekraftwerken sind.

Süßwasserökotoxizität

In dieser Wirkungskategorie ergibt sich folgende Reihenfolge: die niedrigsten Emissionen zeigt die Wasserkraft gefolgt vom Erdgaskraftwerk und dem österreichischen Stromproduktionsmix. Es folgen Strom aus einem Steinkohlekraftwerk, Photovoltaik-Anlagen, dem Biogas-System (nach Abzug der Gutschriften), Windkraft, Erdöl- und Pumpspeicherkraftwerken. Die Emissionen des UCTE-Produktionsmixes sowie des Holz-System (mit und ohne Abzug der Gutschriften) liegen noch deutlich darüber.

Salzwasserökotoxizität

In dieser Wirkungskategorie ergeben sich die niedrigsten Emissionen für Strom aus Wasserkraft, dem Biogas-System (nach Abzug der Gutschriften), Erdgaskraftwerken und Windkraft-Anlagen. Es folgen die Emissionen aus dem Holz- sowie dem Biogas-System. Etwa doppelt so hoch liegen die Emissionen des österreichischen Produktionsmixes, der Photovoltaik und von Erdölkraftwerken. Wiederum doppelt so hoch liegen die Emissionen für Strom aus Pumpspeicherkraftwerke und ca. 3-mal so hoch jene des UCTE-Produktionsmixes. Mit Abstand am höchsten fallen die Emissionen für Strom aus Steinkohlekraftwerken in dieser Wirkungskategorie aus. Unter Beachtung der Gutschriften würden sich für das Holz-System Einsparungen ergeben.

Landnutzung

In dieser Wirkungskategorie ergibt sich folgende Reihenfolge startend mit dem niedrigsten Flächenverbrauch: Wasserkraft, Erdgas, Erdöl, Windkraft, Produktionsmix AT, Photovoltaik, Produktionsmix UCTE, Pumpspeicherkraftwerke und Steinkohle. Um ein Vielfaches höher liegt der Flächenverbrauch pro kWhel für die Biomasse-Systeme. Unter Beachtung der Gutschriften würden sich für das Biogas-System Einsparungen ergeben, für das Holz-System würde sich der Flächenverbrauch ebenfalls reduzieren, würde jedoch immer noch weit über jenem von Steinkohle liegen.

Ranking der verglichenen Technologien

Um die allgemeine Umweltwirkung der verschiedenen Technologien in einer einfachen Weise vergleichen zu können, wurde ein Ranking erstellt. Dabei wurde keine Gewichtung der Bedeutung der einzelnen Wirkungskategorien vorgenommen. Für die Erstellung des Rankings wurden die verschiedenen Technologien innerhalb jeder Wirkungskategorie nach den Emissionswerten gereiht, anschließend wurden die Rangwerte addiert und eine Reihenfolge dieser Summen erstellt. Das Ergebnis des Rankings ist in Tabelle 41 aufgelistet.

Tabelle 41: Ranking der verglichenen Stromerzeugungstechnologien für alle Wirkungskategorien so wie Gesamt.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ADP												
HS, GS	BG, GS	WaK	WiK	HS	PV	BG	AT	WaK, PS	UCT E	EÖ	EG	SK
GWP												
BG, GS	HS, GS	WaK	WiK	PV	HS	AT	BG	WaK, PS	UCT E	EG	EÖ	SK
AP												
BG, GS	WaK	WiK	AT	PV	WaK, PS	EG	SK	HS, GS	HS	EÖ	UCT E	BG
EP												
BG, GS	WaK	WiK	AT	WaK, PS	EG	SK	UCT E	PV	EÖ	HS, GS	HS	BG
POCP												
HS, GS	WaK	WiK	AT	PV	HS	WaK, PS	SK	BG, GS	EG	UCT E	EÖ	BG
ODP												
HS, GS	BG, GS	WaK	WiK	SK	PV	HS	BG	AT	UCT E	WaK, PS	EÖ	EG
LUC												
BG, GS	WaK	EG	EÖ	WiK	AT	PV	UCT E	WaK, PS	SK	HS, GS	HS	BG
HTP												
HS, GS	WaK	AT	BG, GS	EG	HS	WaK, PS	UCT E	WiK	PV	SK	BG	EÖ
TAETP												
HS, GS	BG, GS	WaK	AT	EG	WiK	PV	WaK, PS	SK	HS	UCT E	BG	EÖ
FAETP												
WaK	EG	AT	SK	PV	BG, GS	WiK	EÖ	WaK, PS	BG	UCT E	HS, GS	HS
MAETP												
HS, GS	WaK	BG, GS	EG	WiK	HS	BG	AT	PV	EÖ	WaK, PS	UCT E	SK
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Gesamt												
WaK	BG, GS	HS, GS	WiK	AT	PV	EG	WaK, PS	HS	SK	UCT E	BG	EÖ

Die Reihenfolge der Technologien innerhalb der einzelnen Wirkungskategorien wurde bereits anhand der Abbildung 75 und Abbildung 76 erläutert. Für die Summe aller Wirkungskategorien schneidet Strom aus Wasserkraft am besten ab, gefolgt von Strom aus dem Biogas- und dem Holz-System unter Berücksichtigung der Gutschriften. Es folgt Strom aus Windkraft, der österreichische Stromproduktionsmix (welcher stark von der Wasserkraft geprägt ist) und Strom aus Photovoltaik-Anlagen. An 7. Stelle folgt mit Strom aus Erdgaskraftwerken die erste fossile Technologie, danach Strom aus Pump-Speicher-

Kraftwerken und erst danach Strom aus dem Holz-System ohne Berücksichtigung der Gutschriften. An 10. Stelle findet sich Strom aus Steinkohlekraftwerken und erst danach der UCTE-Produktionsmix. Strom aus Biogas ohne Berücksichtigung der Gutschriften steht an der vorletzten Stelle vor Strom aus Erdöl-Kraftwerken, welcher von den in dieser Arbeit verglichenen Technologien die größten Umweltauswirkungen verursacht.

Bedeutung der Ergebnisse für CO₂-Reduktionskosten (nach Ökostrombericht 2010)

Eines der Ziele der staatlichen Unterstützung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern ist es, einen Beitrag zur CO₂-Reduktion im Rahmen der Klimaschutzprogramme zu leisten. Daher werden im Ökostrombericht 2010 (E-Control 2010) für einen Vergleich der durch das Ökostromgesetz geförderten Technologien sogen. CO₂-Reduktionskosten berechnet. Dazu wird folgendermaßen vorgegangen: Als Vergleich wird die Erzeugung elektrischer Energie in neuen Gas-GuD⁹-Anlagen als Referenzszenario zur Bewertung neuer Ökostromanlagen herangezogen. Diese verursachen pro erzeugter kWh Strom Emissionen in Höhe von etwa 0,44 kg CO₂. Weiters wird davon ausgegangen, dass bei der Erzeugung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energieträgern für die Technologien Wasserkraft, Windkraft und Photovoltaik kein CO₂ emittiert wird. Für die Biomasse-Technologien wird angenommen, dass bei einer nachhaltigen Forstbewirtschaftung bzw. Agrarbewirtschaftung nur in dem Ausmaß CO₂ emittiert wird, in dem es auch wieder während des Forstwachstums bzw. Energiepflanzenwachstums der Atmosphäre entzogen und gebunden wird. (E-Control 2010). Aus Sicht der Lebenszyklusanalyse muss den Annahmen bezüglich den CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien widersprochen werden. Wie in Abbildung 75 dargestellt und bereits in der Einleitung erläutert (Punkt 1.2 „Umweltwirkung Erneuerbarer Energien“), weisen alle Technologien zur Stromerzeugung Treibhausgasemissionen auf, auch wenn diese wie für die Wind- und Wasserkraft tatsächlich sehr gering sind. Aus diesem Grund wurden, nach der Vorgehensweise des Ökostromberichtes 2010¹⁰, die CO₂-Reduktionskosten unter Berücksichtigung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit „neu“ berechnet (siehe Abbildung 77).

Für den Mittelwert aller Anlagen werden die Ergebnisse des Ökostromberichts dadurch zwar nicht umgekehrt, die Biomasse-Technologien schneiden jedoch deutlich besser (Biogas: Reduktion um 47%, feste Biomasse: Reduktion um 34%) und die Photovoltaik noch schlechter (Erhöhung um 22%) ab. Der Einfluss auf die CO₂-Reduktionskosten bei der Windkraft ist zu vernachlässigen. Betrachtet man die Berechnung für jene der untersuchten Anlagen, welche die größten Treibhausgaseinsparungen erzielen, so ergibt sich für Biogas ein Wert von 51 Euro/t CO₂-eq., welcher sogar knapp unter dem Wert von Windkraft liegt und für Biomasse fest ein Wert von 87 Euro/t CO₂-eq..

Es zeigt sich also, dass sich die CO₂-Reduktionskosten bzw. die CO₂-Einsparungen der unterschiedlichen Technologien durch die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Technologie stark zu Gunsten der Biomasse-Technologien verändern.

⁹ GuD ... Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk, die momentan beste verfügbare Technologie

¹⁰ CO₂-Reduktionskosten = (Unterstützungsausmaß / kWh) / (durchschn. vermiedene Emissionen); im Ökostrombericht konstant 0,44 kg CO₂/kWh (Gas-GuD-Anlage) für alle Technologien

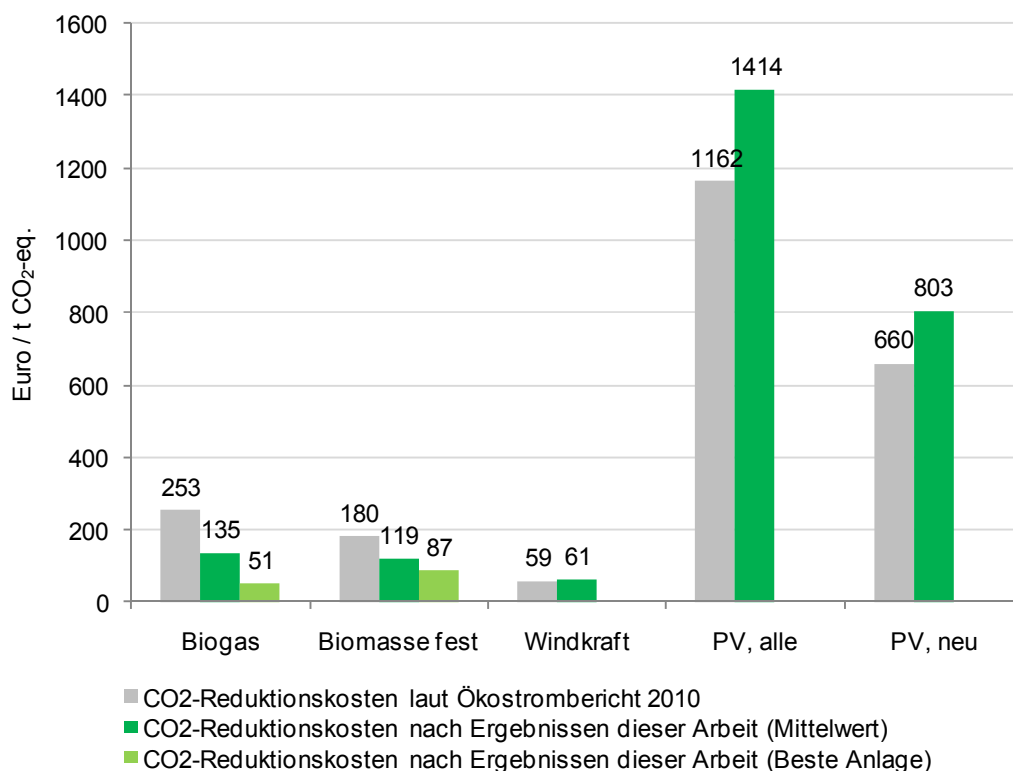


Abbildung 77: CO₂-Reduktionskosten nach Angaben aus dem Ökostrombericht 2010 und Berechnungen aus den Ergebnissen dieser Arbeit

Weitere Aspekte zur Gesamtbeurteilung von Biomasse-Technologien

Zwei weitere Aspekte die die Stromproduktion aus Biomasse betreffen jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit waren, sollen hier noch kurz erwähnt werden:

Beim weiteren Ausbau von Windkraft und Photovoltaik werden zusätzliche Potentiale für die Aufbringung der Ausgleichsenergie notwendig. Momentan wird dabei auf Pump-Speicherkraftwerke gesetzt. Eventuell könnte darin auch eine Chance bzw. ein Vorteil der Biomasse-Technologien liegen. Da die Energieträger bei diesen Technologien grundsätzlich gut lagerfähig sind könnte in Zukunft vermehrt Augenmerk auf das Potential, als Ausgleichsenergie für andere Erneuerbare-Technologien zu dienen, in den Vordergrund rücken. Optimierungen bei der Lagerung bzw. Speicherung der Energieträger wären dazu jedoch notwendig.

Weiters muss bei der Betrachtung von Biomassetechnologien beachtet werden, dass diese nicht nur den Energiesektor sondern auch die Land- bzw. Forstwirtschaft betreffen. Positive Effekte bezüglich Arbeitsplatz- bzw. Einkommenssicherung im ländlichen Raum sowie Landschaftspflege und Bewahrung des Landschaftsbildes sind zwar schwer in eine objektive Beurteilung mit einzubeziehen jedoch nicht zu vernachlässigen.

4.7. Optimierungspotentiale der Biomasse-Technologien

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Identifikation der umweltrelevanten Schlüsselprozesse als Basis für die Ableitung von Optimierungspotentialen. Daher sind auf den folgenden Seiten die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit für die möglichst umweltschonende Stromproduktion aus Biomasse zusammengefasst.

Biogas-System

Produktion nachwachsender Rohstoffe: die Produktion der eingesetzten NAWAROs verursacht in den Wirkungskategorien ADP, ODP und TAETP zwischen 20% und 30% der Gesamtemissionen. Bei der Analyse der Umweltwirkungen und Aufwendungen bei der Produktion der eingesetzten Kulturarten zeigte sich, dass Mais- und Gras/Klee-Silagen um bis zu 8-fach niedrigere Emissionen/Aufwendungen pro Tonne OTS verursachen als beispielsweise Roggen oder Raps. Wird im Vergleich zum konventionellen Anbau nur eine Minimale Bodenbearbeitung durchgeführt, reduziert dies die Emissionen sowie Inputs um ca. 20% gegenüber dem konventionellen Anbau (pro t OTS) obwohl es dabei zu geringeren Erträgen kommt. Der Unterschied zwischen den Aufwendungen/Emissionen für die Produktion der verschiedenen Kulturarten wird auch von Plöchl und Schultz 2003 beobachtet: in der Kategorie Treibhauspotential schneiden die Kulturarten Mais, Gras und Luzerne deutlich besser als Raps, Triticale oder Topinambur ab.

Transportdistanz der Substrate: Im Mittelwert liegt die Transportdistanz der Substrate bei ca. 10 km und ihr Beitrag zu den verschiedenen Wirkungskategorien liegt unter 10% bzw. für den abiotischen Ressourcenverbrauch sowie den Ozonabbau bei knapp 20%. Es zeigte sich jedoch dass eine überdurchschnittlich hohe Transportdistanz (bis zu 70km) negative Auswirkungen auf fast alle Wirkungskategorien hat.

Baumaterialien Infrastruktur: Ebenfalls Auswirkungen auf fast alle Wirkungskategorien, aber besonders auf die Toxizitätspotentiale, zeigen sich für die vermehrte Verwendung von Stahl im Anlagenbau.

BHKW-Motor: Da Zündstrahlmotoren zusätzlichen Treibstoff für die Verbrennung des Biogases benötigen und darüber hinaus höhere Methan-, sowie NMVOC-Emissionen verursachen als Gasmotoren, fallen die Ergebnisse für Anlagen, welche Zündstrahlaggregate einsetzen vor allem in den Wirkungskategorien ADP, ODP, POCP, sowie in den Toxizitätspotentialen durchwegs höher aus. Zu dieser Erkenntnis kommen auch Edelman et al. 2001, Scholwin et al. 2006, Spielmann et al. 2007 und Gärtner et al. 2008.

Substratmix: Die Verwendung von organischen Reststoffen als Substrat wirkt sich emissionsseitig positiv auf die Gesamtumweltwirkungen der Anlage aus, da mit diesen Substraten meist höhere Methankonzentrationen im Biogas erzielt werden können, welche einen geringeren Methanschlupf und einen höheren Wirkungsgrad des BHKW erzielen lassen. Dadurch können die Gesamtemissionen um bis zu 20% reduziert werden (siehe 4.2.5). Weiters weisen Anlagen, mit einem hohen Anteil an Wirtschaftsdünger oder organischen Reststoffen im Substratmix, durchschnittlich geringere Gesamt-Umweltwirkungen auf als reine NAWARO-Anlagen, da die Referenznutzung dieser Substrate (unvergozene Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger bzw. Kompostierung der organischen Reststoffe) ebenfalls hohe Umweltwirkungen aufweisen, welche dem Biogas-System gutgeschrieben werden. Auch Scholwin et al. 2006, Gärtner et al. 2008 und Pucker et al. 2010 kommen zu dem Schluss, dass der vermehrte Einsatz von Wirtschaftsdüngern

und organischen Reststoffen ökologische Vorteile gegenüber reinen NAWARO-Anlagen aufweist. In der aktuellen Ökostromverordnung 2010 wurden die Bestimmungen für die Einspeisetarife dahingehend geändert, dass sie mit der Bedingung Gülle mit einem Masseanteil von mindestens 30% am Substratmix einzusetzen verknüpft wurden. Weiters wurde die Reduktion des gewährten Einspeisetarifes für Anlagen die andere als rein landwirtschaftliche Substrat-Einsatzstoffe verwenden von 30% auf 20% reduziert. Beide Maßnahmen wirken sich aus Sicht der vorliegenden Ergebnisse positiv auf die Umweltwirkungen von Strom aus Biogas aus.

Wärmenutzung: Eine möglichst vollständige Nutzung der entstehenden Wärme wirkt sich positiv auf die Ergebnisse aller Wirkungskategorien aus. Bei der Planung von Biogasanlagen sollte auf ein möglichst vollständiges Wärmenutzungskonzept geachtet werden. Auf den großen Einfluss der Wärmenutzung auf die Gesamtergebnisse weisen ebenfalls Edelmann et al. 2001, Scholwin et al. 2006, Gärtner et al. 2008 und Pucker et al. 2010 hin. Auch dieses Optimierungspotential ist bereits seit der Ökostromgesetznovelle 2006 als Bedingung für die Genehmigung von neuen Anlagen (mindestens 60% Brennstoffnutzungsgrad) gesetzlich verankert.

Folgende Maßnahmen verbessern die Emissionen gezielt in einigen Wirkungskategorien:

Abgedecktes Gärrestendlager: Da die im Gärsubstrat enthaltene organische Substanz im Fermenter nicht zu 100 % mineralisiert wird, finden auch bei der Lagerung der Gärreste weiterhin Gär- und andere mikrobiologische Prozesse statt, welche gasförmigen Emissionen (CH_4 , NH_3 , N_2O , H_2S , VOC) verursachen. Daher ist aus Sicht des Umweltschutzes sowie auch aus wirtschaftlichen Überlegungen die gasdichte Abdeckung des Endlagers zu empfehlen, da damit Emissionen in die Atmosphäre reduziert und zusätzliches Biogas gewonnen werden können. (FNR 2006a). Durch die gasdichte Abdeckung des Gärrestendlagers können durch die vermiedenen Methan-, Lachgas- und Ammoniakemissionen die Emissionen in den Wirkungskategorien GWP um durchschnittlich 12% (max. 30%), AP und EP um ca. 10% (max. 35%) sowie POCP um ca. 6% (max. 17%) reduziert werden (siehe 4.2.5). Für einzelne Anlagen mit schlechter Auslegung, kann das Reduktionspotential jedoch deutlich höher ausfallen (siehe Klammern). Die erhöhte Stromproduktion aufgrund der Verwertung des im Endlager entstehenden Methans wirkt sich nur geringfügig auf die Ergebnisse aller Wirkungskategorien aus. Auch in der Arbeit von Edelmann et al. 2001 wird die Abdeckung des Endlagers als Optimierungsvariante angeführt, wobei der Einfluss auf das Gesamtergebnis bei etwa 10% Reduktion liegt. Auch in den Arbeiten von Scholwin et al. 2006, Gärtner et al. 2008 und Pucker et al. 2010 wird die gasdichte Abdeckung des Endlagers empfohlen. In der Arbeit von Spielmann et al. 2007 hat die Abdeckung des Endlagers einen besonders großen Einfluss auf die Gesamtergebnisse: Reduktion der Emissionen um den Faktor 2,3 für das GWP, 2,6 für das AP, 2,4 für das EP und 3,4 für das POCP, siehe auch Tabelle 35).

Gärrestausbringtechnik: In den Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung wird der Großteil der Gesamtemissionen durch die bei der Gärrestausbringung auftretenden Ammoniakemissionen verursacht. Durch die Ausbringung mit der emissionsmindernden Schleppschlauch-Ausbringtechnik, können die Umweltwirkungen in diesen beiden Wirkungskategorien deutlich reduziert werden. Für den Mittelwert aller Anlagen ergibt sich eine Reduktion des AP um ca. 12% und das EP um ca. 12,5%. Für Einzelne Anlagen kann das Reduktionspotential jedoch deutlich größer sein (AP: 32%, EP: 34%). (Vom Standpunkt einer

umfassenden Bewertung aller Wirkungskategorien ist von der Injektionstechnik abzuraten, da diese zwar eine größere Reduktion der Ammoniakemissionen bewirkt, gleichzeitig jedoch die klimawirksamen Lachgasemissionen stark erhöht.) Neben den technischen Maßnahmen sind vor allem auch die Witterungsbedingungen zu beachten. Die Ausbringung von Gärresten sollte nach Möglichkeit bei kühler, feuchter Witterung (ideal bei leichtem Regen) und „annähernder“ Windstille erfolgen. (BMLFUW 2007). Bei unbewachsenen Böden wird die Einarbeitung innerhalb einer Stunde nach dem Ausbringen empfohlen (Gärtner et al. 2008), welche noch positivere Effekte als die Ausbringung mittels Schleppschlauch bewirkt. In der Studie von Edelmann et al. 2001 wird für die Anwendung der Schleppschlauchtechnik eine Reduktion des Gesamtergebnisses (Eco-Indicator 99) um 1/3 berechnet. Auch in den Studien von Skarka 2007, Spielmann 2007, Gärtner 2008 und Pucker 2010 wird auf den Einfluss der Gärrestausrückführung auf das Versauerungs- und Eutrophierungspotential hingewiesen.

Holz-System

Bereitstellung der Biomasse: Die Produktion der NAWAROs trägt im Holzsystem für einige Wirkungskategorien knapp 50% zum Gesamtergebnis bei. Daher tragen alle Maßnahmen, die die Produktivität (Srm/h) der Arbeitsschritte erhöhen bzw. den Verbrauch an fossilen Treibstoffen (L/Srm) reduzieren zur Verbesserung der Gesamt-Umweltwirkungen bei.

Transport der Substrate: Der Transport der Substrate kann für einige Wirkungskategorien bis zu ein Drittel der Gesamtemissionen ausmachen. Neben der Transportdistanz hat beim Transport von fester Biomasse auch die Form und vor allem der Wassergehalt der transportierten Biomasse Einfluss auf die Höhe der Umweltwirkungen. Durch den Transport von bereits getrockneter Biomasse und hoher Auslastung der Ladekapazität (Transport von Rundholz oder Hackschnitzeln, nicht von ganzen Bäumen oder unaufgearbeitetem Schlagrücklass) können die Umweltwirkungen minimiert werden.

Rauchgasreinigung: Der Betrieb der Anlage, welcher die Emissionen der Hackschnitzel-Verbrennung beinhaltet, verursacht in einigen Wirkungskategorien rund drei Viertel der Gesamtemissionen. Eine erweiterte Rauchgasreinigung, welche vor allem die NO_x- und Staubemissionen reduziert, kann eine Reduktion der Emissionen in diesen Wirkungskategorien um fast ein Drittel bewirken. Diese Schlussfolgerung ziehen auch Jungbluth et al. 2002, sowie Bauer et al. 2007.

Wärmenutzung: Eine möglichst vollständige Nutzung der entstehenden Wärme wirkt sich wie auch im Biogas-System positiv auf die Ergebnisse aller Wirkungskategorien aus. Bei der Planung der Anlagen sollte daher auf ein möglichst vollständiges Wärmenutzungskonzept geachtet werden. Wie bereits beim Biogas-System erwähnt ist dieses Optimierungspotential bereits seit der Ökostromgesetznovelle 2006 als Bedingung für die Genehmigung von neuen Anlagen (mindestens 60% Brennstoffnutzungsgrad) gesetzlich verankert.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Umweltauswirkungen der Stromproduktion durch bio- bzw. thermo-chemische Umwandlung der in Biomasse enthaltenen Energie mit Hilfe der Lebenszyklusanalyse untersucht.

Unter biochemischer Umwandlung wird in dieser Arbeit die Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen, Wirtschaftsdüngern und organischen Reststoffen zu Biogas verstanden, welches anschließend in Blockheizkraftwerken verwertet wird, wobei Strom und Wärme entstehen. Das Biogas-System enthält die Lebenszyklusabschnitte Produktion der nachwachsenden Rohstoffe, Transport der Substrate zur Biogasanlage, Infrastruktur der Biogasanlage (Errichtung und Abriss der Anlage), Betrieb der Biogasanlage, Stromerzeugung im BHKW, Lagerung der Gärreste sowie Ausbringung der Gärreste (siehe Abbildung 78).

Unter thermo-chemischer Umwandlung wird die Verbrennung fester Biomasse mit anschließender Stromproduktion durch einen Dampfturbinenprozess sowie die Vergasung fester Biomasse und die anschließende Verstromung des Produktgases in einem Gasmotor verstanden. Dabei entstehen ebenfalls Strom und Wärme als verwertbare Produkte. Das Holz-System besteht aus den Lebenszyklusabschnitten Produktion der nachwachsenden Rohstoffe, Transport der Substrate zur Anlage, Betrieb der Anlage (inkludiert Stromerzeugung und Entsorgung der Asche), Infrastruktur der Anlage sowie Aufwendungen für ein eventuell notwendiges Backup-System (siehe Abbildung 78).

Bei der Erstellung der Lebenszyklusanalyse wurde nach der ISO-Norm 14040:2006 (Umweltmanagement – Ökobilanz) vorgegangen. Da in beiden betrachteten Systemen neben dem Hauptprodukt Strom, auf das sich alle Ergebnisse beziehen, noch weitere Koppelprodukte produziert werden (Wärme und teilweise auch Dünger), wurde der dadurch entstehende Nutzen wie in der Ökobilanz-Norm nahegelegt durch eine Systemerweiterung ausgeglichen. Konkret wurde für die genutzte Wärme eine Gutschrift, welche die Umweltauswirkungen der durchschnittlichen, österreichischen Wärmeproduktion umfasst, und für die zusätzliche Düngewirkung des Gärrestes eine Gutschrift, welche die Umweltwirkungen der synthetischen Stickstoff-Düngerproduktion und –Anwendung umfasst, erteilt. Weiters wurde für alle eingesetzten Substrate Referenznutzungen definiert, die die Verwendung dieser Inputs für die Situation ohne die untersuchten Anlagen beschreiben. Die durch diese Referenznutzungen entstehenden Umweltwirkungen wurden ebenfalls den untersuchten Systemen gutgeschrieben. Durch diese Betrachtungsweise kommen für das Biogas-System die Lebenszyklusabschnitte Referenznutzung nachwachsende Rohstoffe, Referenznutzung Wirtschaftsdünger, Referenznutzung organische Reststoffe, Gutschrift Wärmenutzung und Gutschrift Dünger hinzu. Für das Holz-System erweitert sich die Betrachtung um die Lebenszyklusabschnitte Referenznutzung nachwachsende Rohstoffe und Gutschrift Wärmenutzung (siehe Abbildung 78).

Für die Erstellung der Sachbilanz wurden regionale Daten der untersuchten Anlagen in persönlichen Interviews mit den Anlagenbetreibern erhoben und bei Bedarf durch chemische Analysen und vor allem bei Emissionsfaktoren für die Gärrestlagerung und –ausbringung sowie die Kompostierung durch Literaturdaten ergänzt. Globale Daten wie z.B. die Herstellung von Baumaterialien oder Transportdienstleistungen wurden der Ecoinvent-Datenbank (Ecoinvent 2007) entnommen.

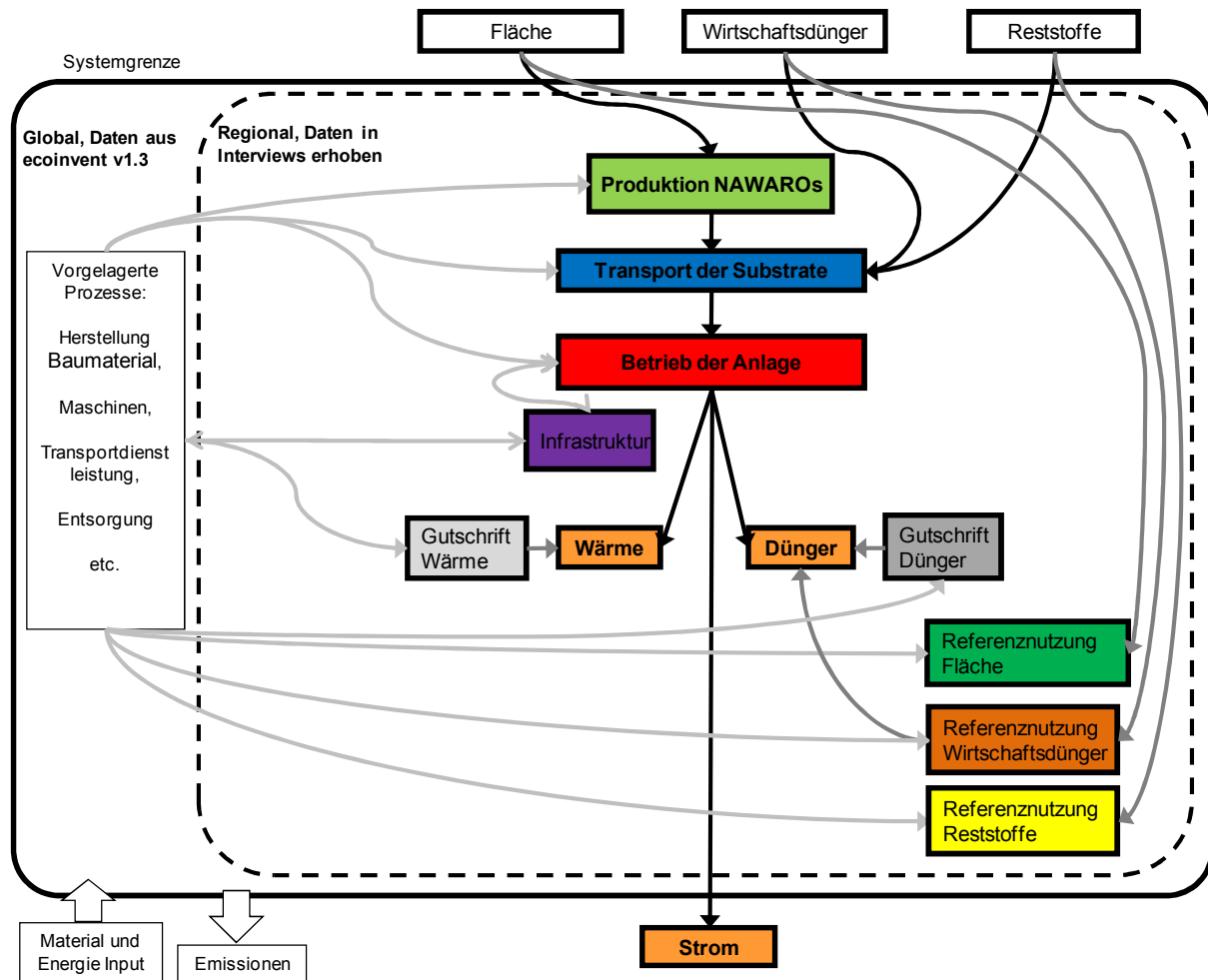
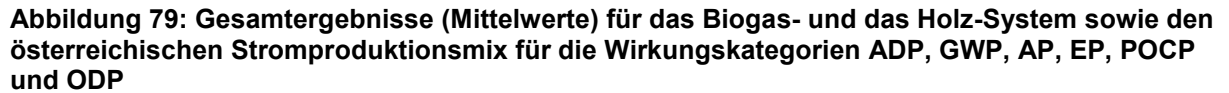


Abbildung 78: Systemgrenzen für die Lebenszyklusanalyse der bio-chemischen bzw. thermo-chemischen Umwandlung von Biomasse zur Stromproduktion. Darstellung der Lebenszyklusabschnitte der Biomasse-Systeme sowie der Gutschriften und Referenzsysteme.

Für die Wirkungsabschätzung, im Zuge derer ein funktionaler Zusammenhang zwischen den in der Sachbilanz ermittelten Daten und den Umweltauswirkungen hergestellt wird, wurde die international gebräuchliche Methode CML 2001 verwendet. Es wurden die Wirkungskategorien des Base-Line-Ansatzes: Verbrauch abiotischer Ressourcen (ADP), Treibhauspotential (GWP), Versauerungspotential (AP), Eutrophierungspotential (EP), photochemisches Oxidantienbildungspotential (POCP), Ozonabbaupotential (ODP), Landnutzung (LUC), Humantoxizitätspotential (HTP), terrestrisches Ökotoxizitätspotential (TAETP), Süßwasser-Ökotoxizitätspotential (FAETP) und Salzwasser- Ökotoxizitätspotential (MAETP) verwendet.

5.1. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse des Biogas- sowie des Holz-Systems (jeweils der Mittelwert der untersuchten Anlagen) sowie die Werte für den österreichischen Stromproduktionsmix (Ecoinvent 2007) sind in den Abbildung 79 und Abbildung 80 für alle Wirkungskategorien dargestellt. Für die in dieser Arbeit untersuchten Systeme sind jeweils im ersten Balken die Emissionen (positive Werte) bzw. Referenzsysteme und Gutschriften (negative Werte) nach Lebenszyklusabschnitten getrennt dargestellt. Im zweiten Balken (schwarz) erfolgt die Darstellung des Gesamtergebnisses (Differenz aus Emissionen und Referenzsystemen/Gutschriften ... DIF).



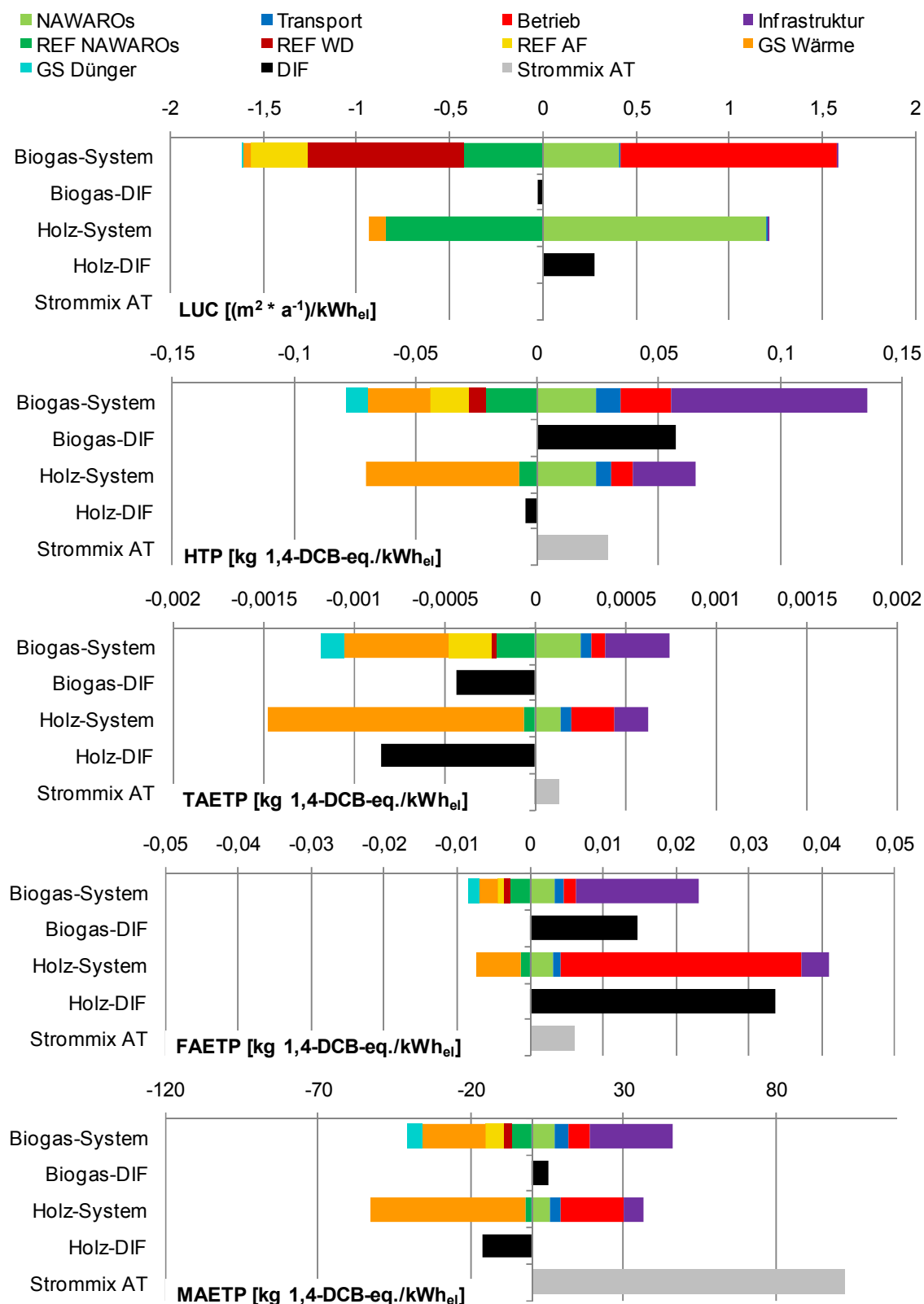


Abbildung 80: Gesamtergebnisse (Mittelwerte) für das Biogas- und das Holz-System sowie den österreichischen Stromproduktionsmix für die Wirkungskategorien LUC, HTP, TAETP, FAETP und MAETP

Insgesamt ergeben sich für das Biogas-System in der Basisvariante Einsparungen in den Wirkungskategorien ADP, GWP, AP, EP, ODP, LUC, und TAETP. In den Wirkungskategorien POCP, HTP, FAETP und MAETP kommt es auch nach Abzug der Gutschriften zu

Emissionen, welche außer für das MAETP auch über jenen der konventionellen österreichischen Stromproduktion liegen.

Für das Holz-System ergeben sich in der Basisvariante insgesamt Einsparungen in den Wirkungskategorien ADP, GWP, POCP, ODP, HTP, TAETP und MAETP. In den Wirkungskategorien AP, EP, LUC und FAETP kommt es auch nach Abzug der Gutschriften zu Emissionen, welche in allen Fällen über jenen der konventionellen österreichischen Stromproduktion liegen.

Beim Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur zeigt sich für das Biogas-System, dass die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit (soweit ein Vergleich aufgrund unterschiedlicher Annahmen zur Systemgrenze und funktionellen Einheit möglich ist) in der gleichen Größenordnung wie in der Literatur liegen.

Für das Holz-System wurde bei einem Vergleich mit Literaturergebnissen festgestellt, dass die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ebenfalls weitgehend in der gleichen Größenordnung wie in der Literatur bzw. tendenziell etwas höher als die Literaturwerte liegen.

5.2. Vergleich zwischen Biogas- und Holz-System sowie mit anderen Stromerzeugungstechnologien

In den Wirkungskategorien ADP, POCP, ODP, HTP, TAETP sowie MAETP sind die Einsparungen des Holz-Systems größer als jene des Biogas-Systems. In den Wirkungskategorien GWP, AP, EP und LUC sind die Einsparungen des Biogassystems größer. In der Wirkungskategorie FAETP treten für beide Systeme Emissionen auf, welche für das Biogas-System geringer als für das Holz-System ausfallen.

Beim Vergleich der Beiträge der unterschiedlichen Lebenszyklusabschnitte zu den einzelnen Wirkungskategorien fällt auf, dass der Lebenszyklusabschnitt Produktion der NAWAROs im Holzsystem einen fast doppelt so großen Einfluss auf die Gesamtergebnisse hat wie im Biogas-System. Dieser Umstand kann durch die Tatsache erklärt werden, dass im Holz-System 100% der Substrate eigens für die thermische Verwertung „produziert“ werden, wohingegen im Biogas-System ein erheblicher Anteil der Substrate aus Abfallstoffen anderer Produktionssysteme besteht, für welche die Produktion nicht dem Biogas-System angerechnet wird. Der Anteil der Produktion der NAWAROs ist im Holz-System am größten für die Wirkungskategorien ADP, GWP, ODP und LUC. Im Biogas-System für die Wirkungskategorien ADP, ODP, LUC und TAETP. Der hohe Anteil am TAETP lässt sich durch die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln bei der Produktion, der für die Vergärung geeigneten nachwachsenden Rohstoffe erklären, welche ein hohes Wirkungspotential in dieser Wirkungskategorie aufweisen und für die Produktion der NAWAROs für die thermische Verwertung nicht benötigt werden.

Der Anteil des Transportes an den Gesamtemissionen liegt für beide Systeme in der gleichen Größenordnung und ist am höchsten in den Wirkungskategorien ADP, GWP und ODP.

Fasst man die Lebenszyklusabschnitte Betrieb der Biogasanlage, BHKW, Gärrestlagerung und Gärrestausrückführung zu einem Abschnitt zusammen und vergleicht diesen mit dem Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Anlage des Holz-Systems so zeigen sich doch deutliche Unterschiede zwischen den beiden Systemen: im Biogas-System ist dieser Abschnitt hauptverantwortlich für die Emissionen in den Wirkungskategorien AP und EP (>90%) sowie auch

GWP, POCP und LUC (>75%). In den Wirkungskategorien ADP und ODP liegt der Beitrag bei ca. einem Drittel und für die Toxizitätspotentiale um die 10%. Im Holz-System dagegen ist dieser Lebenszyklusabschnitt sehr wichtig für die Toxizitätspotentiale (vor allem FAETP und MAETP) und der Beitrag in den Wirkungskategorien ADP, GWP und POCP liegt um oder unter 30%. Nur in den Wirkungskategorien AP und EP ist auch für das Holz-System der Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Anlage bestimmend wenn auch mit einem geringeren Anteil als im Biogas-System (ca. 75%).

Der Anteil der Infrastruktur an den Gesamtergebnissen in den einzelnen Wirkungskategorien ist im Biogas-System vor allem für die Toxizitätspotentiale tendenziell höher als im Holz-System. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass es sich bei den Biogasanlagen im Allgemeinen um kleinere Anlagen handelt, bei denen der Anteil der Infrastruktur pro kWh produziertem Strom mehr ins Gewicht fällt.

Beim Vergleich der Umweltwirkungen des Biogas- und des Holz-Systems fällt weiters auf, dass für einige Wirkungskategorien unterschiedliche Substanzen für die verschiedenen Wirkungspotentiale verantwortlich sind (siehe Abbildung 81). Setzt sich beim Biogas-System das Treibhauspotential ca. zu je einem Drittel aus Methan-, Lachgas- und CO₂-Emissionen fossilen Ursprungs zusammen, wird es im Holz-System zu 92% aus CO₂-Emissionen fossilen Ursprungs verursacht und Lachgas- bzw. Methan-Emissionen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Auch das Versauerungspotential setzt sich bei den beiden Technologien unterschiedlich zusammen: während im Biogas-System 77% durch Ammoniakemissionen durch die Lagerung und Ausbringung des Gärrestes, ca. 13% durch NO_x-Emissionen aus dem BHKW, ca. 2% durch SO₂-Emissionen aus dem BHKW und ca. 8% durch vorgelagerte Ketten verursacht werden, sind im Holz-System die NO_x-Emissionen aus der Verbrennung für 70% der versauernden Wirkung verantwortlich, 8% werden durch SO₂-Emissionen aus der Verbrennung und ca. 20% durch vorgelagerte Ketten verursacht.

Bei beiden Systemen haben die erteilten Gutschriften einen sehr großen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Im Holz-System ist hauptsächlich das Ausmaß der Wärmenutzung für die Größe der Gutschrift verantwortlich, das Referenzsystem für die Nutzung der NAWAROs spielt außer für die Wirkungskategorie Landnutzung eine untergeordnete Rolle (Anteil an den Gesamtgutschriften zwischen 4 und 20%).

Beim Biogas-System haben sowohl die Substratzusammensetzung, wie auch die Wärmenutzung einen großen Einfluss auf die Gesamtgutschriften. Wobei der Anteil für die Referenznutzung der Wirtschaftsdünger mit ca. 50% am größten in den Wirkungskategorien LUC, AP und EP und etwas geringer für das POCP (32%) und das GWP (24%) ist. Die Referenznutzung organischer Reststoffe hat ihren höchsten Anteil in den Wirkungskategorien GWP, AP und EP (ca. 45%), wobei ihr Anteil auch in den übrigen Wirkungskategorien zwischen 10 und 20% liegt. Die Gutschrift Wärmenutzung liefert den größten Beitrag zu den Gesamtgutschriften in den Wirkungskategorien ADP und ODP (ca. 65%), der Anteil an MAETP und TAETP liegt bei ca. 50% und auch in den Wirkungskategorien POCP, FAETP und HTP liegt er bei ca. einem Drittel. Die Referenznutzung NAWAROs sowie die Gutschrift Dünger haben einen weniger großen Einfluss auf die Gesamtgutschriften.

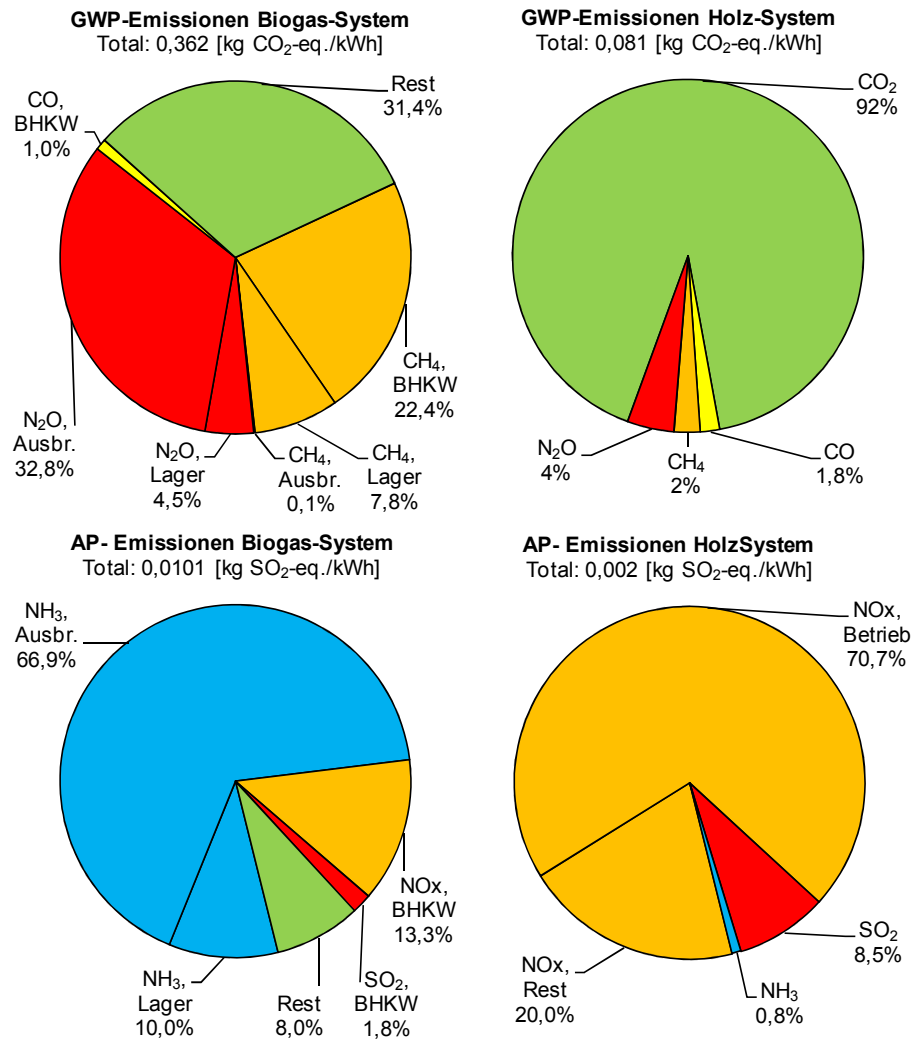


Abbildung 81: Zusammensetzung des Treibhaus- und Versauerungspotentials für das Biogas- und das Holz-System.

In Sensitivitätsanalysen wurde der Einfluss der, aus der Literatur angenommenen Parameter und Berechnungsmodelle auf die Gesamtergebnisse untersucht. Es zeigte sich, dass besonders im Biogas-System die angenommenen Emissionsfaktoren für die gasförmigen Emissionen bei der Gärrestausbringung (Schwankung der Gesamtemissionen um bis zu 45%), aber auch für die Gärrestlagerung (Schwankung der Gesamtemissionen um bis zu 10%), den Methanschlupf im BHKW (Schwankungen der Gesamtemissionen um bis zu 20%), die Referenznutzung Wirtschaftsdünger (Schwankung der Gesamtgutschriften um bis zu 40%) und die Referenznutzung organischer Reststoffe (Kompostierung) (Schwankung der Gesamtgutschriften um bis zu 20%) einen sehr großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Der Einfluss der angenommenen Wärmebereitstellungstechnologie für die Gutschrift Wärmenutzung hat im Holz-System (Schwankung der Gesamtgutschriften um bis zu +2000% bzw. -90%) einen größeren Einfluss auf die Gesamtgutschriften als im Biogas-System (Schwankung der Gesamtgutschriften um bis zu +750% bzw. -50%).

Im Vergleich mit anderen erneuerbaren und fossilen Stromerzeugungstechnologien zeigt sich noch einmal der große Einfluss der Gutschriften auf das Gesamtergebnis. Liegen die beiden Biomasse-Technologien unter Berücksichtigung der Gutschriften nach der Stromproduktion aus Wasserkraft an 2. (Biogas-System) und 3. Stelle (Holz-System) des Rankings, vor Windkraft und Photovoltaik, so würde das Holz-System ohne Berücksichtigung

der Gutschriften an 9. Stelle (hinter Strom aus Erdgas) und das Biogas-System sogar nur an 12. Stelle (von 13 betrachteten Technologien) hinter Steinkohle und dem UCTE-Mix, aber vor Strom aus Erdöl liegen. Die reinen Emissionen des Biogas-Systems liegen besonders in den Wirkungskategorien AP, EP, POCP, LUC, HTP, TAETP und FAETP gleich mit oder sogar über jenen der fossilen Stromerzeugungstechnologien. Für das Holz-System gilt das gleiche in den Wirkungskategorien AP, EP, LUC, TAETP und FAETP.

Bei der Berechnung der CO₂-Reduktionskosten (laut Ökostrombericht 2010) unter Berücksichtigung der in der vorliegenden Arbeit berechneten Ergebnisse für CO₂-Einsparungen bzw. -Emissionen der unterschiedlichen erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien, zeigte sich, dass sich die Ergebnisse durch die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Technologie stark zu Gunsten der Biomasse-Technologien verändern (Biogas: Reduktion der CO₂-Reduktionskosten um 47%, feste Biomasse: Reduktion um 34%, Photovoltaik: Erhöhung um 22%).

5.3. Optimierungspotentiale

Biogas-System

Aus den Ergebnissen der Untersuchung konnten folgende Schlussfolgerungen für eine möglichst umweltschonende Stromproduktion aus Biogas abgeleitet werden:

Produktion nachwachsender Rohstoffe: die Produktion der eingesetzten NAWAROs verursacht in den Wirkungskategorien ADP, ODP und TAETP zwischen 20% und 30% der Gesamtemissionen. Bei der Analyse der Umweltwirkungen und Aufwendungen bei der Produktion der eingesetzten Kulturarten zeigte sich, dass Mais- und Gras/Klee-Silagen um bis zu 8-fach niedrigere Emissionen/Aufwendungen pro Tonne OTS verursachen als beispielsweise Roggen oder Raps. Wird im Vergleich zum konventionellen Anbau nur eine Minimale Bodenbearbeitung durchgeführt, reduziert dies die Emissionen sowie Inputs um ca. 20% gegenüber dem konventionellen Anbau (pro t OTS) obwohl es dabei zu geringeren Erträgen kommt.

Transportdistanz der Substrate: Im Mittelwert liegt die Transportdistanz der Substrate bei ca. 10 km und ihr Beitrag zu den verschiedenen Wirkungskategorien liegt unter 10% bzw. für den abiotischen Ressourcenverbrauch sowie den Ozonabbau bei knapp 20%. Es zeigte sich jedoch dass eine überdurchschnittlich hohe Transportdistanz (bis zu 70km) negative Auswirkungen auf fast alle Wirkungskategorien hat.

Stahl als Baumaterial: Ebenfalls Auswirkungen auf fast alle Wirkungskategorien, aber besonders auf die Toxizitätspotentiale, zeigen sich für die vermehrte Verwendung von Stahl im Anlagenbau.

Zündstrahlmotoren: Da Zündstrahlmotoren zusätzlichen Treibstoff für die Verbrennung des Biogases benötigen und darüber hinaus höhere Methan-, sowie NMVOC-Emissionen verursachen als Gasmotoren, fallen die Ergebnisse für Anlagen, welche Zündstrahlaggregate einsetzen vor allem in den Wirkungskategorien ADP, ODP, POCP, sowie in den Toxizitätspotentialen durchwegs höher aus.

Hoher Anteil organischer Reststoffe im Substratmix: Die Verwendung von organischen Reststoffen als Substrat wirkt sich emissionsseitig positiv auf die Gesamtumweltwirkungen der Anlage aus, da mit diesen Substraten meist höhere Methankonzentrationen im Biogas erzielt

werden können, welche einen geringeren Methanschluß und einen höheren Wirkungsgrad des BHKW verursachen.

Anlagen, mit einem hohen Anteil an Wirtschaftsdünger oder organischen Reststoffen im Substratmix, weisen durchschnittlich geringere Gesamt-Umweltwirkungen auf als NAWARO-Anlagen, da die Referenznutzung dieser Substrate (unvergorene Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger bzw. Kompostierung der organischen Reststoffe) ebenfalls hohe Umweltwirkungen aufweisen, welche dem Biogas-System gutgeschrieben werden.

Eine möglichst vollständige Nutzung der entstehenden Wärme wirkt sich positiv auf die Ergebnisse aller Wirkungskategorien aus. Bei der Planung von Biogasanlagen sollte auf ein möglichst vollständiges Wärmenutzungskonzept geachtet werden.

Folgende Maßnahmen verbessern die Emissionen gezielt in einigen Wirkungskategorien:

Abgedecktes Gärrestendlager: durch die gasdichte Abdeckung des Gärrestendlagers können durch die vermiedenen Methan- Lachgas- und Ammoniakemissionen die Emissionen in den Wirkungskategorien GWP, AP, EP sowie POCP reduziert werden. Die erhöhte Stromproduktion aufgrund der Verwertung des im Endlager entstehenden Methans wirkt sich nur geringfügig auf die Ergebnisse aller Wirkungskategorien aus.

Gärrestausbringtechnik: In den Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung wird der Großteil der Emissionen durch die bei der Gärrestausbringung auftretenden Ammoniakemissionen verursacht. Durch die Ausbringung mit der emissionsmindernden Schleppschlauch-Ausbringtechnik, können die Umweltwirkungen in diesen beiden Wirkungskategorien deutlich reduziert werden. (Vom Standpunkt einer umfassenden Bewertung aller Wirkungskategorien ist von der Injektionstechnik abzuraten, da diese zwar eine größere Reduktion der Ammoniakemissionen bewirkt, gleichzeitig jedoch die klimawirksamen Lachgasemissionen sehr stark erhöht.)

Holz-System

Für eine umweltschonende Stromproduktion aus Holz-Hackschnitzeln konnten folgende Faktoren abgeleitet werden:

Bereitstellung der Biomasse: Die Produktion der NAWAROs trägt im Holzsystem für einige Wirkungskategorien knapp 50% zum Gesamtergebnis bei. Daher tragen alle Maßnahmen, die die Produktivität (Srm/h) der Arbeitsschritte erhöhen bzw. den Verbrauch an fossilen Treibstoffen (L/Srm) reduzieren zur Verbesserung der Gesamt-Umweltwirkungen bei.

Transport der Substrate: Der Transport der Substrate kann für einige Wirkungskategorien bis zu ein Drittel der Gesamtemissionen ausmachen. Neben der Transportdistanz hat beim Transport von fester Biomasse auch die Form und vor allem der Wassergehalt der transportierten Biomasse Einfluss auf die Höhe der Umweltwirkungen. Durch den Transport von bereits getrockneter Biomasse und hoher Auslastung der Ladekapazität (Transport von Rundholz oder Hackschnitzeln, nicht von ganzen Bäumen oder unaufgearbeitetem Schlagrücklass) können die Umweltwirkungen minimiert werden.

Rauchgasreinigung: Der Betrieb der Anlage, welcher die Emissionen der Hackschnitzel-Verbrennung beinhaltet, verursacht in einigen Wirkungskategorien rund drei Viertel der Gesamtemissionen. Eine erweiterte Rauchgasreinigung, welche vor allem die NO_x- und Staubemissionen reduziert, kann eine Reduktion der Emissionen in diesen Wirkungskategorien um fast ein Drittel bewirken.

Wärmenutzung: Eine möglichst vollständige Nutzung der entstehenden Wärme wirkt sich wie auch im Biogas-System positiv auf die Ergebnisse aller Wirkungskategorien aus. Bei der Planung der Anlagen sollte daher auf ein möglichst vollständiges Wärmenutzungskonzept geachtet werden.

6. Literaturverzeichnis

- Affenzeller, G. (2005) Integrierte Harvester-Forwarder-Konzepte (Harwarder). Universität für Bodenkultur, Department für Wald- und Bodenwissenschaften (Diplomarbeit)
- Alluvione, F., Bertora, C., Zavattaro, L., Grignani, C. (2010) Nitrous Oxide and Carbon Dioxide Emissions Following Green Manure and Compost Fertilization in Corn. In: Soil Science. Society of America Journal 74: 384–395
- Amon, B. (1998) NH_3 -, N_2O - und CH_4 -Emissionen aus der Festmistverfahrenskette Milchviehanbindehaltung Stall-Lagerung-Ausbringung. Universität für Bodenkultur, Institut für Land- Umwelt und Energietechnik.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T., and Zechmeister-Boltenstern, S. (2005) Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. Agriculture, Ecosystems & Environment 112: 153-162.
- Amon, B., Moitzi, C., Wagner-Alt, C., Kryvoruchko, V., Amon, T., and Boxberger, J. (2002) Methane, Nitrous Oxide and Ammonia Emissions from Management of Liquid Manures. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft BMLFUW.
- Amon, B., (2008) Produktionssysteme und Atmosphärenbelastung, Vorlesungsunterlagen Institut für Landtechnik, BOKU Wien
- Bauer, C. (2007) Holzenergie. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-IX, Paul Scherrer Institut Villingen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH
- BayLfU (2004) Biogashandbuch Bayern – Materialienband. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Herausgeber), Augsburg, Stand 2007/2008
- BayLfU (2006) Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorenwartung. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Herausgeber), Augsburg 2006
- BGBI. I Nr. 292/2001. Verordnung über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung)
- Bios Bioenergiesysteme GmbH, Beschreibung der Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des Dampfturbinenprozesses, <http://www.bios-bioenergy.at/de/strom-aus-biomasse/dampfturbine.html>, Stand 09/2010
- Bischofsberger, W., Dichtl, N., Rosenwinkel, K.H., Seyfried, C.F., Böhnke, B. (Hrsg.) (2005) Anaerobtechnik, 2. Vollständig überarbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2005, ISBN 3-540-06850-3
- BMLFUW (2004) Österreichischer Bericht - EU Nitratrichtlinie 91/676/EWG. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Sektion VII, 2004, Wien
- BMLFUW (2007) Der sachgerechte Einsatz von Biogasgülle und Gärrückständen im Acker- und Grünland. 2. Auflage, Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz des BMLFUW, Wien

- BMLFUW (2009) Erneuerbare Energien in Zahlen, Die Entwicklung erneuerbarer Energie in Österreich im Jahr 2008. <http://www.lebensministerium.at/filemanager/download/55304/> Stand 09/2010
- BMWFJ und BMLFUW (2010) Energiestrategie Österreich – Maßnahmenvorschläge. http://www.energiestrategie.at/images/stories/pdf/longversion/energiestrategie_oesterreich.pdf Stand 09/2010
- Bryant, M.P. (1977) Microbiology of anaerobic degradation and methanogenesis with special reference to sewage. In Schlegel, H.G., Barnea, J. (Hrsg.) , Proceedings of "Seminar on microbial energy conversion", New York Academic Press 1977
- Calzoni, J., Caspersen, N., Dercas, N., Gaillard, G., Gosse, G., Hanegraaf, M., Heinzer, L., Jungk, N., Kool, A., Korsuize, G., Lechner, M., Leviel, B., Neumayr, R., Nielsen, A. M., Nielsen, P. H., Nikolaou, A., Panoutsou, C., Panvini, A., Patyk, A., Rathbauer, J., Reinhardt, G. A., Rivad, G., Smedile, E., Stettler, C., Pedersen Weidema, B., Wörgetter, M., van Zeijts, H. (2000) Bioenergy for Europe: Which ones fit best? A Comparative Analysis for the Community. Final Report
- Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., and Amon, B. (2006) Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. Agriculture, Ecosystems & Environment 112: 171-177.
- Clemens, J., Wolter, M., Wulf, S., and Ahlgrim, H.-J. (2002) Methan- und Lachgas-Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.(KTBL). 406, 203-214. Münster, KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH. KTBL-Schrift. 3-12-0001.
- De Bode, M., Nielson, V., Voorburg, J., and L'Hermite, P. (1991) Odour and ammonia emissions from livestock farming. 59-66. 1991. London. 26-3-1991.
- Dendhooven, L., Splatt, P., Andersen, J., Scholefield, D. (1994): Kinetics of the denitrification process in a soil under permanent pasture, Soil biology & Biochemistry, 26(3), 361-370.
- Döhler, H. (2001) Ammoniak-Emissionen bei der Ausbringung von Fest- und Flüssigmist sowie Minderungsmaßnahmen. Eurich-Menden, B., Döhler, H., and Grimm, E. Kurzfassung der Tagungsbeiträge. 45|03, 20-21. Kloster Banz, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt. Emissionen der Tierhaltung - Kurzfassung der Tagungsbeiträge.
- DSM Agro (2006). Zusammensetzung Wirtschaftsdünger [WWW document]. URL <http://www.nutrinorm.nl/de/html/algemeen/Wirtschaftsdunger/zusammensetzungWD.pshe>
- Ecoinvent Centre 2007, ecoinvent data v2.0, Ecoinvent reports No. 1-25, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007, www.ecoinvent.org
- Edelmann, W., Schleiss, K., Engeli, H., Baier, U. (2001) Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas.. Baar, Arbeitsgemeinschaft Bioenergie (arbi).
- Edelmann, W., Schleiss, K., (2001); Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung fester biogener Abfallstoffe; BFE und BUWAL

- Energie-Control (2010) Ökostrombericht 2010. http://www.e-control.at/portal/pls/portal/portal.kb_folderitems_xml.redirectToItem?pMasterthingId=1785210 Stand 09/2010
- Europäische Kommission (2008) Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen
- FAL (2000) Lachgasemissionen aus der schweizerischen Landwirtschaft, Schriftenreihe der FAL (33), Zürich-Reckenholz, Schweiz
- Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., Moberg, Å. (2000) Life Cycle Assessment of Energy from Solid Waste; Stockholms University; Systemekologi och foa; ISBN 91-7056-103-6
- FNR (2005a). Leitfaden Bioenergie. Herausgegeben durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR), erstellt durch das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart und weitere Projektpartner, 2. Auflage, <http://fnr-server.de/cms35/fileadmin/biz/pdf/leitfaden/datensammlung/> Stand 09/2010
- FNR (2005b). Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Herausgegeben durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR), erstellt durch die Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
- FNR (2006a). Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung, Herausgegeben durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR), erstellt durch: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL); Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL); ISBN 3-00-014333-5
- FNR (2006b). Analyse und Evaluierung der thermo-chemischen Vergasung von Biomasse. Schriftenreihe: "Nachwachsende Rohstoffe", Band 29, Landwirtschaftsverlag, Münster, 2006
- Frisch, J., Fröba, N., Funk, M. und Weiershäuser, L. (2005) Kalkulationsprogramm zur KTBL-Datensammlung Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/05, Maschinen-, Arbeits- und Verfahrenskosten in der Pflanzenproduktion. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL).
- Frischknecht, R. (2006) Umweltverträgliche Technologien: Analyse und Beurteilung, Teil 2: Ökobilanzen, Vorlesungsunterlagen ETH Zürich, Studiengang Umweltwissenschaften, SS 2006
- Gärtner, S., Münch, J., Reinhardt, G., Vogt, R. (2008) Ökobilanzen. In: Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Verbundprojekt gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), S. 86 – 143
- Goedkoop, M., Spriensma, R. (2000) The Eco-indicator 99; A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report, Second revised edition, PRé Consultants B.V., Amersfoort
- Guderian, R., (Hrsg.) (2000) Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Bd. 1A: Atmosphäre. Anthropogene und biogene Emissionen – Photochemie der Troposphäre – Chemie der Stratosphäre und Ozonabbau. Springer Verlag Berlin – Heidelberg. ISBN: 3-540-66184-0

- Guinée J.B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., Bruijn, R., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J. (2001). Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards, Final report, Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, May 2001
- Haber et al. (2008). Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung. Ltz – Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe, des Ministeriums für Ernährung und ländlichen Raum Baden-Württemberg, Seite 26
- Handler, F. und Rathbauer, J. Kraftstoff- und Arbeitszeitbedarf in der österreichischen Landwirtschaft. 2005.
- Heck T. (2007) Wärme-Kraft-Kopplung. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-XIV, Paul Scherrer Institut Villingen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, www.ecoinvent.ch
- Heijungs R., Guinée, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A., Wegener Sleeswijk, A., Ansems, A.M.M., Eggels, P.G., van Duin, R., de Goede, H.P. (1992a) Environmental Life Cycle Assessment of Products; Guide; Report Nr. 9266, CML, Leiden
- Heijungs R., Guinée, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A., Wegener Sleeswijk, A., Ansems, A.M.M., Eggels, P.G., van Duin, R., de Goede, H.P. (1992b) Environmental Life Cycle Assessment of Products; Backgrounds, Report Nr. 9267, CML, Leiden
- Hellmann, B., (1995) Freisetzung klimarelevanter Spurengase in Bereichen mit hoher Akkumulation von Biomassen. Abschlussbericht der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
- Hersener J.L., Meier U., Dinkel F. (2002) Ammoniakemissionen aus Gülle und deren Minderungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Vergärung, Amt für Umweltschutz Kanton Luzern, Bundesamt für Energie
- Hofbauer, H., Rauch, R., Fürnsinn, S., Aichernig, C. (2005) Energiezentrale Güssing - Energiezentrale zur Umwandlung von biogenen Roh- und Reststoffen einer Region in Wärme, Strom, BioSNG und flüssige Kraftstoffe. Projektbericht im Rahmen der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“ im Auftrag des BMVIT
- Hüther, L. and Schuchardt, F. (1998) Einflußfaktoren auf die Schadgasfreisetzung bei der Lagerung/Kompostierung tierischer Exkrememente. Präsidialbüro und Öffentlichkeitsarbeit der FAL. Braunschweig.
- IPCC 2006, Emissions from Livestock and Manure Management. In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Veröffentlichung: IGES, Japan.
- Jäkel und Mau (1999). Umweltwirkung von Biogasgülle, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, Seite 13

- Jungbluth, N., Frischknecht, R., Faist, M. (2002) Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz. Überarbeiteter Schlussbericht Jänner 2002 im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Schweiz
- Jungbluth, N., Chudacoff, M., Dauriat, A., Dinkel, F., Doka, G., Faist Emmenegger, M., Gnasounou, E., Kljun, N., Schleiss, K., Spielmann, M., Stettler, C., Sutter, J. (2007) Life Cycle Inventories of Bioenergy. Ecoinvent report No. 17, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH
- Jungmeier, G., Resch, G., Spitzer, J. (1998) Environmental burdens over the entire life cycle of a biomass CHP plant. Biomass and Bioenergy, Vol. 15, Nos4/5, pp. 311-323
- Kaltschmitt, M., Streicher, W. (Hrsg.) (2009) Regenerative Energien in Österreich. Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung. Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009
- Kaparaaju, P.L.N., Rintala, J., A. (2003) Effects of temperature on post-methanation of digested dairy cow manure in a farm-scale biogas production system. Environmental Technology, Vol. 24. pp 1315-1321
- Knechtle N., (1997) Materialprofile von Holzerntesystemen – Analyse ausgewählter Beispiele als Grundlage für ein forsttechnisches Ökoinventar, ETH Zürich, Department für Wald- und Holzforschung, Diplomarbeit
- Koch, M., (2009). Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl, Dissertation Universität für Karlsruhe, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
- Kryvoruchko, V. (2004) Methanbildungspotential von Wirtschaftsdüngern aus der Rinderhaltung und der Wirkung der Abdeckung und anaeroben Behandlung auf klimarelevante Emissionen bei der Lagerung von Milchviehflüssigmist. 2004. Universität für Bodenkultur, Wien, Department für Nachhaltige Agrarsysteme, Institut für Landtechnik. 2004.
- Külling, D., Menzi, H., Neftel, K., Sutter, P., Lischer, P., and Kreuzer, M. (2001) Emission of ammonia, nitrous oxide and methane from different types of dairy manure during storage as affected by dietary protein content. Journal of Agricultural Science 137: 235-250.
- Laaber, M. (2006) Abgasmessungen Biogas-BHKW. Unveröffentlichte Arbeit.
- Laaber, M., Madlener, M., Brachtel, E., Kirchmayr, R. (2007) Aufbau eines Bewertungssystems für Biogasanlagen – „Gütesiegel Biogas“. Endbericht Energiesysteme der Zukunft
- LfL (2007) Klimabilanz von Biogasstrom. LfL-Information, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), August 2007
http://www.lfl.bayern.de/publikationen/daten/informationen/p_27453.pdf
- LfU (2001) Blockheizkraftwerke – Technik, Ökologie, Ökonomie, Landesamt für Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg, 1. Auflage, Karlsruhe 2001
- Mann, M.K., Spath, P.L. (1997) Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined Cycle Power System, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, USA

- Martínez-Blanco, J., Colón, J., Gabarrell, X., Font, X., Sánchez, A., Artola, A., Rieradevall, J. (2010) The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale; *Waste Management* 30 (2010) 983–994
- Matt, J. (2006) Emissionen aus Biogas-BHKW. Amt der Landesregierung - Umweltschutz. Unveröffentlichte Arbeit.
- Mörschner, J., Eltrop, L. (2003) Biomasse. In: Briem, S., Blesl, M., Fahl, U., Ohl, M., Moerschner, J., Eltrop, L., Voß, A., Viebahn, P., Krewitt, W., Gürzenich, D., Tryfonidou, R., Wagner, H.J., Corradini, R., Richter, S., (2003) Lebenszyklusanalysen ausgewählter, zukünftiger Stromerzeugungstechniken, Abschlussbericht gefördert durch das BMWA, Deutschland
- Nemecek, T. und Kägi, T. (2007) Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production Systems. Finale report ecoinvent V2.0 No. 15a. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station (ART), Swiss Center for Life Cycle Inventories, Zürich und Dübendorf, CH, www.ecoinvent.ch
- Olesen J.E., Weiske A., Asman W. A., Weisbjerg M.R., Djurhuus J., Schelde K., (2004) FarmGHG – A model for estimating greenhouse gas emissions from livestock farms, Documentation
- Ortenblad, H. (2000). The use of digested slurry within agriculture, Making energy and solving modern waste problems, Ortenblad H., Herning municipal utilities, Denmark
- Plöchl, M., Schultz, M. (2003) Ökologische Bewertung der Biogaserzeugung und –nutzung, Leitfaden Biogas 2003, Seite 40-43
- Pötsch, E. M. (2004) Nährstoffgehalt von Gärrückständen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen und deren Einsatz im Dauergrünland, Abschlussbericht
- Pré Consultants (2006) Introduction to LCA with Sima Pro 7, www.pre.nl
- Pucker, J., Jungmeier, G., Siegl, S., Pötsch, E.M., Stuhlbacher, A. Ebner-Ornig, F.J., Kirchmayr, R., Bochman, G. (2010) Ökobilanz Biogas – Erfolgsfaktoren zur nachhaltigen Nutzung der Biogastechnologie am Beispiel ausgewählter Biogasanlagen, Endbericht Energie der Zukunft, derzeit (11/2010) in Begutachtung
- Reindl, K. (2005) Ökologische und Ökonomische Bewertung relevanter Energiepflanzen zur Biogaserzeugung. 28-4-2005. FH-Wieselburg.
- Reinhold, G. (2009) Einfluss der Biogaserzeugung auf das Restgaspotential und Eigenschaften der Gärreste sowie die Anforderungen an Gärrestlager, Internationale Bio- und Deponiegas Fachtagung „Synergien nutzen und voneinander lernen III“, 28./29. April 2009, Weimar
- Resch R., Guggenberger T., Wiedner G., Kasal A., Wurm K., Gruber L., Ringdorfer F. und Buchgraber K. (2006). Futterwerttabellen 2006 für das Grundfutter im Alpenraum, HBLFA Raumberg Gumpenstein, Futtermittellabor Rosenau, Versuchszentrum Laimburg, Landwirtschaftskammer Steiermark
- Riezinger, A. (2008); Die Ermittlung der ökologischen Effizienz der Bereitstellungskette von Waldhackgut anhand ausgewählter Fallstudien, Universität für Bodenkultur, Diplomarbeit

- Rinaldi M und Stadler E (2002); Trends im Abgasverhalten landwirtschaftlicher Traktoren – Neue Modelle deutlich sauberer. FAT-Bericht Nr. 577. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon, Ettenhausen, Schweiz
- Rogge, S. (2003) Geothermische Stromerzeugung in Deutschland: Ökonomie, Ökologie, Potentiale, Dissertation Technische Universität Berlin, Fakultät VI Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften
- Ross, A., Fübekker, A., Seipelt, F., Steffens, G und Kowalwky, H. (1999) Quantifizierung der Freisetzung von klimarelevanten Gasen aus Güllebehältern mit und ohne Strohhäckselabdeckung. Berlin. UBA Texte.
- Schebek, L. (2006) Instrumente und Methoden zur Bewertung von Umweltwirkungen, Unterlagen zur Ringvorlesung: Nachhaltigkeit und Innovation - die Zukunft der Produktgestaltung
- Schimpl, M. (2001) Die Wirkung von Flüssigmistzusätzen auf die Emission der klima- und umweltrelevanten Gase Methan, Ammoniak, Lachgas und Kohlendioxid während der Lagerung von Rinderflüssigmist. Universität für Bodenkultur.
- Scholwin, F., Michel, J., Schröder, G., Kalies, M. (2006) Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Endbericht. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE) im Auftrag der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR)
- Schulz H. und Eder B. (2001); Biogas Praxis, Grundlagen-Planung-Anlagenbau-Beispiele; ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg; Deutschland; ISBN 3-922964-59-1; 165 Seiten
- Setterwall, C., Münter, M., Sarközi, P., Bodlund, B. (2004) ECLIPSE (Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for present and future Power systems in Europe, Methodological Guidelines. Final Report, January 2004
- SHL, Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (2010) Technische Parameter Modell Agrammon, <http://agrammon.ch>
- Skarka, J. (2007) Ökobilanzielle Abschätzung der Bereitstellung von Bioenergie. Strom und Wärme aus Gras-, Maissilage, Heu und Pappelhacksnitzeln. Diplomarbeit an der Universität Karlsruhe, Institut für Geographie und Geoökologie.
- Sommer, S.G. (1997) Ammonia volatilization from farm tanks containing anaerobically digested animal slurry. *Atmospheric Environment* 31: 863-868.
- Sommer, S.G. und Hutchings, N.J. (2001) Ammonia emission from field applied manure and its reduction--invited paper. *European Journal of Agronomy* 15.
- Sommer, S.G., Petersen, S.O. und Sogaard, H.T. (2000) Greenhouse gas emission from stored livestock slurry. *J Environ Qual* 29: 744-751.
- Sonesson, U; (1996); Modelling of the compost and transport processes in the ORWARE simulation model; Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering
- Spielmann, M., Dinkel, F., Schleiss, K. (2007) Biogas. In: Jungbluth, N., Chudacoff, M., Dauriat, A., Dinkel, F., Doka, G., Faist Emmenegger, M., Gnasounou, E., Kljun, N., Schleiss, K., Spielmann, M., Stettler, C., Sutter, J. (2007) Life Cycle Inventories of

- Bioenergy. Ecoinvent report No. 17, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH
- Stampfer, E.; Stampfer, K.; Trzesniowski, A.; (1997) Bereitstellung von Waldhackgut. Forschung im Verbund, Schriftenreihe Band 29. BOKU Wien, Institut für Forsttechnik, Hrsg.: Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, Wien
- Stampfer, K. (2001) Harvester Leistungsdaten - MHT Robin, Neuson 11002 HV, Impex Königstiger - Untersuchungsergebnisse aus Aufnahmen bei Geländeneigungen von 20 - 60%. FPP Kooperationsabkommen Forst-Platte-Papier, Wien
- Stampfer, K. (2002) Optimierung von Holzerntesystemen im Gebirge. Universität für Bodenkultur, Department für Wald- und Bodenwissenschaften (Habilitation)
- Stampfer, K., Limbeck-Lilienau, B., Kanzian, Ch., Viertler, K. (2003) Baumverfahren im Seilgelände - Verfahrensbeispiele ; Eigenverlag: FPP Kooperationsabkommen Forst-Platte-Papier, Wien
- STATISTIK AUSTRIA (2006), Energiestatistik: Energiebilanzen Österreich 1970 bis 2005. Erstellt am: 27.11.2006. - Aufgliederung nach der Struktur der Nutzenergieanalyse (NEA) 1998.
- Szanto, G. L., Hamelers, H.V.M., Rulkens, W.H., Veeken, A.H.M. (2007); NH₃, N₂O and CH₄ emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure; Bioresource Technology 98 (2007) 2659–2670
- Tragner, F., Lins, S., Hornbacher, D., Kryvoruchko, V., Konrad, G., Bomatter, A. (2008) Biogas-Branchenmonitor, Erhebung von Wirtschaftsdaten und Trends zu Biogas in Österreich. BMVIT, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 41/2008
- UBA (2009) Austria's National Inventory Report 2009, Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change
- UNECE (1999) Draft guidance documents on control techniques and economic instruments to the protocol to abate acidification, eutrophication and ground-level ozone. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). EB.AIR/1999/2, 98-102. 11-10-1999. Geneva, Switzerland, UNECE.
- Vogt, R., (2008). Basisdaten zu THG-Bilanzen für Biogas-Prozessketten und Erstellung neuer THG-Bilanzen, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
- Wagner-Alt, C. (2002) CH₄-, NH₃- und N₂O-Emissionen aus der Lagerung von Milchviehflüssigmist und Reduzierungsmöglichkeiten. Universität für Bodenkultur.
- Werner, B., Henze, C., Nagel, H. (1999): Critical loads für den Stickstoffeintrag In: Nagel & Gregor (Ed.): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical loads & levels, Springer Verlag, Berlin, ISBN 3-540-62418-x, Seite 81-110
- Werner F., Althaus H.-J., Künninger T., Richter K. und Jungbluth N. (2007) Life Cycle Inventories of Wood as Fuel and Construction Material. Final report Ecoinvent 2000 No. 9. EMPA Dübendorf, Swiss Center for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, www.ecoinvent.ch
- Woess-Gallasch, S., Enzinger, P., Jungmeier, G., Padinger, R. (2007) Treibhausgasemissionen aus Biogasanlagen. Institut für Energieforschung. Im Auftrag des Landesenergievereines Steiermark, Graz

- Wulf, S., Jager, P. und Döhler, H. (2005) Balancing of greenhouse gas emissions and economic efficiency for biogas-production through anaerobic co-fermentation of slurry with organic waste. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112: 178-185.
- Wulf, S., Maeting, M. und Clemens, J. (2002a) Application Technique and Slurry Co-Fermentation Effects on Ammonia, Nitrous Oxide, and Methane Emissions after Spreading: I. Ammonia Volatilization. *J Environ Qual* 31: 1789-1794.
- Wulf, S., Maeting, M. und Clemens, J. (2002b) Application Technique and Slurry Co-Fermentation Effects on Ammonia, Nitrous Oxide, and Methane Emissions after Spreading: II. Greenhouse Gas Emissions. *J Environ Qual* 31: 1795-1801.
- Zell, B. (2002) Emissionen von Biogasblockheizkraftwerken. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Veranst.) *Biogasanlagen – Anforderungen zur Luftreinhaltung*, 17-10-2002, Augsburg

7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierungskriterien für Biogasfermenter nach BayLfU 2004	12
Tabelle 2: Verwertungsmöglichkeiten von Biogas nach BayLfU 2004.....	12
Tabelle 3: Liste anerkannter Umweltprobleme nach Guinée et al. 2001	23
Tabelle 4: Charakterisationsfaktoren für die Erschöpfung abiotischer Ressourcen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001).....	33
Tabelle 5: Charakterisationsfaktoren für das Treibhauspotential verschiedener Gase (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001).....	33
Tabelle 6: Charakterisationsfaktoren für das Versauerungs- und Eutrophierungspotential verschiedener Substanzen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001).....	34
Tabelle 7: Charakterisationsfaktoren für das Photochemische Oxidantienbildungspotential verschiedener Substanzen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001).....	35
Tabelle 8: Charakterisationsfaktoren für das Ozonabbaupotential verschiedener Substanzen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001).....	35
Tabelle 9: Charakterisationsfaktoren für die Toxizitätspotentiale verschiedener Substanzen (unvollständiger Auszug aus Guinée et al. 2001).....	36
Tabelle 10: Beschreibung der verwendeten Inputparameter, sowie deren Quellen und die Verknüpfung mit der Ecoinvent-Datenbank für die Berechnung der Sachbilanz. Nicht alle Module sind für alle Anlagen relevant!	38
Tabelle 11: Anzahl und Art der Arbeitsprozesse für die Kultivierung der nachwachsenden Rohstoffe.....	43
Tabelle 12: Arbeitsprozesse bei der Hackschnitzelproduktion	44
Tabelle 13: Charakterisierung der verschiedenen Bereitstellungsketten zur Hackschnitzelproduktion.....	45
Tabelle 14: Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse der Bereitstellungsketten motormanuell Energieholz sowie vollmechanisiert Energieholz für alle Wirkungskategorien pro Srm.	46
Tabelle 15: Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse der Bereitstellungsketten motormanuell Schlagrücklass sowie vollmechanisiert Schlagrücklass für alle Wirkungskategorien pro Srm.	46
Tabelle 16: Wirkungsabschätzungs-Ergebnisse der Bereitstellungsketten motormanuell Rundholz sowie vollmechanisiert Rundholz für alle Wirkungskategorien pro Srm.....	46
Tabelle 17: Beispiele von Emissionen durch die Hackschnitzel-Verbrennung bzw. Vergasung	50
Tabelle 18: Emissionsfaktoren der Methanemissionen bei der Lagerung von unvergorenem Wirtschaftsdünger	53
Tabelle 19: Emissionsfaktoren für Ammoniakemissionen bei der Lagerung im offenen Endlager.....	55
Tabelle 20: Emissionsfaktoren für Lachgasemissionen bei der Lagerung.....	55
Tabelle 21: Einflussfaktoren auf die Ammoniakemissionen durch die Ausbringung der Gülle (nach Sommer und Hutchings 2001)	56
Tabelle 22: Emissionsfaktoren für Ammoniakemissionen bei der Ausbringung.....	57

Tabelle 23: Einfluss der Ausbringtechnik auf die NH ₃ -Emissionen (Referenz = Prallteller) ...	58
Tabelle 24: Zusammenfassung der verwendeten Emissionsfaktoren beim Gärrestmanagement	59
Tabelle 25: Durchschnittliche Menge an Baumaterialien für die Errichtung einer 100kW- und 500kW-Biogasanlage sowie eines 5000kW Hackschnitzel-Heizkraftwerks.	59
Tabelle 26: Emissionen bei der Kompostierung von organischen Abfällen (Literaturdaten, sowie darauf abgeleitete Emissionsfaktoren für die Berechnung in dieser Arbeit).	62
Tabelle 27: Wirkungspotentiale der Bereitstellung des österr. Wärmemixes 2005 sowie der einzelnen zugrundeliegenden Brennstoffe (pro kWh) für alle Wirkungskategorien.....	62
Tabelle 28: Betriebsparameter der untersuchten Anlagen des Biogas-Systems (Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung)	64
Tabelle 29: Emissionen der Lebenszyklusabschnitte des Biogas-Systems für alle Wirkungskategorien pro kWh _{el}	65
Tabelle 30: Emissionen der Referenznutzungen und Gutschriften des Biogas-Systems für alle Wirkungskategorien bezogen auf 1 kWh _{el}	68
Tabelle 31: Betriebsparameter der untersuchten Anlagen des Holz-Systems (Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung)	99
Tabelle 32: Emissionen der Lebenszyklusabschnitte des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien pro kWh _{el}	99
Tabelle 33: Emissionen der Referenznutzungen und Gutschriften des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien bezogen auf 1 kWh _{el}	101
Tabelle 34: Vergleich der Ergebnisse des Biogas-Systems mit den Ergebnissen von Scholwin et al. 2006	122
Tabelle 35: Vergleich der Ergebnisse des Biogas-Systems mit den Ergebnissen von Spielmann et al. 2007 (die Ergebnisse wurden auf die jeweilige Einheit pro kWh _{el} umgerechnet)	123
Tabelle 36: Vergleich der Ergebnisse des Biogas-Systems (adaptiert) mit den Ergebnissen von Kaltschmitt und Streicher 2009.	123
Tabelle 37: Vergleich der Ergebnisse des Biogas-Systems mit den Ergebnissen von Pucker et al. 2010 (die Ergebnisse wurden auf die jeweilige Einheit pro kWh _{el} umgerechnet).....	124
Tabelle 38: Vergleich der Ergebnisse des Holz-Systems mit den Ergebnissen von Jungmeier et al. 1998, Settlerwall et al. 2003 und Jungbluth et al. 2002 (die Ergebnisse wurden auf die jeweilige Einheit der Wirkungskategorie pro kWh _{el} umgerechnet).....	125
Tabelle 39: Vergleich der Ergebnisse des Holz-Systems (adaptiert) mit den Ergebnissen von Kaltschmitt und Streicher 2009	126
Tabelle 40: Vergleich der Gesamt-Emissionen sowie -ergebnisse (inkl. Gutschriften) des Biogas- und des Holz-Systems für alle Wirkungskategorien (Mittelwert aller Anlagen); + ... höhere Emissionen als das andere System; - ... geringere Emissionen; GS ... Gutschriften)	127
Tabelle 41: Ranking der verglichenen Stromerzeugungstechnologien für alle Wirkungskategorien so wie Gesamt.	137
Tabelle 42: Kenndaten sowie Detaillergebnisse des Biogas-Systems für die Wirkungskategorien ADP und GWP	170

Tabelle 43: Detailergebnisse des Biogas-Systems für die Wirkungskategorien AP, EP und POCP	173
Tabelle 44: Detailergebnisse für das Biogas-System für die Wirkungskategorien ODP, LUC und HTP	176
Tabelle 45: Detailergebnisse für das Biogas-System für die Wirkungskategorien TAETP, FAETP und MAETP	179
Tabelle 46: Kenndaten sowie Detailergebnisse des Holz-Systems für die Wirkungskategorien ADP, GWP, AP, EP, POCP und ODP	182
Tabelle 47: Detailergebnisse für das Holz-System für die Wirkungskategorien HTP, TAETP, FAETP, MAETP und LUC	183

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteile der verschiedenen Sparten erneuerbarer Energie an der Endenergie in Österreich 2008 (eigener Entwurf nach BMLFUW 2009).....	1
Abbildung 2: Entwicklung der anerkannten Ökostromanlagen (ohne Kleinwasserkraft) von 2002 bis 2009 (Stand jeweils 31.12.) (Energie-Control 2010).....	2
Abbildung 3: Durchschnittliche Einspeisetarife im Rahmen des Ökostromgesetzes in den Jahren 2003 – 2009 (Energie-Control 2010).....	4
Abbildung 4: Lebenszyklusabschnitte, die innerhalb des Lebensweges der betrachteten Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung berücksichtigt werden (wichtige Phasen für Brennstoff-basierende Technologien sind grün unterlegt, für Energieressourcenfluss-basierende Technologien blau unterlegt).....	5
Abbildung 5: Verfahren zur Energiegewinnung aus Biomasse.....	7
Abbildung 6: Schematische Darstellung des mehrstufigen anaeroben Abbaus (eigener Entwurf nach Bryant 1977, Braun 1982, BayLfU 2004).....	9
Abbildung 7: Für die Vergärung geeignete Biomasse-Substrate (eigener Entwurf nach Kaltschmitt und Streicher 2009).....	10
Abbildung 8: Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit Verwendung von Kosubstraten (Bios Bioenergiesysteme).....	11
Abbildung 9: Schematische Darstellung der thermo-chemischen Umwandlung (eigener Entwurf nach Kaltschmitt und Streicher 2009, Bauer 2007).....	13
Abbildung 10: Für die Verbrennung bzw. Vergasung geeignete Biomasse (eigener Entwurf nach FNR 2005a).....	14
Abbildung 11: Schema einer Verbrennungsanlage (Bios Bioenergiesysteme).....	14
Abbildung 12: Technologien zur Stromerzeugung in Verbrennungsanlagen.....	16
Abbildung 13: Schema einer Vergasungsanlage (Hofbauer et al. 2005).....	17
Abbildung 14: Phasen einer Ökobilanz nach ISO 14040	18
Abbildung 15: Einfluss des Allokationsverfahrens auf die Ergebnisse der Treibhausgas-emissionen für ein geothermales BHKW (Rogge 2003).....	20
Abbildung 16: Schema der Wirkungsabschätzung (eigener Entwurf nach Schebek 2006, Pré Consultants 2006, ISO 14040:2006).....	22
Abbildung 17: Allgemeine Darstellung der Eco-Indicator 99 – Wirkungsabschätzungsmethode. (Goedkoop & Spriensma 2000)	23
Abbildung 18: Darstellung des Biogas-Systems inklusive vorgelagerter Prozesse, Lebenszyklusabschnitte und Systemgrenze.....	31
Abbildung 19: Darstellung des Holz-Systems inklusive vorgelagerter Prozesse, Lebenszyklusabschnitte und Systemgrenze (Verbrennung und Vergasung sind im Lebenszyklusabschnitt Betrieb der Anlage getrennt dargestellt).....	32
Abbildung 20: a) Lastspektrum beim Arbeiten mit der Kreiselegge; b) Emissionsmodell für CO- (Kohlenmonoxid) Emissionen in Abhängigkeit von Leistung und Drehzahl (beides aus Rinaldi und Stadler 2002).....	42

Abbildung 21: „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ für die Produktion von 1 t OTS verschiedener, in Biogasanlagen verwendeter, Kulturarten (MIN ... Minimalbodenbearbeitung)	44
Abbildung 22: Abhängigkeit der CO-, Kohlenwasserstoff (HC)- und NO _x -Emissionen vom Luftverhältnis (λ) bei Verbrennungsmotoren. (Heck 2007)	48
Abbildung 23: CH ₄ - und NMVOC-Emissionen von Zündstrahl-BHKW in Abhängigkeit von der CH ₄ -Konzentration im Biogas (eigene Darstellung nach Zell, 2002)	49
Abbildung 24: Produktion von NO und N ₂ O durch „Lecks“ in den Prozessen der Nitrifikation und Denitrifikation (Guderian 2000)	51
Abbildung 25: oTS-Abbau in zweistufigen Biogasanlagen in Abhängigkeit von HRT	52
Abbildung 26: Einflussfaktoren auf die Ammoniak-Emissionen während der Gärrest Lagerung (eigene Darstellung nach Amon 2008)	54
Abbildung 27: Ausbringung von Gülle/Gärrest: a) Breitverteilung mittels Prallteller (Foto: K. Buchgraber); b) Schleppschlauchtechnik (Foto: E.M. Pötsch)	58
Abbildung 28: Verlauf der Konzentrationen von NH ₃ , N ₂ O und CH ₄ in Relation zu CO ₂ bei der Kompostierung von Stallmist (Daten aus Hellebrand und Kalk 2000 zitiert in BMLFUW 2005).	60
Abbildung 29: Zusammensetzung der verschiedenen Wirkungspotentiale des österr. Wärmemixes 2005 nach Brennstoffen	63
Abbildung 30: Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des „Biogas-Systems“ an den gesamten Emissionen in allen Wirkungskategorien	66
Abbildung 31: Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des „Biogas-Systems“ an den gesamten Gutschriften/Referenznutzungen in allen Wirkungskategorien.	69
Abbildung 32: Detailergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie Verbrauch abiotischer Ressourcen für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	71
Abbildung 33: Detailergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie Treibhauspotential für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen	73
Abbildung 34: Anteil einzelner Substanzen an den Gesamtemissionen des Biogas-Systems bzw. der Referenznutzung organischer Abfälle für die Wirkungskategorie GWP.	74
Abbildung 35: Detailergebnisse des Biogas-Systems in den Wirkungskategorien Versauerung und Eutrophierung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	77
Abbildung 36: Anteil verschiedener Substanzen an den Gesamtemissionen des Biogas-Systems bzw. an den Emissionen der Referenznutzung organische Reststoffe für die Wirkungskategorien AP bzw. EP.	78
Abbildung 37: Detailergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie photochemisches Oxidantienbildungspotential für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	79

Abbildung 38: Abhängigkeit des POCP des BHKWs vom elektrischen Wirkungsgrad	80
Abbildung 39: Detailergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie Ozonabbau für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	81
Abbildung 40: Detailergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorie Landnutzung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	82
Abbildung 41: Detailergebnisse des Biogas-Systems in der Wirkungskategorien Humantoxizität und terrestrische Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	84
Abbildung 42: Detailergebnisse des Biogas-Systems in den Wirkungskategorien Süßwasser- und Salzwasser-Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	85
Abbildung 43: Gesamtergebnisse des Biogas-Systems für die Wirkungskategorien GWP, ADP, AP, EP, POCP und ODP	87
Abbildung 44: Gesamtergebnisse des Biogas-Systems für die Wirkungskategorien LUC, HTP, FAETP, MAETP und TAETP.	88
Abbildung 45: Sensitivitätsanalyse BHKW	89
Abbildung 46: Sensitivitätsanalyse Gärrestlagerung und -ausbringung	91
Abbildung 47: Sensitivitätsanalyse: GWP des Biogassystems inklusive indirekter N ₂ O-Emissionen.....	91
Abbildung 48: Sensitivitätsanalyse: Referenznutzung Wirtschaftsdünger	92
Abbildung 49: Sensitivitätsanalyse: Referenznutzung organische Abfälle.....	93
Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse: GWP der Referenznutzungen / Gutschriften inklusive indirekter N ₂ O-Emissionen	93
Abbildung 51: Sensitivitätsanalyse: Einfluss verschiedener Wärmebereitstellungstechnologien auf das Gesamtergebnis der Referenznutzungen/Gutschriften für das Biogas-System.	94
Abbildung 52: Verbesserungspotentiale des Biogas-Systems	96
Abbildung 53: Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte des „Holz-Systems“ an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften in allen Wirkungskategorien.....	100
Abbildung 54: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Verbrauch abiotischer Ressourcen für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	102
Abbildung 55: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Treibhauspotential für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	103

Abbildung 56: Anteil einzelner Substanzen an den Gesamtemissionen des Holz-Systems für die Wirkungskategorien GWP und AP.	104
Abbildung 57: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Versauerung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	104
Abbildung 58: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Eutrophierung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	105
Abbildung 59: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie photochemische Oxidantienbildung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	106
Abbildung 60: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Ozonabbau für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	106
Abbildung 61: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Landnutzung für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	107
Abbildung 62: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Humantoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	108
Abbildung 63: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie terrestrische Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	108
Abbildung 64: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Süßwasser-Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	109
Abbildung 65: Detailergebnisse des Holz-Systems in der Wirkungskategorie Salzwasser-Ökotoxizität für alle Anlagen sowie die Anteile der verschiedenen Lebenszyklusabschnitte an den gesamten Emissionen bzw. Gutschriften/Referenznutzungen für den Mittelwert aller Anlagen.	110
Abbildung 66: Gesamtergebnisse des Holz-Systems für die Wirkungskategorien GWP, ADP, AP, EP, POCP und ODP.	111
Abbildung 67: Gesamtergebnisse des Holz-Systems für die Wirkungskategorien LUC sowie die Toxizitätspotentiale.	112
Abbildung 68: Sensitivitätsanalyse: Produktivität bei der Produktion der NAWAROs.	113
Abbildung 69: Sensitivitätsanalyse: Emissionen durch die Verbrennung.	114
Abbildung 70: Sensitivitätsanalyse: Wassergehalt der transportierten Biomasse.	115
Abbildung 71: Sensitivitätsanalyse: GWP des Holz-Systems inklusive indirekter N ₂ O-Emissionen.	115

Abbildung 72: Sensitivitätsanalyse: Einfluss verschiedener Wärmebereitstellungssysteme auf das Gesamtergebnis der Referenznutzungen/Gutschriften für das Holz-System.....	116
Abbildung 73: Verbesserungspotential: erweiterte Abgasreinigung	118
Abbildung 74: Einfluss der Unsicherheit der berechneten Emissionsfaktoren für die BHKW-Emissionen, die Lagerung und Ausbringung des Gärrestes bzw. der Wirtschaftsdünger sowie für die Kompostierung	131
Abbildung 75: Vergleich der Umweltauswirkungen verschiedener Stromerzeugungstechnologien in den Wirkungskategorien ADP, GWP, AP, EP, POCP und ODP.....	134
Abbildung 76: Vergleich der Umweltauswirkungen verschiedener Stromerzeugungstechnologien in den Wirkungskategorien HTP, TAETP, FAETP, MAETP und LUC.	135
Abbildung 77: CO ₂ -Reduktionskosten nach Angaben aus dem Ökostrombericht 2010 und Berechnungen aus den Ergebnissen dieser Arbeit.....	139
Abbildung 78: Systemgrenzen für die Lebenszyklusanalyse der bio-chemischen bzw. thermo-chemischen Umwandlung von Biomasse zur Stromproduktion. Darstellung der Lebenszyklusabschnitte der Biomasse-Systeme sowie der Gutschriften und Referenzsysteme.	144
Abbildung 79: Gesamtergebnisse (Mittelwerte) für das Biogas- und das Holz-System sowie den österreichischen Stromproduktionsmix für die Wirkungskategorien ADP, GWP, AP, EP, POCP und ODP	145
Abbildung 80: Gesamtergebnisse (Mittelwerte) für das Biogas- und das Holz-System sowie den österreichischen Stromproduktionsmix für die Wirkungskategorien LUC, HTP, TAETP, FAETP und MAETP	146
Abbildung 81: Zusammensetzung des Treibhaus- und Versauerungspotentials für das Biogas- und das Holz-System.	149

9. Anhang

Tabelle 42: Kenndaten sowie Detailergebnisse des Biogas-Systems für die Wirkungskategorien ADP und GWP

Kenndaten	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Substrate [t/a]	9582	12904	2748	6570	3301	3968	3394	5839	10644	9931	6930	20000	3330
Anteil NAWAROs [%]	72	24	69	61	37	0	49	69	42	86	26	5	50
Anteil WD [%]	14	57	31	39	58	35	43	31	52	14	62	0	50
Anteil AF [%]	0	19	0	0	5	65	7	0	6	0	12	95	0
Pinst [kW _{el}]	500	500	99	236	100	202	100	220	500	500	220	1672	99
Nettostromprod. [MWh/a]	3220	3637	791	1740	640	1017	695	1697	3904	4079	1600	6399	697
ADP [kg Sb-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	1,87E-04	9,35E-05	2,04E-04	2,45E-04	4,09E-04	0,00E+00	2,16E-04	1,56E-04	1,48E-04	2,37E-04	1,96E-04	1,65E-05	1,86E-04
Transport	1,25E-04	1,39E-04	7,59E-06	9,74E-06	3,27E-05	1,07E-04	2,28E-05	9,98E-06	9,93E-05	2,64E-05	5,45E-05	5,03E-04	1,79E-04
Infrastruktur	1,28E-04	1,06E-04	1,82E-04	1,12E-04	2,26E-04	1,39E-04	2,08E-04	1,42E-04	8,52E-05	9,93E-05	1,63E-04	2,23E-04	2,06E-04
Betrieb BGA	3,59E-05	2,55E-05	3,12E-05	4,33E-05	1,05E-04	0,00E+00	5,40E-05	3,91E-05	2,56E-05	3,81E-05	3,98E-05	1,29E-05	2,15E-04
BHKW	8,80E-06	1,67E-05	2,27E-05	2,56E-05	2,31E-05	1,56E-05	1,08E-05	1,52E-05	2,43E-05	1,08E-05	1,74E-05	2,53E-05	3,60E-05
GR Lagerung	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
GR Ausbringung	5,39E-05	7,31E-05	3,22E-05	4,74E-05	5,03E-05	5,41E-05	6,15E-05	3,63E-05	2,64E-05	4,44E-05	4,67E-05	7,45E-05	1,01E-04
REF NAWAROS	-1,51E-04	-7,57E-05	-2,46E-04	-2,94E-04	-3,34E-04	0,00E+00	-1,78E-04	-1,70E-04	-1,42E-04	-3,42E-04	-1,03E-04	-1,33E-05	-1,51E-04
REF WD	-8,84E-06	-5,08E-05	-1,28E-05	-1,16E-05	-2,17E-05	-2,84E-05	-3,10E-05	-1,36E-05	-1,81E-05	-7,05E-06	-5,03E-05	0,00E+00	-7,47E-05
REF AF	-7,63E-05	-1,21E-04	0,00E+00	0,00E+00	-4,21E-05	-6,03E-04	-6,56E-05	0,00E+00	-3,10E-05	0,00E+00	-8,98E-05	-5,33E-04	0,00E+00
GS Wärme	-1,44E-04	-8,93E-04	-9,24E-04	-1,36E-04	-7,23E-04	-7,58E-04	-3,01E-04	-1,91E-04	-8,32E-04	-7,21E-05	0,00E+00	0,00E+00	-2,62E-04
GS Dünger	-3,59E-04	-2,15E-04	-2,56E-04	-1,36E-04	4,02E-05	2,86E-04	-1,47E-04	-1,84E-04	6,12E-05	-1,63E-04	4,44E-05	-1,03E-04	-2,33E-04
Differenz	-2,00E-04	-9,02E-04	-9,59E-04	-9,38E-05	-2,36E-04	-7,88E-04	-1,49E-04	-1,60E-04	-5,53E-04	-1,28E-04	3,19E-04	2,06E-04	2,00E-04
GWP [kg CO ₂ -eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	0,0275	0,0138	0,0295	0,0365	0,0596	0,0000	0,0315	0,0228	0,0223	0,0343	0,0564	0,0024	0,0274
Transport	0,0178	0,0199	0,0011	0,0014	0,0047	0,0154	0,0032	0,0014	0,0140	0,0037	0,0078	0,0721	0,0255
Infrastruktur	0,0236	0,0180	0,0317	0,0209	0,0397	0,0241	0,0365	0,0249	0,0156	0,0198	0,0281	0,0314	0,0356
Betrieb BGA	0,0050	0,0037	0,0044	0,0062	0,0149	0,0000	0,0078	0,0056	0,0036	0,0055	0,0057	0,0020	0,0244
BHKW	0,0899	0,0641	0,0842	0,1013	0,0916	0,0956	0,0921	0,0922	0,0839	0,0821	0,0817	0,0500	0,1019
GR Lagerung	0,0450	0,0588	0,0016	0,0176	0,0000	0,0531	0,0011	0,0595	0,0371	0,0360	0,0346	0,0000	0,0120
GR Ausbringung	0,1016	0,1125	0,0825	0,0812	0,0816	0,0820	0,0947	0,0513	0,0843	0,0490	0,1054	0,1413	0,1362
REF NAWAROS	-0,0222	-0,0112	-0,0667	-0,0872	-0,0485	0,0000	-0,0269	-0,0271	-0,0296	-0,1070	-0,0162	-0,0019	-0,0223
REF WD	-0,0259	-0,1135	-0,0728	-0,0876	-0,1673	-0,0991	-0,1156	-0,0589	-0,0819	-0,0188	-0,2313	0,0000	-0,1812
REF AF	-0,0472	-0,1702	0,0067	0,0000	-0,1502	-1,8265	-0,0366	0,0000	-0,0321	0,0000	-0,1790	-1,1139	0,0000
GS Wärme	-0,0200	-0,1245	-0,1288	-0,0190	-0,1008	-0,1057	-0,0420	-0,0267	-0,1160	-0,0100	0,0000	0,0000	-0,0365
GS Dünger	-0,1889	-0,1129	-0,1348	-0,0716	0,0211	0,1503	-0,0772	-0,0966	0,0322	-0,0859	0,0234	-0,0540	-0,1224
Differenz	0,0061	-0,2414	-0,1612	-0,0003	-0,1537	-1,6107	-0,0314	0,0483	0,0334	0,0087	-0,0833	-0,8707	0,0005

Tabelle 42 (Fortsetzung)

Kenndaten	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Substrate [t/a]	3495	5683	1124	2028	11164	13488	21490	10703	11900	4825	6568	3754	1920
Anteil NAWAROs [%]	47	28	57	0	51	55	47	83	10	74	13	13	12
Anteil WD [%]	53	45	0	55	49	45	44	17	66	26	37	32	43
Anteil AF [%]	0	27	43	45	0	0	9	0	24	0	50	56	45
Pinst [kW _{el}]	99	200	100	18	500	500	1000	500	920	489	125	99	48
Nettostromprod. [MWh/a]	695	1300	658	124	3953	3837	7760	3636	4061	1797	875	511	132
ADP [kg Sb-eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	2,18E-04	1,12E-04	1,45E-04	0,00E+00	1,52E-04	2,12E-04	9,55E-05	3,81E-04	6,03E-05	1,87E-04	1,16E-04	8,01E-05	1,95E-04
Transport	1,66E-05	5,95E-04	3,10E-05	1,52E-04	2,25E-05	2,50E-05	2,43E-05	2,57E-05	8,75E-05	1,68E-05	1,72E-03	5,31E-06	6,83E-05
Infrastruktur	2,05E-04	1,22E-04	2,19E-04	2,19E-04	1,02E-04	1,06E-04	1,12E-04	1,14E-04	1,39E-04	2,17E-04	1,65E-04	2,83E-04	1,05E-03
Betrieb BGA	5,07E-05	4,07E-05	5,94E-05	0,00E+00	5,65E-06	4,02E-05	2,87E-05	2,50E-05	7,73E-06	4,71E-05	2,17E-05	1,59E-04	8,80E-05
BHKW	2,29E-05	1,30E-05	3,06E-05	2,49E-05	2,07E-05	1,23E-05	2,03E-05	2,25E-05	1,60E-05	2,81E-05	2,61E-05	1,58E-05	3,19E-05
GR Lagerung	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
GR Ausbringung	9,23E-05	7,18E-05	8,68E-06	1,81E-04	6,62E-05	4,72E-05	2,88E-05	4,87E-05	5,68E-05	4,55E-05	9,04E-05	9,56E-05	2,16E-04
REF NAWAROS	-1,60E-04	-9,02E-05	-1,89E-04	0,00E+00	-1,23E-04	-1,71E-04	-1,42E-04	-5,20E-04	-4,89E-05	-1,51E-04	-7,09E-05	-6,48E-05	-1,57E-04
REF WD	-6,34E-05	-7,03E-05	0,00E+00	-1,03E-04	-4,09E-05	-2,67E-05	-1,55E-05	-8,85E-06	-3,68E-05	-2,06E-05	-4,25E-05	-2,70E-05	-8,91E-05
REF AF	0,00E+00	-2,21E-04	-1,31E-04	-2,65E-04	0,00E+00	0,00E+00	-4,63E-05	0,00E+00	-1,27E-04	0,00E+00	-6,74E-04	-7,38E-04	-1,21E-03
GS Wärme	-2,34E-04	-1,77E-03	-2,18E-03	-1,94E-03	-1,73E-04	-6,35E-05	-1,26E-03	-6,70E-04	-1,20E-03	-8,13E-04	-1,51E-03	-1,84E-03	-1,74E-03
GS Dünger	-1,11E-04	-8,51E-05	5,03E-05	-2,17E-04	-1,53E-04	-1,03E-04	-1,63E-04	-2,15E-04	2,60E-05	-4,15E-04	1,34E-04	-4,47E-04	-4,88E-04
Differenz	3,65E-05	-1,29E-03	-1,96E-03	-1,95E-03	-1,20E-04	7,85E-05	-1,31E-03	-7,98E-04	-1,02E-03	-8,58E-04	-1,62E-05	-2,48E-03	-2,03E-03
GWP [kg CO ₂ -eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	0,0322	0,0161	0,0206	0,0000	0,0225	0,0311	0,0317	0,0557	0,0090	0,0275	0,0207	0,0117	0,0277
Transport	0,0023	0,0851	0,0044	0,0217	0,0032	0,0035	0,0034	0,0036	0,0125	0,0024	0,2472	0,0007	0,0098
Infrastruktur	0,0367	0,0243	0,0381	0,0368	0,0204	0,0210	0,0155	0,0209	0,0207	0,0372	0,0290	0,0497	0,1617
Betrieb BGA	0,0073	0,0059	0,0090	0,0000	0,0007	0,0058	0,0042	0,0038	0,0012	0,0069	0,0031	0,0238	0,0129
BHKW	0,0940	0,0609	0,1078	0,0822	0,0918	0,0239	0,0749	0,0799	0,0775	0,0957	0,0954	0,0827	0,1004
GR Lagerung	0,0146	0,0916	0,0156	0,1587	0,0000	0,0527	0,0211	0,0473	0,0711	0,0000	0,0585	0,1596	0,1564
GR Ausbringung	0,1411	0,0861	0,0387	0,4033	0,1342	0,0610	0,0501	0,1218	0,0786	0,0675	0,1630	0,2144	0,4306
REF NAWAROS	-0,0238	-0,0133	-0,0571	0,0000	-0,0182	-0,0250	-0,0210	-0,1569	-0,0073	-0,0222	-0,0103	-0,0095	-0,0223
REF WD	-0,2343	-0,1274	0,0000	-0,6242	-0,0887	-0,0987	-0,0740	-0,0298	-0,1140	-0,0844	-0,2106	-0,0999	-0,4793
REF AF	0,0000	-0,1989	-0,7038	-0,1358	0,0000	0,0000	-0,3082	0,0000	-0,4708	0,0000	-0,8671	-0,6501	-1,4952
GS Wärme	-0,0326	-0,2473	-0,3045	-0,2711	-0,0241	-0,0089	-0,1751	-0,0934	-0,1673	-0,1134	-0,2101	-0,2570	-0,2423
GS Dünger	-0,0585	-0,0447	0,0265	-0,1144	-0,0805	-0,0540	-0,0860	-0,1132	0,0137	-0,2182	0,0707	-0,2350	-0,2566
Differenz	-0,0210	-0,2615	-0,8047	-0,4427	0,0613	0,0125	-0,4633	-0,0604	-0,4752	-0,2011	-0,6105	-0,7089	-1,5963

Tabelle 42 (Fortsetzung)

Kenndaten	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Substrate [t/a]	5361	1514	2099	3318	13579	300	3285	2800	3108	9978	3246	15864	1898	2785	10585
Anteil NAWAROs [%]	17	0	29	61	27	0	10	71	39	100	32	0	22	24	100
Anteil WD [%]	81	12	14	39	67	0	87	29	44	0	37	77	75	47	0
Anteil AF [%]	2	88	57	0	5	100	3	0	18	0	31	23	3	29	0
Pinst [kW _{el}]	99	190	99	100	392	45	36	320	100	500	100	200	40	55	500
Nettostromprod. [MWh/a]	580	548	564	660	2400	158	169	887	665	4100	775	1107	218	458	3902
ADP [kg Sb-eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	2,11E-04	0,00E+00	8,22E-05	2,28E-04	2,11E-04	0,00E+00	2,73E-04	2,93E-04	2,08E-04	2,40E-04	1,39E-04	0,00E+00	1,94E-04	1,98E-04	2,76E-04
Transport	1,16E-05	8,47E-04	1,58E-03	2,66E-05	3,58E-05	1,40E-05	2,25E-06	4,83E-05	2,27E-04	2,57E-05	1,01E-04	1,95E-04	2,15E-06	8,68E-05	2,92E-05
Infrastruktur	2,50E-04	2,67E-04	2,57E-04	2,21E-04	1,50E-04	9,64E-04	5,97E-04	2,18E-04	2,18E-04	9,30E-05	1,88E-04	1,77E-04	4,81E-04	3,14E-04	1,20E-04
Betrieb BGA	7,27E-05	0,00E+00	3,91E-06	8,45E-05	7,01E-05	6,15E-05	1,18E-04	4,96E-05	1,38E-04	2,17E-05	4,39E-05	1,33E-05	7,26E-05	3,91E-05	2,59E-05
BHKW	2,70E-05	1,02E-05	2,45E-05	4,16E-05	7,33E-06	3,67E-05	4,39E-03	2,54E-05	3,29E-05	6,06E-06	1,25E-05	7,81E-04	3,52E-05	4,82E-04	8,35E-06
GR Lagerung	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
GR Ausbringung	1,15E-04	4,40E-05	3,69E-05	7,28E-05	9,78E-05	1,25E-04	1,76E-04	4,62E-05	5,08E-05	3,51E-05	3,76E-05	2,54E-04	8,27E-05	5,74E-05	4,41E-05
REF NAWAROS	-1,07E-04	0,00E+00	-6,67E-05	-1,85E-04	-1,23E-04	0,00E+00	-2,20E-04	-2,93E-04	-1,64E-04	-3,48E-04	-9,29E-05	0,00E+00	-1,54E-04	-1,30E-04	-3,60E-04
REF WD	-1,10E-04	-4,74E-06	-3,63E-05	-2,78E-05	-1,31E-04	0,00E+00	-1,57E-04	-1,52E-05	-2,47E-05	0,00E+00	-1,73E-05	-1,98E-04	-1,06E-04	-2,99E-05	0,00E+00
REF AF	-3,25E-05	-4,38E-04	-3,82E-04	0,00E+00	-5,46E-05	-3,40E-04	-1,05E-04	0,00E+00	-1,49E-04	0,00E+00	-2,32E-04	-3,76E-04	-3,96E-05	-3,18E-04	0,00E+00
GS Wärme	-1,29E-03	-2,11E-03	-2,88E-04	0,00E+00	-1,02E-03	-2,98E-03	-2,53E-03	-8,70E-04	-2,19E-04	-6,47E-04	-1,58E-04	-2,06E-04	-1,58E-03	-5,32E-04	-9,37E-05
GS Dünger	1,90E-04	-1,45E-04	-4,54E-05	-4,27E-04	-9,24E-06	1,46E-04	2,06E-04	-2,70E-04	-1,82E-04	-2,00E-04	-8,88E-05	1,29E-04	6,43E-06	-6,86E-05	-2,03E-04
Differenz	-6,61E-04	-1,53E-03	1,17E-03	3,44E-05	-7,60E-04	-1,98E-03	2,75E-03	-7,68E-04	1,36E-04	-7,74E-04	-6,57E-05	7,68E-04	-1,01E-03	9,88E-05	-1,53E-04
GWP [kg CO ₂ -eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	0,0444	0,0000	0,0121	0,0339	0,0458	0,0000	0,0374	0,0731	0,0338	0,0405	0,0244	0,0000	0,0287	0,0353	0,0399
Transport	0,0016	0,1213	0,2269	0,0037	0,0050	0,0020	0,0003	0,0068	0,0325	0,0036	0,0145	0,0280	0,0003	0,0122	0,0041
Infrastruktur	0,0438	0,0446	0,0450	0,0390	0,0312	0,1467	0,0976	0,0363	0,0382	0,0142	0,0332	0,0329	0,0884	0,0558	0,0227
Betrieb BGA	0,0107	0,0000	0,0006	0,0123	0,0097	0,0094	0,0176	0,0069	0,0209	0,0031	0,0064	0,0020	0,0106	0,0053	0,0035
BHKW	0,1011	0,0611	0,0836	0,0935	0,1003	0,1252	0,2269	0,0804	0,0985	0,0301	0,0857	0,0811	0,1039	0,0876	0,0783
GR Lagerung	0,1313	0,0000	0,0466	0,0777	0,0830	0,0000	0,0216	0,0070	0,0162	0,0532	0,0021	0,0833	0,0000	0,0540	0,0350
GR Ausbringung	0,2465	0,1103	0,0603	0,1453	0,1584	0,1053	0,3380	0,0831	0,1585	0,0997	0,0907	0,1901	0,1790	0,0877	0,0501
REF NAWAROS	-0,0156	0,0000	-0,0098	-0,0275	-0,0180	0,0000	-0,0301	-0,0886	-0,0237	-0,1141	-0,0135	0,0000	-0,0219	-0,0190	-0,1040
REF WD	-0,5019	-0,0187	-0,0397	-0,1058	-0,2746	0,0000	-1,1549	-0,0629	-0,1454	0,0000	-0,1753	-0,7154	-0,4547	-0,1907	0,0000
REF AF	-0,1746	-0,8859	-0,3642	0,0000	-0,2934	-1,7348	-0,3565	0,0000	-0,6332	0,0000	-0,3570	-1,4813	-0,0441	-0,0972	0,0000
GS Wärme	-0,1796	-0,2941	-0,0401	0,0000	-0,1415	-0,4159	-0,3525	-0,1213	-0,0305	-0,0901	-0,0220	-0,0287	-0,2209	-0,0742	-0,0131
GS Dünger	0,0998	-0,0764	-0,0239	-0,2246	-0,0049	0,0770	0,1083	-0,1421	-0,0958	-0,1051	-0,0467	0,0677	0,0034	-0,0361	-0,1070
Differenz	-0,1923	-0,9378	-0,0026	0,0474	-0,2990	-1,6853	-1,0463	-0,1212	-0,5300	-0,0649	-0,3574	-1,7403	-0,3272	-0,0792	0,0095

Tabelle 43: Detailergebnisse des Biogas-Systems für die Wirkungskategorien AP, EP und POCP

AP [kg SO ₂ -eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	2,07E-04	1,07E-04	2,13E-04	2,73E-04	4,49E-04	0,00E+00	2,29E-04	1,60E-04	1,78E-04	2,47E-04	3,48E-04	1,71E-05	2,12E-04
Transport	1,18E-04	1,31E-04	7,30E-06	9,36E-06	3,10E-05	1,01E-04	2,20E-05	9,60E-06	9,50E-05	2,54E-05	5,13E-05	4,73E-04	1,69E-04
Infrastruktur	8,45E-05	6,97E-05	2,11E-04	1,17E-04	2,60E-04	1,61E-04	2,40E-04	8,69E-05	5,33E-05	6,64E-05	2,00E-04	1,42E-04	2,37E-04
Betrieb BGA	5,05E-05	3,75E-05	4,42E-05	6,27E-05	1,50E-04	0,00E+00	7,85E-05	5,58E-05	3,64E-05	5,49E-05	5,74E-05	1,97E-05	2,23E-04
BHKW	8,36E-04	8,25E-04	1,90E-03	1,44E-03	1,12E-03	1,36E-03	1,18E-03	1,28E-03	8,42E-04	7,98E-04	1,31E-03	7,51E-04	2,67E-03
GR Lagerung	8,53E-04	4,98E-04	4,70E-05	2,20E-04	0,00E+00	1,03E-03	2,28E-05	6,54E-04	3,11E-04	6,72E-04	5,24E-04	0,00E+00	4,08E-04
GR Ausbringung	4,38E-03	5,49E-03	4,30E-03	2,80E-03	2,58E-03	2,63E-03	2,48E-03	1,66E-03	3,89E-03	1,85E-03	4,00E-03	1,63E-03	4,94E-03
REF NAWAROS	-1,67E-04	-8,63E-05	-4,07E-04	-5,28E-04	-3,65E-04	0,00E+00	-1,93E-04	-1,87E-04	-2,07E-04	-6,34E-04	-1,21E-04	-1,38E-05	-1,72E-04
REF WD	-9,33E-04	-4,03E-03	-1,48E-03	-2,43E-03	-3,91E-03	-3,59E-03	-4,20E-03	-2,15E-03	-3,09E-03	-6,73E-04	-1,44E-02	0,00E+00	-2,36E-03
REF AF	-4,76E-04	-2,17E-03	0,00E+00	0,00E+00	-2,28E-03	-2,75E-02	-3,90E-04	0,00E+00	-4,06E-04	0,00E+00	-2,65E-03	-1,62E-02	0,00E+00
GS Wärme	-5,54E-05	-3,44E-04	-3,56E-04	-5,24E-05	-2,79E-04	-2,92E-04	-1,16E-04	-7,37E-05	-3,20E-04	-2,78E-05	0,00E+00	0,00E+00	-1,01E-04
GS Dünger	-1,04E-03	-6,18E-04	-7,38E-04	-3,93E-04	1,16E-04	8,24E-04	-4,23E-04	-5,30E-04	1,76E-04	-4,71E-04	1,28E-04	-2,96E-04	-6,70E-04
Differenz	3,86E-03	-9,95E-05	3,74E-03	1,52E-03	-2,13E-03	-2,53E-02	-1,07E-03	9,63E-04	1,56E-03	1,91E-03	-1,06E-02	-1,35E-02	5,55E-03
EP [kg PO ₄ -eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	5,28E-05	2,74E-05	5,05E-05	6,69E-05	9,85E-05	0,00E+00	5,37E-05	4,34E-05	5,07E-05	5,96E-05	7,55E-05	3,81E-06	4,64E-05
Transport	1,89E-05	2,10E-05	1,15E-06	1,48E-06	4,96E-06	1,62E-05	3,47E-06	1,52E-06	1,51E-05	4,02E-06	8,25E-06	7,62E-05	2,71E-05
Infrastruktur	1,17E-05	9,31E-06	1,40E-05	9,50E-06	1,73E-05	1,05E-05	1,59E-05	1,12E-05	6,76E-06	9,26E-06	1,26E-05	1,62E-05	1,56E-05
Betrieb BGA	8,21E-06	6,22E-06	7,21E-06	1,03E-05	2,45E-05	0,00E+00	1,29E-05	9,13E-06	5,94E-06	9,02E-06	9,44E-06	3,32E-06	3,21E-05
BHKW	1,37E-04	1,37E-04	3,49E-04	2,45E-04	1,92E-04	2,37E-04	2,04E-04	2,24E-04	1,40E-04	1,31E-04	2,26E-04	1,25E-04	4,77E-04
GR Lagerung	1,59E-04	9,27E-05	8,76E-06	4,09E-05	0,00E+00	1,91E-04	4,24E-06	1,22E-04	5,80E-05	1,25E-04	9,75E-05	0,00E+00	7,59E-05
GR Ausbringung	8,15E-04	1,02E-03	7,99E-04	5,19E-04	4,79E-04	4,89E-04	4,61E-04	3,08E-04	7,24E-04	3,43E-04	7,44E-04	3,02E-04	9,17E-04
REF NAWAROS	-4,25E-05	-2,21E-05	-8,32E-05	-1,10E-04	-7,94E-05	0,00E+00	-4,47E-05	-5,63E-05	-5,23E-05	-1,27E-04	-3,18E-05	-3,07E-06	-3,76E-05
REF WD	-1,74E-04	-7,50E-04	-2,74E-04	-4,52E-04	-7,27E-04	-6,67E-04	-7,81E-04	-4,00E-04	-5,75E-04	-1,25E-04	-2,69E-03	0,00E+00	-4,38E-04
REF AF	-8,64E-05	-4,01E-04	0,00E+00	0,00E+00	-4,23E-04	-5,10E-03	-7,08E-05	0,00E+00	-7,48E-05	0,00E+00	-4,90E-04	-3,01E-03	0,00E+00
GS Wärme	-6,30E-06	-3,92E-05	-4,05E-05	-5,97E-06	-3,17E-05	-3,32E-05	-1,32E-05	-8,39E-06	-3,65E-05	-3,16E-06	0,00E+00	0,00E+00	-1,15E-05
GS Dünger	-1,88E-04	-1,12E-04	-1,34E-04	-7,12E-05	2,10E-05	1,49E-04	-7,67E-05	-9,60E-05	3,20E-05	-8,54E-05	2,32E-05	-5,36E-05	-1,22E-04
Differenz	7,05E-04	-1,01E-05	6,98E-04	2,54E-04	-4,25E-04	-4,71E-03	-2,31E-04	1,59E-04	2,94E-04	3,41E-04	-2,01E-03	-2,54E-03	9,83E-04
POCP [kg C ₂ H ₄ -eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	5,60E-06	2,78E-06	6,19E-06	7,48E-06	1,25E-05	0,00E+00	6,54E-06	4,78E-06	4,44E-06	7,18E-06	4,95E-06	4,98E-07	5,53E-06
Transport	4,40E-06	4,96E-06	2,40E-07	3,08E-07	1,14E-06	3,85E-06	7,22E-07	3,15E-07	3,25E-06	8,35E-07	1,94E-06	1,80E-05	6,28E-06
Infrastruktur	5,44E-06	4,46E-06	1,28E-05	7,06E-06	1,58E-05	9,86E-06	1,46E-05	6,10E-06	3,55E-06	4,18E-06	1,17E-05	9,80E-06	1,45E-05
Betrieb BGA	1,01E-06	7,30E-07	8,79E-07	1,23E-06	2,96E-06	0,00E+00	1,54E-06	1,11E-06	7,23E-07	1,08E-06	1,13E-06	3,74E-07	5,56E-06
BHKW	6,27E-05	5,54E-05	8,77E-05	1,08E-04	9,56E-05	1,02E-04	4,91E-05	9,95E-05	6,13E-05	5,89E-05	9,82E-05	4,82E-05	1,09E-04
GR Lagerung	8,31E-06	1,33E-05	2,29E-07	3,70E-06	0,00E+00	9,71E-06	1,91E-07	1,29E-05	8,17E-06	6,69E-06	6,93E-06	0,00E+00	1,50E-06
GR Ausbringung	1,74E-06	2,34E-06	1,05E-06	1,53E-06	1,63E-06	1,75E-06	1,99E-06	1,16E-06	8,60E-07	1,43E-06	1,52E-06	2,39E-06	3,24E-06
REF NAWAROS	-4,53E-06	-2,25E-06	-6,43E-06	-7,48E-06	-1,02E-05	0,00E+00	-5,34E-06	-5,09E-06	-3,99E-06	-8,45E-06	-3,03E-06	-4,01E-07	-4,50E-06
REF WD	-3,55E-06	-1,57E-05	-1,12E-05	-1,31E-05	-1,51E-05	-1,35E-05	-1,57E-05	-7,97E-06	-1,04E-05	-2,58E-06	-1,58E-05	0,00E+00	-1,60E-05
REF AF	-6,41E-06	-1,15E-05	1,76E-06	0,00E+00	-3,23E-06	-4,40E-05	-4,43E-06	0,00E+00	-2,51E-06	0,00E+00	-5,32E-06	-3,93E-05	0,00E+00
GS Wärme	-3,94E-06	-2,45E-05	-2,53E-05	-3,73E-06	-1,98E-05	-2,08E-05	-8,25E-06	-5,24E-06	-2,28E-05	-1,97E-06	0,00E+00	0,00E+00	-7,18E-06
GS Dünger	-6,34E-06	-3,79E-06	-4,52E-06	-2,40E-06	7,09E-07	5,04E-06	-2,59E-06	-3,24E-06	1,08E-06	-2,88E-06	7,84E-07	-1,81E-06	-4,11E-06
Differenz	6,44E-05	2,63E-05	6,34E-05	1,02E-04	8,20E-05	5,41E-05	3,83E-05	1,04E-04	4,36E-05	6,44E-05	1,03E-04	3,78E-05	1,13E-04

Tabelle 43 (Fortsetzung)

AP [kg SO ₂ -eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	2,42E-04	1,19E-04	1,53E-04	0,00E+00	1,75E-04	2,33E-04	2,30E-04	4,21E-04	7,34E-05	2,07E-04	1,67E-04	8,51E-05	2,02E-04
Transport	1,59E-05	5,61E-04	2,92E-05	1,43E-04	2,16E-05	2,40E-05	2,34E-05	2,47E-05	8,27E-05	1,61E-05	1,62E-03	5,10E-06	6,44E-05
Infrastruktur	2,37E-04	1,02E-04	2,53E-04	2,60E-04	6,85E-05	7,05E-05	8,75E-05	7,48E-05	8,30E-05	1,35E-04	1,90E-04	3,26E-04	1,26E-03
Betrieb BGA	7,36E-05	5,98E-05	9,10E-05	0,00E+00	7,46E-06	5,82E-05	4,28E-05	3,84E-05	1,18E-05	6,96E-05	3,13E-05	2,40E-04	1,30E-04
BHKW	2,99E-03	1,69E-03	1,55E-03	1,55E-03	1,47E-03	1,83E-03	8,02E-04	8,12E-04	9,68E-04	1,61E-03	1,92E-03	1,56E-03	2,14E-03
GR Lagerung	4,91E-04	1,24E-03	2,92E-04	3,44E-03	0,00E+00	5,14E-04	1,31E-03	1,14E-03	1,46E-03	0,00E+00	1,60E-03	4,97E-03	5,38E-03
GR Ausbringung	7,96E-03	6,23E-03	3,18E-03	2,47E-02	2,14E-03	3,99E-03	3,45E-03	1,81E-03	1,03E-02	4,14E-03	5,58E-03	8,11E-03	7,08E-03
REF NAWAROS	-1,78E-04	-9,56E-05	-3,46E-04	0,00E+00	-1,42E-04	-1,87E-04	-1,58E-04	-9,53E-04	-5,94E-05	-1,67E-04	-7,45E-05	-6,89E-05	-1,63E-04
REF WD	-4,78E-03	-3,45E-03	0,00E+00	-2,61E-02	-2,75E-03	-3,71E-03	-2,51E-03	-1,13E-03	-4,32E-03	-3,15E-03	-8,01E-03	-2,76E-03	-1,34E-02
REF AF	0,00E+00	-2,16E-03	-1,04E-02	-1,52E-03	0,00E+00	0,00E+00	-4,64E-03	0,00E+00	-6,66E-03	0,00E+00	-1,17E-02	-8,70E-03	-2,17E-02
GS Wärme	-9,00E-05	-6,83E-04	-8,41E-04	-7,49E-04	-6,65E-05	-2,45E-05	-4,84E-04	-2,58E-04	-4,62E-04	-3,13E-04	-5,80E-04	-7,10E-04	-6,69E-04
GS Dünger	-3,21E-04	-2,45E-04	1,45E-04	-6,27E-04	-4,41E-04	-2,96E-04	-4,71E-04	-6,20E-04	7,48E-05	-1,20E-03	3,88E-04	-1,29E-03	-1,41E-03
Differenz	6,64E-03	3,37E-03	-5,84E-03	1,16E-03	4,85E-04	2,49E-03	-2,31E-03	1,36E-03	1,57E-03	1,36E-03	-8,86E-03	1,77E-03	-2,11E-02
EP [kg PO ₄ -eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	5,57E-05	2,51E-05	3,12E-05	0,00E+00	4,52E-05	5,66E-05	1,40E-04	9,67E-05	1,99E-05	5,25E-05	7,51E-05	1,97E-05	4,21E-05
Transport	2,52E-06	9,02E-05	4,70E-06	2,30E-05	3,42E-06	3,80E-06	3,70E-06	3,90E-06	1,33E-05	2,55E-06	2,61E-04	8,06E-07	1,04E-05
Infrastruktur	1,57E-05	1,12E-05	1,68E-05	1,65E-05	9,56E-06	9,85E-06	7,94E-06	1,03E-05	9,61E-06	1,83E-05	1,26E-05	2,16E-05	7,21E-05
Betrieb BGA	1,21E-05	9,91E-06	1,53E-05	0,00E+00	1,18E-06	9,59E-06	7,13E-06	6,47E-06	2,00E-06	1,16E-05	5,14E-06	4,01E-05	2,15E-05
BHKW	5,37E-04	2,61E-04	2,80E-04	2,15E-04	2,53E-04	2,68E-04	1,23E-04	1,33E-04	1,29E-04	2,35E-04	2,75E-04	2,74E-04	3,20E-04
GR Lagerung	9,14E-05	2,30E-04	5,44E-05	6,40E-04	0,00E+00	9,56E-05	2,44E-04	2,12E-04	2,72E-04	0,00E+00	2,99E-04	9,25E-04	1,00E-03
GR Ausbringung	1,48E-03	1,16E-03	5,93E-04	4,60E-03	3,98E-04	7,41E-04	6,42E-04	3,36E-04	1,92E-03	7,70E-04	1,04E-03	1,51E-03	1,31E-03
REF NAWAROS	-4,18E-05	-2,45E-05	-6,57E-05	0,00E+00	-3,64E-05	-4,54E-05	-4,45E-05	-1,89E-04	-1,60E-05	-4,23E-05	-1,80E-05	-1,59E-05	-3,39E-05
REF WD	-8,87E-04	-6,41E-04	0,00E+00	-4,85E-03	-5,12E-04	-6,91E-04	-4,66E-04	-2,11E-04	-8,03E-04	-5,85E-04	-1,49E-03	-5,13E-04	-2,50E-03
REF AF	0,00E+00	-3,95E-04	-1,92E-03	-2,79E-04	0,00E+00	0,00E+00	-8,63E-04	0,00E+00	-1,24E-03	0,00E+00	-2,16E-03	-1,60E-03	-4,00E-03
GS Wärme	-1,02E-05	-7,77E-05	-9,57E-05	-8,53E-05	-7,56E-06	-2,78E-06	-5,51E-05	-2,94E-05	-5,26E-05	-3,57E-05	-6,61E-05	-8,08E-05	-7,62E-05
GS Dünger	-5,82E-05	-4,45E-05	2,63E-05	-1,14E-04	-8,00E-05	-5,36E-05	-8,55E-05	-1,13E-04	1,36E-05	-2,17E-04	7,03E-05	-2,34E-04	-2,55E-04
Differenz	1,20E-03	6,03E-04	-1,06E-03	1,65E-04	7,44E-05	3,92E-04	-3,47E-04	2,57E-04	2,71E-04	2,10E-04	-1,70E-03	3,48E-04	-4,08E-03
POCP [kg C ₂ H ₄ -eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	6,60E-06	3,39E-06	4,37E-06	0,00E+00	4,49E-06	6,40E-06	6,23E-06	1,16E-05	1,76E-06	5,60E-06	4,46E-06	2,43E-06	5,90E-06
Transport	5,24E-07	2,12E-05	1,11E-06	5,44E-06	7,11E-07	7,89E-07	7,69E-07	8,12E-07	3,06E-06	5,30E-07	6,19E-05	1,68E-07	2,44E-06
Infrastruktur	1,44E-05	6,48E-06	1,54E-05	1,59E-05	4,31E-06	4,44E-06	5,16E-06	4,82E-06	5,93E-06	9,41E-06	1,16E-05	1,98E-05	7,33E-05
Betrieb BGA	1,44E-06	1,16E-06	1,73E-06	0,00E+00	1,55E-07	1,14E-06	8,26E-07	7,28E-07	2,25E-07	1,35E-06	6,15E-07	4,59E-06	2,52E-06
BHKW	1,03E-04	1,08E-04	1,14E-04	1,46E-04	1,03E-04	8,11E-05	5,72E-05	5,88E-05	6,58E-05	1,18E-04	1,29E-04	1,08E-04	1,40E-04
GR Lagerung	1,82E-06	1,56E-05	2,88E-06	2,76E-05	0,00E+00	1,15E-05	2,15E-07	7,75E-06	1,26E-05	0,00E+00	8,80E-06	2,16E-05	2,04E-05
GR Ausbringung	2,99E-06	2,31E-06	2,85E-07	5,90E-06	2,12E-06	1,52E-06	9,37E-07	1,57E-06	1,83E-06	1,45E-06	2,94E-06	3,14E-06	6,98E-06
REF NAWAROS	-4,86E-06	-2,72E-06	-4,72E-06	0,00E+00	-3,64E-06	-5,16E-06	-4,29E-06	-1,31E-05	-1,43E-06	-4,53E-06	-2,15E-06	-1,96E-06	-4,75E-06
REF WD	-1,84E-05	-1,61E-05	0,00E+00	-5,93E-05	-1,25E-05	-1,15E-05	-1,00E-05	-3,85E-06	-1,48E-05	-3,57E-06	-1,89E-05	-8,83E-06	-4,51E-06
REF AF	0,00E+00	-2,05E-05	-2,33E-05	-1,47E-05	0,00E+00	0,00E+00	-3,55E-06	0,00E+00	-2,00E-05	0,00E+00	-5,13E-05	-3,94E-05	-5,36E-05
GS Wärme	-6,40E-06	-4,86E-05	-5,98E-05	-5,33E-05	-4,73E-06	-1,74E-06	-3,44E-05	-1,84E-05	-3,29E-05	-2,23E-05	-4,13E-05	-5,05E-05	-4,76E-05
GS Dünger	-1,96E-06	-1,50E-06	8,89E-07	-3,84E-06	-2,70E-06	-1,81E-06	-2,89E-06	-3,80E-06	4,58E-07	-7,32E-06	2,37E-06	-7,89E-06	-8,61E-06
Differenz	9,90E-05	6,90E-05	5,34E-05	6,98E-05	9,14E-05	8,66E-05	1,62E-05	4,70E-05	2,26E-05	9,88E-05	1,08E-04	5,12E-05	9,14E-05

Tabelle 43 (Fortsetzung)

AP [kg SO ₂ -eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	3,09E-04	0,00E+00	9,10E-05	2,59E-04	3,45E-04	0,00E+00	2,78E-04	4,62E-04	2,45E-04	2,80E-04	1,51E-04	0,00E+00	2,12E-04	2,23E-04	3,02E-04
Transport	1,12E-05	7,97E-04	1,49E-03	2,56E-05	3,44E-05	1,34E-05	2,17E-06	4,62E-05	2,14E-04	2,47E-05	9,55E-05	1,84E-04	2,07E-06	8,35E-05	2,80E-05
Infrastruktur	2,87E-04	3,08E-04	2,95E-04	2,53E-04	1,36E-04	1,12E-03	8,24E-04	1,31E-04	2,51E-04	5,70E-05	2,15E-04	1,83E-04	6,62E-04	3,62E-04	7,87E-05
Betrieb BGA	1,08E-04	0,00E+00	5,99E-06	1,24E-04	9,76E-05	9,43E-05	1,78E-04	6,93E-05	2,11E-04	3,09E-05	6,49E-05	2,03E-05	1,07E-04	5,35E-05	3,53E-05
BHKW	1,90E-03	1,65E-03	1,71E-03	1,18E-03	1,72E-03	1,56E-03	3,47E-03	2,78E-03	1,22E-03	1,51E-03	1,37E-03	1,61E-03	2,98E-03	1,50E-03	6,99E-04
GR Lagerung	4,41E-03	0,00E+00	3,88E-04	1,44E-03	1,21E-03	0,00E+00	7,61E-04	2,16E-04	4,37E-04	1,07E-03	6,55E-05	3,15E-03	0,00E+00	6,23E-04	5,85E-04
GR Ausbringung	1,47E-02	1,00E-02	5,27E-03	6,27E-03	6,77E-03	7,51E-03	2,53E-02	4,20E-03	1,06E-02	1,09E-03	8,23E-03	2,42E-02	1,42E-02	6,67E-03	3,64E-03
REF NAWAROS	-1,14E-04	0,00E+00	-7,38E-05	-2,10E-04	-1,35E-04	0,00E+00	-2,24E-04	-5,36E-04	-1,79E-04	-6,72E-04	-9,80E-05	0,00E+00	-1,62E-04	-1,43E-04	-6,37E-04
REF WD	-1,53E-02	-7,14E-04	-9,30E-04	-3,67E-03	-9,99E-03	0,00E+00	-3,18E-02	-1,33E-03	-2,83E-03	0,00E+00	-3,45E-03	-1,66E-02	-1,03E-02	-3,96E-03	0,00E+00
REF AF	-2,57E-03	-1,24E-02	-4,76E-03	0,00E+00	-4,31E-03	-2,55E-02	-5,03E-03	0,00E+00	-9,51E-03	0,00E+00	-4,90E-03	-2,17E-02	-5,98E-04	-9,98E-04	0,00E+00
GS Wärme	-4,96E-04	-8,12E-04	-1,11E-04	0,00E+00	-3,91E-04	-1,15E-03	-9,74E-04	-3,35E-04	-8,43E-05	-2,49E-04	-6,07E-05	-7,94E-05	-6,10E-04	-2,05E-04	-3,61E-05
GS Dünger	5,47E-04	-4,19E-04	-1,31E-04	-1,23E-03	-2,66E-05	4,22E-04	5,93E-04	-7,78E-04	-5,25E-04	-5,76E-04	-2,56E-04	3,71E-04	1,85E-05	-1,98E-04	-5,86E-04
Differenz	3,83E-03	-1,56E-03	3,25E-03	4,43E-03	-4,54E-03	-1,59E-02	-6,58E-03	4,92E-03	3,12E-05	2,57E-03	1,43E-03	-8,60E-03	6,46E-03	4,01E-03	4,11E-03
EP [kg PO ₄ -eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	1,19E-04	0,00E+00	1,98E-05	5,51E-05	1,44E-04	0,00E+00	4,49E-05	9,91E-05	4,99E-05	6,38E-05	3,40E-05	0,00E+00	4,50E-05	5,11E-05	6,25E-05
Transport	1,76E-06	1,28E-04	2,40E-04	4,04E-06	5,44E-06	2,12E-06	3,43E-07	7,34E-06	3,44E-05	3,90E-06	1,54E-05	2,96E-05	3,27E-07	1,32E-05	4,43E-06
Infrastruktur	1,90E-05	2,03E-05	1,96E-05	1,67E-05	1,47E-05	6,62E-05	4,17E-05	1,62E-05	1,66E-05	6,47E-06	1,42E-05	1,49E-05	3,49E-05	2,39E-05	1,06E-05
Betrieb BGA	1,80E-05	0,00E+00	1,01E-06	2,05E-05	1,58E-05	1,59E-05	2,97E-05	1,12E-05	3,56E-05	5,05E-06	1,08E-05	3,43E-06	1,77E-05	8,58E-06	5,66E-06
BHKW	2,84E-04	2,30E-04	2,59E-04	2,01E-04	2,74E-04	2,07E-04	4,94E-04	4,56E-04	2,20E-04	2,75E-04	2,28E-04	2,52E-04	5,04E-04	2,39E-04	1,21E-04
GR Lagerung	8,21E-04	0,00E+00	7,23E-05	2,68E-04	2,25E-04	0,00E+00	1,42E-04	4,02E-05	8,14E-05	1,99E-04	1,22E-05	5,87E-04	0,00E+00	1,16E-04	1,09E-04
GR Ausbringung	2,73E-03	1,87E-03	9,81E-04	1,17E-03	1,26E-03	1,39E-03	4,71E-03	7,80E-04	1,97E-03	2,02E-04	1,53E-03	4,50E-03	2,64E-03	1,24E-03	6,77E-04
REF NAWAROS	-2,55E-05	0,00E+00	-1,60E-05	-4,46E-05	-3,17E-05	0,00E+00	-3,62E-05	-1,09E-04	-3,70E-05	-1,32E-04	-2,33E-05	0,00E+00	-3,10E-05	-3,48E-05	-1,22E-04
REF WD	-2,84E-03	-1,33E-04	-1,72E-04	-6,83E-04	-1,86E-03	0,00E+00	-5,91E-03	-2,48E-04	-5,26E-04	0,00E+00	-6,42E-04	-3,08E-03	-1,92E-03	-7,37E-04	0,00E+00
REF AF	-4,77E-04	-2,30E-03	-8,75E-04	0,00E+00	-8,02E-04	-4,74E-03	-9,33E-04	0,00E+00	-1,77E-03	0,00E+00	-9,05E-04	-4,03E-03	-1,10E-04	-1,76E-04	0,00E+00
GS Wärme	-5,65E-05	-9,25E-05	-1,26E-05	0,00E+00	-4,45E-05	-1,31E-04	-1,11E-04	-3,81E-05	-9,60E-06	-2,83E-05	-6,91E-06	-9,03E-06	-6,95E-05	-2,33E-05	-4,11E-06
GS Dünger	9,92E-05	-7,60E-05	-2,37E-05	-2,23E-04	-4,83E-06	7,65E-05	1,08E-04	-1,41E-04	-9,52E-05	-1,04E-04	-4,64E-05	6,72E-05	3,36E-06	-3,59E-05	-1,06E-04
Differenz	6,97E-04	-3,53E-04	4,93E-04	7,80E-04	-8,03E-04	-3,10E-03	-1,42E-03	8,74E-04	-2,68E-05	4,89E-04	2,22E-04	-1,66E-03	1,11E-03	6,83E-04	7,58E-04
POCP [kg C ₂ H ₄ -eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	7,25E-06	0,00E+00	2,48E-06	6,90E-06	8,16E-06	0,00E+00	8,20E-06	7,81E-06	6,18E-06	7,08E-06	3,91E-06	0,00E+00	5,96E-06	5,47E-06	8,39E-06
Transport	3,67E-07	3,04E-05	5,66E-05	8,41E-07	1,13E-06	4,42E-07	7,12E-08	1,58E-06	8,08E-06	8,11E-07	3,64E-06	6,99E-06	6,80E-08	2,74E-06	9,21E-07
Infrastruktur	1,75E-05	1,87E-05	1,79E-05	1,53E-05	7,90E-06	6,50E-05	4,83E-05	9,32E-06	1,52E-05	3,73E-06	1,30E-05	1,11E-05	3,76E-05	2,19E-05	5,05E-06
Betrieb BGA	2,09E-06	0,00E+00	1,14E-07	2,41E-06	1,96E-06	1,79E-06	3,41E-06	1,39E-06	4,00E-06	6,12E-07	1,26E-06	3,86E-07	2,08E-06	1,09E-06	7,19E-07
BHKW	1,29E-04	1,03E-04	1,15E-04	7,42E-05	1,21E-04	1,56E-04	2,68E-04	8,81E-05	7,39E-05	9,25E-05	1,03E-04	6,84E-05	1,55E-04	6,64E-05	5,32E-05
GR Lagerung	1,65E-05	0,00E+00	1,03E-05	1,44E-05	1,68E-05	0,00E+00	2,55E-06	9,64E-07	2,45E-06	1,03E-05	2,86E-07	9,03E-06	0,00E+00	8,29E-06	6,77E-06
GR Ausbringung	3,73E-06	1,43E-06	1,19E-06	2,36E-06	3,15E-06	4,04E-06	5,80E-06	1,49E-06	1,65E-06	1,13E-06	1,23E-06	8,19E-06	2,71E-06	1,88E-06	1,42E-06
REF NAWAROS	-3,22E-06	0,00E+00	-2,01E-06	-5,60E-06	-3,67E-06	0,00E+00	-6,61E-06	-7,30E-06	-4,94E-06	-8,45E-06	-2,81E-06	0,00E+00	-4,63E-06	-3,88E-06	-9,18E-06
REF WD	-5,09E-05	-2,40E-06	-2,88E-06	-1,19E-05	-2,70E-05	0,00E+00	-1,65E-04	-9,79E-06	-1,94E-05	0,00E+00	-1,04E-05	-1,06E-04	-5,34E-05	-3,02E-05	0,00E+00
REF AF	-5,78E-06	-4,25E-05	-2,48E-05	0,00E+00	-9,71E-06	-5,78E-05	-1,67E-05	0,00E+00	-1,62E-05	0,00E+00	-1,94E-05	-3,50E-05	-2,52E-06	-1,22E-05	0,00E+00
GS Wärme	-3,53E-05	-5,78E-05	-7,89E-06	0,00E+00	-2,78E-05	-8,17E-05	-6,93E-05	-2,38E-05	-6,00E-06	-1,77E-05	-4,32E-06	-5,64E-06	-4,34E-05	-1,46E-05	-2,57E-06
GS Dünger	3,35E-06	-2,56E-06	-8,01E-07	-7,54E-06	-1,63E-07	2,58E-06	3,63E-06	-4,77E-06	-3,22E-06	-3,53E-06	-1,57E-06	2,27E-06	1,13E-07	-1,21E-06	-3,59E-06
Differenz	8,50E-05	4,85E-05	1,65E-04	9,14E-05	9,14E-05	8,98E-05	8,21E-05	6,50E-05	6,17E-05	8,64E-05	8,73E-05	-4,06E-05	9,99E-05	4,56E-05	6,11E-05

Tabelle 44: Detailergebnisse für das Biogas-System für die Wirkungskategorien ODP, LUC und HTP

ODP [kg CFC-11-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	3,46E-09	1,75E-09	3,70E-09	4,48E-09	7,58E-09	0,00E+00	3,94E-09	2,74E-09	2,75E-09	4,30E-09	3,41E-09	2,98E-10	3,48E-09
Transport	2,34E-09	2,64E-09	1,28E-10	1,64E-10	6,05E-10	2,05E-09	3,84E-10	1,68E-10	1,73E-09	4,45E-10	1,03E-09	9,61E-09	3,34E-09
Infrastruktur	1,29E-09	1,75E-09	3,70E-09	4,48E-09	7,58E-09	0,00E+00	3,94E-09	2,74E-09	2,75E-09	4,30E-09	3,41E-09	2,98E-10	3,48E-09
Betrieb BGA	6,03E-10	4,61E-10	5,31E-10	7,64E-10	1,81E-09	0,00E+00	9,58E-10	6,73E-10	4,37E-10	6,66E-10	6,97E-10	2,49E-10	2,55E-09
BHKW	1,64E-10	3,10E-10	4,22E-10	4,76E-10	4,31E-10	2,91E-10	2,02E-10	2,83E-10	4,52E-10	2,01E-10	3,25E-10	4,71E-10	6,70E-10
GR Lagerung	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
GR Ausbringung	9,50E-10	1,27E-09	5,83E-10	8,43E-10	9,12E-10	9,62E-10	1,10E-09	6,51E-10	4,76E-10	7,79E-10	8,47E-10	1,30E-09	1,78E-09
REF NAWAROS	-2,80E-09	-1,42E-09	-4,22E-09	-4,96E-09	-6,17E-09	0,00E+00	-3,23E-09	-3,08E-09	-2,57E-09	-5,74E-09	-1,92E-09	-2,40E-10	-2,84E-09
REF WD	-1,56E-10	-8,85E-10	-2,32E-10	-2,06E-10	-3,94E-10	-5,04E-10	-5,53E-10	-2,45E-10	-3,27E-10	-1,24E-10	-8,99E-10	0,00E+00	-1,30E-09
REF AF	-1,20E-09	-1,91E-09	0,00E+00	0,00E+00	-6,64E-10	-9,51E-09	-1,03E-09	0,00E+00	-4,89E-10	0,00E+00	-1,42E-09	-8,41E-09	0,00E+00
GS Wärme	-2,55E-09	-1,59E-08	-1,64E-08	-2,41E-09	-1,28E-08	-1,35E-08	-5,35E-09	-3,40E-09	-1,48E-08	-1,28E-09	0,00E+00	0,00E+00	-4,65E-09
GS Dünger	-5,40E-09	-3,23E-09	-3,85E-09	-2,05E-09	6,04E-10	4,30E-09	-2,21E-09	-2,76E-09	9,21E-10	-2,46E-09	6,69E-10	-1,54E-09	-3,50E-09
Differenz	-3,30E-09	-1,51E-08	-1,56E-08	1,57E-09	-5,45E-10	-1,59E-08	-1,85E-09	-2,23E-09	-8,62E-09	1,09E-09	6,15E-09	2,03E-09	3,03E-09
LUC [m ² * a ⁻¹ /kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	0,4813	0,2750	0,4396	0,6552	0,8658	0,0000	0,5978	0,4602	0,4724	0,5148	0,4687	0,0341	0,8337
Transport	0,0009	0,0006	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0007	0,0003	0,0022	0,0008	0,0002	0,0015	0,0013
Infrastruktur	0,0020	0,0066	0,0011	0,0057	0,0030	0,0019	0,0028	0,0059	0,0094	0,0028	0,0064	0,0058	0,0027
Betrieb BGA	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BHKW	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	0,2866	0,7425	0,0000	0,1744	0,5813	0,8459	0,3336	0,4229	0,1084	0,0981	0,6454	0,6758	1,1526
REF NAWAROS	-0,4813	-0,2750	-0,4396	-0,6552	-0,8658	0,0000	-0,5978	-0,4602	-0,5559	-0,5148	-0,4687	-0,0341	-0,8337
REF WD	-0,1259	-0,7065	-0,1778	-0,2030	-0,4049	-0,4432	-0,4693	-0,3585	-0,3974	-0,0974	-1,5091	0,0000	-1,3311
REF AF	-0,1149	-0,2369	0,0000	0,0000	-0,0506	-0,8303	-0,0816	0,0000	-0,0479	0,0000	-0,1382	-0,1131	0,0000
GS Wärme	-0,0062	-0,0385	-0,0398	-0,0059	-0,0312	-0,0327	-0,0130	-0,0083	-0,0359	-0,0031	0,0000	0,0000	-0,0113
GS Dünger	-0,0033	-0,0020	-0,0023	-0,0012	0,0004	0,0026	-0,0013	-0,0017	0,0006	-0,0015	0,0004	-0,0009	-0,0021
Differenz	0,0392	-0,2343	-0,2186	-0,0297	0,0982	-0,4555	-0,2282	0,0607	-0,4441	-0,0003	-0,9949	0,5691	-0,1878
HTP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	0,0269	0,0131	0,0307	0,0387	0,0639	0,0000	0,0326	0,0239	0,0207	0,0357	0,0230	0,0025	0,0266
Transport	0,0078	0,0062	0,0015	0,0019	0,0026	0,0039	0,0044	0,0019	0,0151	0,0051	0,0025	0,0187	0,0115
Infrastruktur	0,0193	0,0252	0,0513	0,0193	0,0464	0,0290	0,0427	0,0225	0,0222	0,0152	0,0269	0,2182	0,0425
Betrieb BGA	0,0030	0,0023	0,0026	0,0038	0,0090	0,0000	0,0048	0,0034	0,0022	0,0033	0,0035	0,0012	0,0151
BHKW	0,0014	0,0016	0,0037	0,0028	0,0022	0,0025	0,0021	0,0024	0,0018	0,0014	0,0024	0,0017	0,0051
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	0,0092	0,0130	0,0051	0,0078	0,0077	0,0089	0,0099	0,0058	0,0043	0,0076	0,0072	0,0130	0,0167
REF NAWAROS	-0,0217	-0,0106	-0,0316	-0,0378	-0,0517	0,0000	-0,0266	-0,0252	-0,0187	-0,0414	-0,0140	-0,0020	-0,0217
REF WD	-0,0015	-0,0090	-0,0020	-0,0020	-0,0035	-0,0048	-0,0052	-0,0022	-0,0030	-0,0012	-0,0088	0,0000	-0,0132
REF AF	-0,0065	-0,0104	0,0000	0,0000	-0,0037	-0,0527	-0,0056	0,0000	-0,0027	0,0000	-0,0078	-0,0461	0,0000
GS Wärme	-0,0043	-0,0268	-0,0277	-0,0041	-0,0217	-0,0227	-0,0090	-0,0057	-0,0250	-0,0022	0,0000	0,0000	-0,0079
GS Dünger	-0,0301	-0,0180	-0,0214	-0,0114	0,0034	0,0239	-0,0123	-0,0154	0,0051	-0,0137	0,0037	-0,0086	-0,0195
Differenz	0,0035	-0,0134	0,0121	0,0191	0,0546	-0,0119	0,0379	0,0113	0,0222	0,0100	0,0387	0,1986	0,0554

Tabelle 44 (Fortsetzung)

ODP [kg CFC-11-eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	4,02E-09	2,04E-09	2,63E-09	0,00E+00	2,85E-09	3,92E-09	1,69E-09	7,06E-09	1,16E-09	3,46E-09	2,01E-09	1,46E-09	3,52E-09
Transport	2,79E-10	1,13E-08	5,90E-10	2,90E-09	3,78E-10	4,20E-10	4,09E-10	4,32E-10	1,63E-09	2,82E-10	3,29E-08	8,92E-11	1,30E-09
Infrastruktur	4,02E-09	2,04E-09	2,63E-09	0,00E+00	2,85E-09	3,92E-09	1,69E-09	7,06E-09	1,16E-09	3,46E-09	2,01E-09	1,46E-09	3,52E-09
Betrieb BGA	8,98E-10	7,35E-10	1,15E-09	0,00E+00	8,50E-11	7,09E-10	5,31E-10	4,84E-10	1,50E-10	8,58E-10	3,80E-10	2,99E-09	1,60E-09
BHKW	4,27E-10	2,43E-10	5,69E-10	4,64E-10	3,85E-10	2,29E-10	3,77E-10	4,19E-10	2,97E-10	5,24E-10	4,86E-10	2,94E-10	5,95E-10
GR Lagerung	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
GR Ausbringung	1,65E-09	1,26E-09	1,60E-10	3,28E-09	1,15E-09	8,36E-10	5,19E-10	8,62E-10	1,00E-09	8,07E-10	1,63E-09	1,76E-09	3,85E-09
REF NAWAROS	-2,94E-09	-1,64E-09	-3,21E-09	0,00E+00	-2,31E-09	-3,16E-09	-2,58E-09	-8,90E-09	-9,38E-10	-2,80E-09	-1,29E-09	-1,19E-09	-2,84E-09
REF WD	-1,11E-09	-1,22E-09	0,00E+00	-1,86E-09	-7,09E-10	-4,73E-10	-2,79E-10	-1,57E-10	-6,48E-10	-3,58E-10	-7,60E-10	-4,94E-10	-1,59E-09
REF AF	0,00E+00	-3,49E-09	-2,07E-09	-4,18E-09	0,00E+00	0,00E+00	-7,30E-10	0,00E+00	-2,00E-09	0,00E+00	-1,06E-08	-1,16E-08	-1,90E-08
GS Wärme	-4,15E-09	-3,15E-08	-3,88E-08	-3,45E-08	-3,06E-09	-1,13E-09	-2,23E-08	-1,19E-08	-2,13E-08	-1,44E-08	-2,67E-08	-3,27E-08	-3,08E-08
GS Dünger	-1,67E-09	-1,28E-09	7,58E-10	-3,27E-09	-2,30E-09	-1,54E-09	-2,46E-09	-3,24E-09	3,91E-10	-6,24E-09	2,02E-09	-6,72E-09	-7,34E-09
Differenz	1,42E-09	-2,15E-08	-3,56E-08	-3,72E-08	-6,82E-10	3,74E-09	-2,31E-08	-7,87E-09	-1,91E-08	-1,44E-08	2,05E-09	-4,47E-08	-4,72E-08
LUC [m² * a ⁻¹ /kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	0,5605	0,2838	0,2811	0,0000	0,4626	0,5074	0,4784	0,8461	0,1970	0,4889	0,2102	0,2374	0,3893
Transport	0,0005	0,0030	0,0001	0,0004	0,0006	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0005	0,0053	0,0002	0,0003
Infrastruktur	0,0043	0,0076	0,0014	0,0013	0,0029	0,0030	0,0052	0,0067	0,0063	0,0206	0,0022	0,0038	0,0099
Betrieb BGA	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BHKW	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	1,1297	1,0392	0,2417	4,8543	0,2204	0,2292	0,2814	0,0000	0,5417	1,1803	1,4469	1,3868	3,3848
REF NAWAROS	-0,5605	-0,2918	-0,2811	0,0000	-0,4626	-0,5074	-0,4784	-0,8461	-0,1970	-0,4889	-0,2102	-0,2374	-0,3893
REF WD	-1,3409	-1,0188	0,0000	-2,7549	-0,4216	-0,0962	-0,4076	-0,0678	-0,4788	-0,4466	-0,7889	-0,9906	-1,5606
REF AF	0,0000	-0,4306	-0,4170	-0,4592	0,0000	0,0000	-0,0859	0,0000	-0,1748	0,0000	-0,8706	-0,6625	-1,7362
GS Wärme	-0,0101	-0,0765	-0,0942	-0,0839	-0,0074	-0,0027	-0,0542	-0,0289	-0,0518	-0,0351	-0,0650	-0,0795	-0,0750
GS Dünger	-0,0010	-0,0008	0,0005	-0,0020	-0,0014	-0,0009	-0,0015	-0,0020	0,0002	-0,0038	0,0012	-0,0041	-0,0045
Differenz	-0,2175	-0,4848	-0,2676	1,5561	-0,2065	0,1331	-0,2619	-0,0912	-0,1563	0,7159	-0,2688	-0,3459	0,0188
HTP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	0,0339	0,0169	0,0217	0,0000	0,0210	0,0317	0,0243	0,0586	0,0079	0,0270	0,0155	0,0121	0,0290
Transport	0,0032	0,0296	0,0013	0,0056	0,0044	0,0048	0,0047	0,0050	0,0061	0,0033	0,0651	0,0010	0,0030
Infrastruktur	0,0270	0,0216	0,0617	0,0606	0,0157	0,0162	0,1729	0,0171	0,0298	0,0327	0,0339	0,0581	0,7308
Betrieb BGA	0,0045	0,0037	0,0057	0,0000	0,0004	0,0035	0,0026	0,0024	0,0007	0,0043	0,0019	0,0149	0,0079
BHKW	0,0054	0,0027	0,0032	0,0025	0,0028	0,0027	0,0015	0,0017	0,0015	0,0028	0,0031	0,0028	0,0036
GR Lagerung	0,0000	0,0001	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0003	0,0003
GR Ausbringung	0,0151	0,0123	0,0014	0,0284	0,0118	0,0079	0,0046	0,0081	0,0100	0,0077	0,0142	0,0138	0,0347
REF NAWAROS	-0,0249	-0,0133	-0,0230	0,0000	-0,0170	-0,0255	-0,0203	-0,0650	-0,0064	-0,0218	-0,0107	-0,0098	-0,0233
REF WD	-0,0110	-0,0125	0,0000	-0,0168	-0,0074	-0,0046	-0,0025	-0,0015	-0,0064	-0,0038	-0,0072	-0,0041	-0,0149
REF AF	0,0000	-0,0189	-0,0117	-0,0226	0,0000	0,0000	-0,0042	0,0000	-0,0111	0,0000	-0,0579	-0,0631	-0,1036
GS Wärme	-0,0070	-0,0532	-0,0655	-0,0583	-0,0052	-0,0019	-0,0377	-0,0201	-0,0360	-0,0244	-0,0452	-0,0553	-0,0521
GS Dünger	-0,0093	-0,0071	0,0042	-0,0182	-0,0128	-0,0086	-0,0137	-0,0180	0,0022	-0,0347	0,0113	-0,0374	-0,0408
Differenz	0,0369	-0,0182	-0,0009	-0,0186	0,0137	0,0265	0,1325	-0,0118	-0,0016	-0,0071	0,0242	-0,0666	0,5745

Tabelle 44 (Fortsetzung)

ODP [kg CFC-11-eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	3,58E-09	0,00E+00	1,52E-09	4,25E-09	3,71E-09	0,00E+00	4,90E-09	5,13E-09	3,81E-09	4,32E-09	2,46E-09	0,00E+00	3,52E-09	3,53E-09	5,10E-09
Transport	1,95E-10	1,62E-08	3,02E-08	4,47E-10	6,02E-10	2,35E-10	3,79E-11	8,39E-10	4,30E-09	4,32E-10	1,94E-09	3,72E-09	3,62E-11	1,46E-09	4,90E-10
Infrastruktur	3,58E-09	0,00E+00	1,52E-09	4,25E-09	3,71E-09	0,00E+00	4,90E-09	5,13E-09	3,81E-09	4,32E-09	2,46E-09	0,00E+00	3,52E-09	3,53E-09	5,10E-09
Betrieb BGA	1,34E-09	0,00E+00	7,56E-11	1,52E-09	1,16E-09	1,19E-09	2,22E-09	8,23E-10	2,66E-09	3,72E-10	8,00E-10	2,57E-10	1,32E-09	6,26E-10	4,13E-10
BHKW	5,02E-10	1,89E-10	4,56E-10	7,74E-10	1,36E-10	6,84E-10	8,49E-08	4,73E-10	6,13E-10	1,13E-10	2,32E-10	1,51E-08	6,55E-10	9,32E-09	1,55E-10
GR Lagerung	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
GR Ausbringung	2,06E-09	7,86E-10	6,53E-10	1,31E-09	1,72E-09	2,22E-09	3,26E-09	8,19E-10	9,20E-10	6,20E-10	6,91E-10	4,50E-09	1,52E-09	1,05E-09	7,77E-10
REF NAWAROS	-1,95E-09	0,00E+00	-1,23E-09	-3,45E-09	-2,27E-09	0,00E+00	-3,95E-09	-4,99E-09	-3,03E-09	-5,82E-09	-1,69E-09	0,00E+00	-2,80E-09	-2,40E-09	-6,17E-09
REF WD	-1,96E-09	-8,46E-11	-6,30E-10	-4,97E-10	-2,26E-09	0,00E+00	-2,91E-09	-2,70E-10	-4,48E-10	0,00E+00	-3,18E-10	-3,49E-09	-1,95E-09	-5,46E-10	0,00E+00
REF AF	-5,13E-10	-6,91E-09	-6,02E-09	0,00E+00	-8,61E-10	-5,36E-09	-1,66E-09	0,00E+00	-2,34E-09	0,00E+00	-3,65E-09	-5,93E-09	-6,24E-10	-5,02E-09	0,00E+00
GS Wärme	-2,29E-08	-3,74E-08	-5,11E-09	0,00E+00	-1,80E-08	-5,29E-08	-4,49E-08	-1,54E-08	-3,89E-09	-1,15E-08	-2,80E-09	-3,66E-09	-2,81E-08	-9,44E-09	-1,66E-09
GS Dünger	2,86E-09	-2,19E-09	-6,83E-10	-6,43E-09	-1,39E-10	2,20E-09	3,10E-09	-4,06E-09	-2,74E-09	-3,01E-09	-1,34E-09	1,94E-09	9,67E-11	-1,03E-09	-3,06E-09
Differenz	-1,32E-08	-2,95E-08	2,07E-08	2,17E-09	-1,25E-08	-5,18E-08	5,00E-08	-1,16E-08	3,67E-09	-1,01E-08	-1,22E-09	1,24E-08	-2,28E-08	1,08E-09	1,14E-09
LUC [m ² * a ⁻¹ /kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	0,4344	0,0000	0,2925	0,8413	0,5091	0,0000	0,4741	0,5860	0,3797	0,4865	0,2967	0,0000	0,5601	0,4666	0,5305
Transport	0,0003	0,0025	0,0060	0,0008	0,0010	0,0004	0,0001	0,0011	0,0010	0,0007	0,0003	0,0007	0,0001	0,0025	0,0008
Infrastruktur	0,0033	0,0142	0,0034	0,0045	0,0048	0,0089	0,0062	0,0074	0,0029	0,0005	0,0038	0,0090	0,0049	0,0065	0,0030
Betrieb BGA	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BHKW	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	2,6691	1,3087	0,2539	0,4087	0,7797	8,2034	4,3932	0,0000	1,2124	0,0709	0,7471	2,0062	2,5618	0,9352	0,0769
REF NAWAROS	-0,4344	0,0000	-0,2925	-0,8413	-0,5091	0,0000	-0,4741	-0,5860	-0,5482	-0,5752	-0,2967	0,0000	-0,5601	-0,4666	-0,6074
REF WD	-2,9522	-0,1409	-0,6470	-0,5636	-1,3941	0,0000	-3,6190	-0,1678	-0,8476	0,0000	-0,5832	-1,6093	-4,7389	-0,7305	0,0000
REF AF	-0,0669	-1,0710	-0,5318	0,0000	-0,0760	-1,9667	-0,8365	0,0000	-0,3008	0,0000	-0,3471	-0,2795	-0,0789	-0,4566	0,0000
GS Wärme	-0,0556	-0,0910	-0,0124	0,0000	-0,0438	-0,1287	-0,1091	-0,0375	-0,0094	-0,0279	-0,0068	-0,0089	-0,0684	-0,0229	-0,0040
GS Dünger	0,0017	-0,0013	-0,0004	-0,0039	-0,0001	0,0013	0,0019	-0,0025	-0,0017	-0,0018	-0,0008	0,0012	0,0001	-0,0006	-0,0019
Differenz	-0,4002	0,0212	-0,9282	-0,1535	-0,7285	6,1187	-0,1632	-0,1993	-0,1115	-0,0463	-0,1865	0,1194	-2,3194	-0,2665	-0,0020
HTP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	0,0263	0,0000	0,0126	0,0354	0,0279	0,0000	0,0395	0,0378	0,0311	0,0352	0,0194	0,0000	0,0285	0,0263	0,0425
Transport	0,0023	0,0312	0,0669	0,0052	0,0069	0,0027	0,0004	0,0076	0,0106	0,0050	0,0040	0,0078	0,0004	0,0168	0,0057
Infrastruktur	0,0512	0,0889	0,0527	0,0285	0,0240	0,7978	0,0820	0,0330	0,0447	0,0312	0,0243	0,0304	0,1004	0,0404	0,0183
Betrieb BGA	0,0067	0,0000	0,0004	0,0075	0,0058	0,0059	0,0110	0,0041	0,0132	0,0019	0,0040	0,0013	0,0065	0,0031	0,0021
BHKW	0,0032	0,0024	0,0029	0,0027	0,0027	0,0027	0,0689	0,0047	0,0027	0,0027	0,0024	0,0138	0,0054	0,0093	0,0013
GR Lagerung	0,0002	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	0,0188	0,0075	0,0063	0,0117	0,0167	0,0206	0,0256	0,0078	0,0082	0,0059	0,0057	0,0428	0,0123	0,0087	0,0076
REF NAWAROS	-0,0160	0,0000	-0,0102	-0,0287	-0,0178	0,0000	-0,0318	-0,0352	-0,0250	-0,0413	-0,0140	0,0000	-0,0227	-0,0187	-0,0457
REF WD	-0,0182	-0,0008	-0,0064	-0,0046	-0,0236	0,0000	-0,0233	-0,0026	-0,0039	0,0000	-0,0026	-0,0336	-0,0158	-0,0046	0,0000
REF AF	-0,0029	-0,0379	-0,0327	0,0000	-0,0049	-0,0302	-0,0092	0,0000	-0,0131	0,0000	-0,0199	-0,0331	-0,0034	-0,0271	0,0000
GS Wärme	-0,0386	-0,0633	-0,0086	0,0000	-0,0305	-0,0895	-0,0758	-0,0261	-0,0066	-0,0194	-0,0047	-0,0062	-0,0475	-0,0160	-0,0028
GS Dünger	0,0159	-0,0122	-0,0038	-0,0357	-0,0008	0,0122	0,0172	-0,0226	-0,0152	-0,0167	-0,0074	0,0108	0,0005	-0,0057	-0,0170
Differenz	0,0488	0,0160	0,0800	0,0221	0,0065	0,7222	0,1045	0,0085	0,0466	0,0044	0,0110	0,0342	0,0647	0,0326	0,0119

Tabelle 45: Detailergebnisse für das Biogas-System für die Wirkungskategorien TAETP, FAETP und MAETP

TAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	2,17E-04	1,15E-04	2,34E-04	6,54E-04	5,70E-04	0,00E+00	2,55E-04	2,27E-04	2,47E-04	2,64E-04	4,94E-04	2,07E-05	2,81E-04
Transport	4,84E-05	4,95E-05	4,70E-06	6,03E-06	1,36E-05	3,67E-05	1,41E-05	6,18E-06	5,42E-05	1,64E-05	1,95E-05	1,73E-04	6,99E-05
Infrastruktur	1,69E-04	1,45E-04	2,82E-04	1,53E-04	3,22E-04	2,00E-04	2,96E-04	1,99E-04	1,19E-04	1,34E-04	2,23E-04	4,65E-04	2,94E-04
Betrieb BGA	5,79E-06	3,80E-06	4,98E-06	6,62E-06	1,64E-05	0,00E+00	8,22E-06	6,18E-06	4,08E-06	5,89E-06	6,13E-06	1,74E-06	6,33E-05
BHKW	1,46E-06	2,76E-06	3,75E-06	4,23E-06	3,83E-06	2,59E-06	1,79E-06	2,52E-06	4,01E-06	1,79E-06	2,89E-06	4,18E-06	5,95E-06
GR Lagerung	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
GR Ausbringung	3,12E-05	4,31E-05	1,78E-05	2,71E-05	2,79E-05	3,09E-05	3,49E-05	2,05E-05	1,48E-05	2,59E-05	2,59E-05	4,39E-05	5,77E-05
REF NAWAROS	-1,74E-04	-9,26E-05	-2,81E-04	-4,29E-04	-4,65E-04	0,00E+00	-2,08E-04	-2,52E-04	-2,23E-04	-3,85E-04	-3,34E-04	-1,66E-05	-2,26E-04
REF WD	-5,12E-06	-2,99E-05	-7,12E-06	-6,63E-06	-1,20E-05	-1,62E-05	-1,76E-05	-7,60E-06	-1,02E-05	-4,11E-06	-2,86E-05	0,00E+00	-4,42E-05
REF AF	-1,02E-04	-1,61E-04	0,00E+00	0,00E+00	-5,62E-05	-8,06E-04	-8,76E-05	0,00E+00	-4,14E-05	0,00E+00	-1,20E-04	-7,12E-04	0,00E+00
GS Wärme	-9,70E-05	-6,03E-04	-6,24E-04	-9,19E-05	-4,88E-04	-5,12E-04	-2,03E-04	-1,29E-04	-5,62E-04	-4,87E-05	0,00E+00	0,00E+00	-1,77E-04
GS Dünger	-4,11E-04	-2,45E-04	-2,93E-04	-1,56E-04	4,59E-05	3,27E-04	-1,68E-04	-2,10E-04	7,00E-05	-1,87E-04	5,08E-05	-1,17E-04	-2,66E-04
Differenz	-3,16E-04	-7,73E-04	-6,58E-04	1,68E-04	-2,27E-05	-7,37E-04	-7,44E-05	-1,38E-04	-3,24E-04	-1,76E-04	3,40E-04	-1,37E-04	5,85E-05
FAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	0,0036	0,0018	0,0042	0,0055	0,0079	0,0000	0,0044	0,0033	0,0029	0,0049	0,0031	0,0003	0,0034
Transport	0,0009	0,0008	0,0002	0,0002	0,0003	0,0005	0,0005	0,0002	0,0018	0,0006	0,0003	0,0023	0,0014
Infrastruktur	0,0050	0,0055	0,0118	0,0052	0,0117	0,0073	0,0108	0,0056	0,0047	0,0039	0,0073	0,0378	0,0107
Betrieb BGA	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0002	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0012
BHKW	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	0,0010	0,0015	0,0006	0,0009	0,0009	0,0010	0,0011	0,0007	0,0005	0,0009	0,0008	0,0015	0,0019
REF NAWAROS	-0,0029	-0,0014	-0,0044	-0,0050	-0,0064	0,0000	-0,0035	-0,0038	-0,0026	-0,0058	-0,0018	-0,0003	-0,0028
REF WD	-0,0002	-0,0010	-0,0002	-0,0002	-0,0004	-0,0005	-0,0006	-0,0002	-0,0003	-0,0001	-0,0009	0,0000	-0,0015
REF AF	-0,0004	-0,0006	0,0000	0,0000	-0,0002	-0,0028	-0,0003	0,0000	-0,0001	0,0000	-0,0004	-0,0025	0,0000
GS Wärme	-0,0004	-0,0026	-0,0027	-0,0004	-0,0021	-0,0022	-0,0009	-0,0006	-0,0024	-0,0002	0,0000	0,0000	-0,0008
GS Dünger	-0,0044	-0,0026	-0,0032	-0,0017	0,0005	0,0035	-0,0018	-0,0023	0,0008	-0,0020	0,0005	-0,0013	-0,0029
Differenz	0,0024	0,0013	0,0064	0,0047	0,0124	0,0068	0,0098	0,0031	0,0051	0,0022	0,0090	0,0380	0,0108
MAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
NAWAROs	7,9542	3,6730	9,6220	11,6019	18,5972	0,0000	9,7677	8,3285	5,8172	11,1791	7,9908	0,7694	6,6346
Transport	3,6309	3,0056	0,6369	0,8169	1,1701	1,9744	1,9163	0,8376	6,6149	2,2183	1,2104	9,3746	5,3455
Infrastruktur	9,7538	9,4028	17,3080	9,8853	24,1890	15,0878	22,2623	11,4975	8,1855	7,2702	13,8804	41,3984	22,1774
Betrieb BGA	0,4742	0,3432	0,4135	0,5783	1,3914	0,0000	0,7230	0,5200	0,3400	0,5080	0,5306	0,1757	3,6657
BHKW	0,1506	0,2850	0,3879	0,4371	0,3957	0,2676	0,1854	0,2602	0,4151	0,1849	0,2984	0,4323	0,6152
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	3,2815	4,8733	1,4866	2,6690	2,3244	3,0455	3,3374	1,8876	1,3047	2,8019	2,1577	4,9631	5,8278
REF NAWAROS	-6,4117	-2,9660	-11,2871	-13,7835	-15,2230	0,0000	-7,9956	-8,0994	-5,6618	-15,5516	-4,0381	-0,6189	-5,3914
REF WD	-0,5380	-3,3842	-0,6036	-0,6531	-1,0039	-1,5957	-1,6817	-0,6710	-0,9010	-0,4452	-2,7204	0,0000	-5,1024
REF AF	-2,5194	-3,9889	0,0000	0,0000	-1,3891	-19,9180	-2,1649	0,0000	-1,0229	0,0000	-2,9633	-17,5986	0,0000
GS Wärme	-3,4649	-21,5301	-22,2633	-3,2797	-17,4330	-18,2793	-7,2625	-4,6140	-20,0542	-1,7373	0,0000	0,0000	-6,3187
GS Dünger	-15,6272	-9,3350	-11,1458	-5,9254	1,7477	12,4339	-6,3858	-7,9933	2,6617	-7,1073	1,9331	-4,4643	-10,1207
Differenz	-3,3162	-19,6214	-15,4449	2,3467	14,7665	-6,9838	12,7015	1,9535	-2,3008	-0,6790	18,2796	34,4316	17,3328

Tabelle 45 (Fortsetzung)

TAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	3,18E-04	1,60E-04	2,20E-04	0,00E+00	1,90E-04	2,55E-04	6,84E-04	5,08E-04	7,90E-05	2,18E-04	1,24E-04	9,76E-05	2,67E-04
Transport	1,03E-05	2,18E-04	1,09E-05	5,20E-05	1,39E-05	1,55E-05	1,51E-05	1,59E-05	3,51E-05	1,04E-05	5,95E-04	3,28E-06	2,42E-05
Infrastruktur	2,70E-04	1,62E-04	3,39E-04	3,41E-04	1,38E-04	1,42E-04	2,72E-04	1,50E-04	2,04E-04	2,85E-04	2,35E-04	4,03E-04	1,90E-03
Betrieb BGA	7,72E-06	6,07E-06	8,04E-06	0,00E+00	1,02E-06	6,17E-06	4,15E-06	3,39E-06	1,05E-06	6,93E-06	3,34E-06	2,23E-05	1,30E-05
BHKW	3,79E-06	2,16E-06	5,06E-06	4,12E-06	3,42E-06	2,04E-06	3,35E-06	3,72E-06	2,64E-06	4,65E-06	4,31E-06	2,61E-06	5,28E-06
GR Lagerung	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
GR Ausbringung	5,24E-05	4,16E-05	4,68E-06	1,00E-04	3,93E-05	2,71E-05	1,61E-05	2,80E-05	3,29E-05	2,61E-05	5,05E-05	5,15E-05	1,22E-04
REF NAWAROS	-2,50E-04	-1,48E-04	-2,62E-04	0,00E+00	-1,53E-04	-2,06E-04	-1,99E-04	-6,51E-04	-6,35E-05	-1,75E-04	-7,85E-05	-7,84E-05	-2,14E-04
REF WD	-3,70E-05	-4,16E-05	0,00E+00	-5,69E-05	-2,43E-05	-1,53E-05	-8,65E-06	-5,09E-06	-2,13E-05	-1,21E-05	-2,41E-05	-1,48E-05	-5,06E-05
REF AF	0,00E+00	-2,95E-04	-1,75E-04	-3,54E-04	0,00E+00	0,00E+00	-6,18E-05	0,00E+00	-1,70E-04	0,00E+00	-9,00E-04	-9,86E-04	-1,61E-03
GS Wärme	-1,58E-04	-1,20E-03	-1,47E-03	-1,31E-03	-1,16E-04	-4,29E-05	-8,48E-04	-4,52E-04	-8,10E-04	-5,49E-04	-1,02E-03	-1,24E-03	-1,17E-03
GS Dünger	-1,27E-04	-9,73E-05	5,76E-05	-2,49E-04	-1,75E-04	-1,17E-04	-1,87E-04	-2,46E-04	2,97E-05	-4,75E-04	1,54E-04	-5,11E-04	-5,58E-04
Differenz	9,08E-05	-1,19E-03	-1,27E-03	-1,48E-03	-8,26E-05	6,64E-05	-3,09E-04	-6,46E-04	-6,80E-04	-6,60E-04	-8,54E-04	-2,25E-03	-1,27E-03
FAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	0,0042	0,0022	0,0028	0,0000	0,0028	0,0042	0,0111	0,0073	0,0011	0,0036	0,0022	0,0016	0,0039
Transport	0,0004	0,0036	0,0002	0,0007	0,0005	0,0006	0,0005	0,0006	0,0007	0,0004	0,0081	0,0001	0,0004
Infrastruktur	0,0081	0,0059	0,0142	0,0142	0,0041	0,0042	0,0284	0,0044	0,0062	0,0086	0,0086	0,0147	0,1316
Betrieb BGA	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0003	0,0001
BHKW	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	0,0017	0,0014	0,0001	0,0032	0,0014	0,0009	0,0005	0,0009	0,0011	0,0009	0,0016	0,0016	0,0040
REF NAWAROS	-0,0031	-0,0019	-0,0031	0,0000	-0,0023	-0,0033	-0,0029	-0,0085	-0,0009	-0,0029	-0,0014	-0,0013	-0,0031
REF WD	-0,0013	-0,0014	0,0000	-0,0018	-0,0008	-0,0005	-0,0003	-0,0002	-0,0007	-0,0004	-0,0008	-0,0005	-0,0017
REF AF	0,0000	-0,0010	-0,0006	-0,0012	0,0000	0,0000	-0,0002	0,0000	-0,0006	0,0000	-0,0031	-0,0034	-0,0056
GS Wärme	-0,0007	-0,0052	-0,0064	-0,0057	-0,0005	-0,0002	-0,0037	-0,0020	-0,0035	-0,0024	-0,0044	-0,0054	-0,0051
GS Dünger	-0,0014	-0,0010	0,0006	-0,0027	-0,0019	-0,0013	-0,0020	-0,0026	0,0003	-0,0051	0,0017	-0,0055	-0,0060
Differenz	0,0081	0,0026	0,0080	0,0067	0,0033	0,0046	0,0315	0,0001	0,0038	0,0028	0,0124	0,0022	0,1186
MAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
NAWAROs	9,6701	5,0210	6,6259	0,0000	5,7935	9,3495	6,2519	17,1057	2,0291	7,9461	8,2896	3,5633	9,0569
Transport	1,3915	14,2251	0,6387	2,7925	1,8871	2,0951	2,0417	2,1554	2,8205	1,4085	32,5952	0,4452	1,4462
Infrastruktur	24,7802	11,0568	20,8201	20,8935	7,5015	7,7279	29,2176	8,6390	11,4343	17,3019	17,6926	30,2955	167,8151
Betrieb BGA	0,6780	0,5471	0,8111	0,0000	0,0729	0,5376	0,3880	0,3420	0,1056	0,6342	0,2890	2,1559	1,1837
BHKW	0,3918	0,2229	0,5230	0,4261	0,3539	0,2106	0,3464	0,3846	0,2732	0,4813	0,4461	0,2697	0,5462
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	5,0091	4,3700	0,3279	8,3584	4,5775	2,7375	1,4222	2,8635	3,4556	2,6404	4,4590	3,6115	11,6972
REF NAWAROS	-7,3079	-4,0592	-8,2443	0,0000	-4,6813	-7,5556	-6,3424	-23,0286	-1,6431	-6,4060	-3,2977	-2,8745	-7,2846
REF WD	-4,0286	-4,8074	0,0000	-4,7435	-2,8254	-1,5487	-0,7631	-0,5202	-2,2398	-1,3796	-2,2925	-1,1310	-4,8368
REF AF	0,0000	-7,2984	-4,3250	-8,7514	0,0000	0,0000	-1,5276	0,0000	-4,1960	0,0000	-22,2516	-24,3575	-39,8175
GS Wärme	-5,6328	-42,7470	-52,6393	-46,8756	-4,1591	-1,5302	-30,2689	-16,1522	-28,9197	-19,6036	-36,3291	-44,4338	-41,8849
GS Dünger	-4,8408	-3,7009	2,1904	-9,4604	-6,6585	-4,4644	-7,1134	-9,3656	1,1294	-18,0512	5,8517	-19,4396	-21,2221
Differenz	20,1107	-27,1700	-33,2714	-37,3604	1,8620	7,5592	-6,3475	-17,5764	-15,7508	-15,0281	5,4523	-51,8954	76,6993

Tabelle 45 (Fortsetzung)

TAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	2,50E-04	0,00E+00	1,22E-04	3,72E-04	2,59E-04	0,00E+00	4,73E-04	3,44E-04	3,24E-04	2,78E-04	1,60E-04	0,00E+00	2,98E-04	2,43E-04	4,12E-04
Transport	7,18E-06	2,91E-04	5,59E-04	1,65E-05	2,22E-05	8,65E-06	1,39E-06	2,67E-05	8,18E-05	1,59E-05	3,53E-05	6,81E-05	1,33E-06	5,37E-05	1,80E-05
Infrastruktur	3,55E-04	4,22E-04	3,65E-04	2,86E-04	1,98E-04	1,85E-03	8,27E-04	3,08E-04	3,10E-04	1,34E-04	2,43E-04	2,41E-04	6,88E-04	4,09E-04	1,67E-04
Betrieb BGA	1,05E-05	0,00E+00	5,29E-07	1,27E-05	1,16E-05	8,34E-06	1,68E-05	8,13E-06	1,86E-05	3,42E-06	6,46E-06	1,80E-06	1,07E-05	6,64E-06	4,42E-06
BHKW	4,46E-06	1,68E-06	4,05E-06	6,88E-06	1,21E-06	6,08E-06	5,85E-04	4,20E-06	5,44E-06	1,00E-06	2,06E-06	1,04E-04	5,82E-06	6,44E-05	1,38E-06
GR Lagerung	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
GR Ausbringung	6,48E-05	2,50E-05	2,12E-05	4,10E-05	5,66E-05	7,13E-05	9,44E-05	2,65E-05	2,81E-05	2,02E-05	2,03E-05	1,46E-04	4,46E-05	3,14E-05	2,55E-05
REF NAWAROS	-1,35E-04	0,00E+00	-9,83E-05	-2,99E-04	-1,58E-04	0,00E+00	-3,79E-04	-3,41E-04	-2,55E-04	-4,01E-04	-1,06E-04	0,00E+00	-2,36E-04	-1,61E-04	-4,87E-04
REF WD	-6,21E-05	-2,69E-06	-2,15E-05	-1,57E-05	-7,76E-05	0,00E+00	-8,43E-05	-8,73E-06	-1,37E-05	0,00E+00	-9,38E-06	-1,14E-04	-5,78E-05	-1,64E-05	0,00E+00
REF AF	-4,34E-05	-5,86E-04	-5,10E-04	0,00E+00	-7,30E-05	-4,54E-04	-1,40E-04	0,00E+00	-1,98E-04	0,00E+00	-3,09E-04	-5,03E-04	-5,29E-05	-4,25E-04	0,00E+00
GS Wärme	-8,70E-04	-1,42E-03	-1,94E-04	0,00E+00	-6,85E-04	-2,01E-03	-1,71E-03	-5,87E-04	-1,48E-04	-4,36E-04	-1,06E-04	-1,39E-04	-1,07E-03	-3,59E-04	-6,32E-05
GS Dünger	2,17E-04	-1,66E-04	-5,19E-05	-4,88E-04	-1,06E-05	1,67E-04	2,35E-04	-3,09E-04	-2,08E-04	-2,29E-04	-1,02E-04	1,47E-04	7,35E-06	-7,85E-05	-2,33E-04
Differenz	-2,01E-04	-1,44E-03	1,95E-04	-6,78E-05	-4,56E-04	-3,61E-04	-7,78E-05	-5,29E-04	-5,55E-05	-6,13E-04	-1,66E-04	-4,75E-05	-3,61E-04	-2,31E-04	-1,55E-04
FAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	0,0036	0,0000	0,0016	0,0043	0,0038	0,0000	0,0053	0,0052	0,0038	0,0047	0,0026	0,0000	0,0037	0,0036	0,0052
Transport	0,0003	0,0039	0,0082	0,0006	0,0008	0,0003	0,0001	0,0009	0,0013	0,0006	0,0005	0,0010	0,0000	0,0019	0,0007
Infrastruktur	0,0129	0,0194	0,0133	0,0085	0,0065	0,1401	0,0244	0,0081	0,0113	0,0059	0,0073	0,0082	0,0244	0,0122	0,0046
Betrieb BGA	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0002	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000
BHKW	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0068	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0012	0,0001	0,0008	0,0000
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	0,0021	0,0008	0,0007	0,0013	0,0019	0,0023	0,0029	0,0009	0,0009	0,0007	0,0006	0,0048	0,0014	0,0010	0,0009
REF NAWAROS	-0,0021	0,0000	-0,0013	-0,0035	-0,0023	0,0000	-0,0043	-0,0049	-0,0031	-0,0057	-0,0019	0,0000	-0,0030	-0,0025	-0,0059
REF WD	-0,0020	-0,0001	-0,0007	-0,0005	-0,0027	0,0000	-0,0025	-0,0003	-0,0004	0,0000	-0,0003	-0,0038	-0,0018	-0,0005	0,0000
REF AF	-0,0002	-0,0020	-0,0018	0,0000	-0,0003	-0,0016	-0,0005	0,0000	-0,0007	0,0000	-0,0011	-0,0018	-0,0002	-0,0015	0,0000
GS Wärme	-0,0038	-0,0062	-0,0008	0,0000	-0,0030	-0,0088	-0,0074	-0,0026	-0,0006	-0,0019	-0,0005	-0,0006	-0,0047	-0,0016	-0,0003
GS Dünger	0,0023	-0,0018	-0,0006	-0,0053	-0,0001	0,0018	0,0025	-0,0033	-0,0022	-0,0025	-0,0011	0,0016	0,0001	-0,0008	-0,0025
Differenz	0,0134	0,0140	0,0187	0,0058	0,0048	0,1344	0,0274	0,0041	0,0105	0,0018	0,0063	0,0107	0,0203	0,0126	0,0027
MAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
NAWAROs	13,4082	0,0000	3,4093	9,2375	14,4346	0,0000	12,3511	12,6042	9,2649	10,9686	6,3345	0,0000	8,6773	8,2995	12,3925
Transport	0,9736	15,6930	32,8657	2,2322	3,0047	1,1729	0,1891	3,2966	5,1344	2,1541	1,9823	3,8713	0,1805	7,2859	2,4461
Infrastruktur	26,6914	27,5412	27,4417	26,1614	11,3939	169,5680	55,0803	16,9896	23,2797	8,2107	22,2748	15,5412	39,3799	37,4494	8,6851
Betrieb BGA	0,9814	0,0000	0,0534	1,1336	0,9230	0,8408	1,6040	0,6538	1,8790	0,2878	0,5913	0,1812	0,9767	0,5113	0,3383
BHKW	0,4616	0,1737	0,4185	0,7114	0,1254	0,6283	59,1658	0,4345	0,5629	0,1036	0,2131	10,5678	0,6016	6,5223	0,1427
GR Lagerung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
GR Ausbringung	5,9789	2,3898	2,1375	3,7866	5,9545	7,0238	6,2888	2,6799	2,3443	2,0814	1,4593	14,7156	3,1252	2,4328	2,6848
REF NAWAROS	-4,5852	0,0000	-2,7568	-7,4741	-4,9688	0,0000	-9,9285	-12,6164	-7,2017	-15,5688	-4,2520	0,0000	-6,5677	-5,3744	-15,9201
REF WD	-5,8565	-0,2573	-2,4801	-1,4696	-9,0727	0,0000	-5,6290	-0,8821	-1,1532	0,0000	-0,6826	-11,7386	-4,3019	-1,2678	0,0000
REF AF	-1,0730	-14,4718	-12,6075	0,0000	-1,8028	-11,2204	-3,4706	0,0000	-4,9020	0,0000	-7,6462	-12,4242	-1,3061	-10,5081	0,0000
GS Wärme	-31,0482	-50,8409	-6,9393	0,0000	-24,4673	-71,8984	-60,9424	-20,9641	-5,2773	-15,5833	-3,7991	-4,9668	-38,1918	-12,8213	-2,2575
GS Dünger	8,2579	-6,3231	-1,9756	-18,5810	-0,4019	6,3663	8,9577	-11,7504	-7,9274	-8,6925	-3,8632	5,5975	0,2797	-2,9842	-8,8507
Differenz	14,1903	-26,0954	39,5668	15,7380	-4,8773	102,4811	63,6663	-9,5544	16,0036	-16,0385	12,6122	21,3450	2,8533	29,5454	-0,3388

Tabelle 46: Kenndaten sowie Detailergebnisse des Holz-Systems für die Wirkungskategorien ADP, GWP, AP, EP, POCP und ODP

Kenndaten	1	2	3	4					
Substrat [Srm/a]	243054	232906	255689	84430					
Pinst [MW _{el}]	5	5	5	1,97					
Nettostromprod. [MWh/a]	42080	37292	36288	13790					
ADP [kg Sb-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	GWP [kg CO ₂ -eq./kWh _{el}]	1	2	3	4
NAWAROs	2,62E-04	2,92E-04	3,53E-04	1,68E-04	NAWAROs	0,0384	0,0432	0,0517	0,0249
Transport	1,74E-04	1,71E-04	1,55E-04	6,85E-05	Transport	0,0238	0,0234	0,0212	0,0094
Betrieb Anlage	1,68E-05	2,11E-05	5,68E-06	2,41E-04	Betrieb Anlage	0,0025	0,0031	0,0013	0,0496
Backup-System	1,42E-05	5,09E-05	0,00E+00	0,00E+00	Backup-System	0,0003	0,0011	0,0000	0,0000
Infrastruktur	7,17E-05	8,09E-05	8,37E-05	2,39E-05	Infrastruktur	0,0078	0,0088	0,0091	0,0027
GS Wärme	-6,24E-04	-7,84E-04	-3,13E-03	-3,88E-03	GS Wärme	-0,0870	-0,1093	-0,4368	-0,5402
Ref NAWAROs	-5,57E-05	-1,13E-04	-5,24E-05	-1,23E-04	Ref NAWAROs	-0,0084	-0,0168	-0,0079	-0,0180
DIF	-1,42E-04	-2,80E-04	-2,59E-03	-3,50E-03	DIF	-0,0225	-0,0464	-0,3613	-0,4716
AP [kg SO ₂ -eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	EP [kg PO ₄ -eq./kWh _{el}]	1	2	3	4
NAWAROs	3,35E-04	3,56E-04	4,63E-04	2,01E-04	NAWAROs	6,56E-05	7,64E-05	8,64E-05	4,16E-05
Transport	1,70E-04	1,68E-04	1,52E-04	6,69E-05	Transport	2,76E-05	2,72E-05	2,46E-05	1,08E-05
Betrieb Anlage	6,63E-04	2,37E-03	7,22E-04	2,05E-03	Betrieb Anlage	1,32E-04	4,55E-04	1,41E-04	4,99E-04
Backup-System	9,30E-06	1,87E-05	0,00E+00	0,00E+00	Backup-System	1,45E-06	2,51E-06	0,00E+00	0,00E+00
Infrastruktur	6,50E-05	7,34E-05	7,56E-05	1,11E-05	Infrastruktur	6,81E-06	7,68E-06	7,94E-06	2,26E-06
GS Wärme	-2,40E-04	-3,02E-04	-1,21E-03	-1,49E-03	GS Wärme	-2,74E-05	-3,44E-05	-1,37E-04	-1,70E-04
Ref NAWAROs	-6,44E-05	-1,32E-04	-6,05E-05	-1,49E-04	Ref NAWAROs	-1,55E-05	-3,06E-05	-1,45E-05	-2,89E-05
DIF	9,38E-04	2,55E-03	1,45E-04	6,85E-04	DIF	1,90E-04	5,04E-04	1,08E-04	3,55E-04
POCP [kg C ₂ H ₄ -eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	ODP [kg CFC-11-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4
NAWAROs	1,28E-05	1,77E-05	1,53E-05	1,06E-05	NAWAROs	4,72E-09	5,29E-09	6,34E-09	3,04E-09
Transport	4,57E-06	4,50E-06	4,11E-06	1,87E-06	Transport	3,31E-09	3,27E-09	2,94E-09	1,28E-09
Betrieb Anlage	4,27E-06	5,53E-06	1,04E-05	3,82E-05	Betrieb Anlage	3,47E-10	4,53E-10	1,34E-10	2,55E-09
Backup-System	2,10E-07	7,46E-07	0,00E+00	0,00E+00	Backup-System	2,75E-10	9,87E-10	0,00E+00	0,00E+00
Infrastruktur	5,03E-06	5,67E-06	5,86E-06	1,47E-06	Infrastruktur	5,59E-10	6,31E-10	6,51E-10	1,35E-10
GS Wärme	-1,71E-05	-2,15E-05	-8,58E-05	-1,06E-04	GS Wärme	-1,11E-08	-1,39E-08	-5,56E-08	-6,88E-08
Ref NAWAROs	-4,11E-06	-7,84E-06	-3,87E-06	-7,24E-06	Ref NAWAROs	-1,01E-09	-2,04E-09	-9,53E-10	-2,21E-09
DIF	5,68E-06	4,83E-06	-5,40E-05	-6,13E-05	DIF	-2,88E-09	-5,33E-09	-4,65E-08	-6,40E-08

Tabelle 47: Detailergebnisse für das Holz-System für die Wirkungskategorien HTP, TAETP, FAETP, MAETP und LUC

HTP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	TAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh]	1	2	3	4
NAWAROs	0,0242	0,0261	0,0330	0,0140	NAWAROs	1,32E-04	1,86E-04	1,56E-04	1,01E-04
Transport	0,0067	0,0064	0,0070	0,0046	Transport	7,20E-05	7,07E-05	6,57E-05	3,10E-05
Betrieb Anlage	0,0052	0,0101	0,0038	0,0153	Betrieb Anlage	8,55E-06	1,23E-05	5,03E-06	9,05E-04
Backup-System	0,0002	0,0008	0,0000	0,0000	Backup-System	1,88E-06	6,76E-06	0,00E+00	0,00E+00
Infrastruktur	0,0313	0,0353	0,0363	0,0013	Infrastruktur	2,19E-04	2,47E-04	2,55E-04	4,74E-05
GS Wärme	-0,0187	-0,0235	-0,0940	-0,1162	GS Wärme	-4,21E-04	-5,29E-04	-2,12E-03	-2,62E-03
Ref NAWAROs	-0,0048	-0,0097	-0,0045	-0,0101	Ref NAWAROs	-4,43E-05	-8,35E-05	-4,16E-05	-6,48E-05
DIF	0,0441	0,0455	-0,0183	-0,0913	DIF	-3,21E-05	-9,00E-05	-1,68E-03	-1,60E-03
FAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh _{el}]	1	2	3	4	MAETP [kg 1,4-DCB-eq./kWh]	1	2	3	4
NAWAROs	0,0030	0,0040	0,0037	0,0021	NAWAROs	5,7969	6,4941	7,7985	3,7906
Transport	0,0011	0,0011	0,0011	0,0006	Transport	3,9167	3,7785	3,9215	2,3049
Betrieb Anlage	0,0278	0,0471	0,0216	0,0353	Betrieb Anlage	15,2272	25,5832	11,6862	28,4901
Backup-System	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	Backup-System	0,1905	0,6843	0,0000	0,0000
Infrastruktur	0,0042	0,0048	0,0049	0,0013	Infrastruktur	7,2316	8,1600	8,4350	2,5089
GS Wärme	-0,0018	-0,0023	-0,0092	-0,0114	GS Wärme	-15,0433	-18,8957	-75,5156	-93,3981
Ref NAWAROs	-0,0009	-0,0017	-0,0008	-0,0014	Ref NAWAROs	-1,2345	-2,4978	-1,1604	-2,7824
DIF	0,0335	0,0531	0,0214	0,0266	DIF	16,0851	23,3067	-44,8348	-59,0860
LUC [m ² * a ⁻¹ /kWh _{el}]	1	2	3	4					
NAWAROs	0,5942	1,2368	0,5586	2,4186					
Transport	0,0005	0,0005	0,0007	0,0005					
Betrieb Anlage	0,0002	0,0003	0,0001	0,0293					
Backup-System	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000					
Infrastruktur	0,0009	0,0010	0,0011	0,0009					
GS Wärme	-0,0269	-0,0338	-0,1351	-0,1672					
Ref NAWAROs	-0,2970	-0,6184	-0,2792	-2,1760					
DIF	0,2719	0,5865	0,1461	0,1062					

10. Abkürzungsverzeichnis

Allgemein

BHKW Blockheizkraftwerk

BtL Biomass to Liquid

CFCs chlorofluorocarbon, englisch für FCKW

CSB Chemischer Sauerstoff Bedarf

FCKW Fluorchlorkohlenwasserstoffe

FT Fischer Tropsch Synthese

IPCC International Panel on Climate Change

NAWAROs Nachwachsende Rohstoffe

NMVOC Non-Methane Volatile Organic Compounds, flüchtige organische Verbindungen mit Ausnahme von Methan

OTS organische Trockensubstanz

PAH polycyclic aromatic hydrocarbon, Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

PM10 particulate matter, Feinstaubfraktion, die Partikel $\leq 10 \mu\text{m}$ umfasst

PSH15 Produktive Systemstunde inklusive Unterbrechungen kleiner 15 Minuten, Einheit [h]

SCNR selektive nicht katalytische Reduktion

SCR selektive katalytische Reduktion

Srm Schüttraummeter, gebräuchliche Einheit für Schüttgut (z.B. Hackschnitzel)

TS Trockensubstanz

Wirkungskategorien

ADP Abiotic Depletion Potential, Erschöpfung abiotischer Ressourcen, [kg Sb.-eq.]

GWP Global Warming Potential, Treibhauspotential, [kg CO₂-eq.]

AP Acidification Potential, Versauerungspotential, [kg SO₂-eq.]

EP Eutrophication Potential, Eutrophierungspotential, [kg PO₄-eq.]

POCP Photochemical Ozone Creation Potential, Photochemisches Oxidantienbildungspotential, [kg C₂H₄-eq.]

ODP Ozone Depletion Potential, Ozonabbaupotential, [kg CFC-11-eq.]

LUC Land use, competition, Flächenverbrauch, [m²*a⁻¹]

HTP Human Toxicity Potential, Humantoxizität, [kg 1,4-DCB-eq.]

TAETP Terrestrial Ecotoxicity Potential, Terrestrische Ökotoxizität, [kg 1,4-DCB-eq.]

FAETP Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential, Süßwasserökotoxizität [kg 1,4-DCB-eq.]

MAETP Marine Aquatic Ecotoxicity Potential, Salzwasserökotoxizität, [kg 1,4-DCB-eq.]

11. Lebenslauf/CV

Persönliche Daten

Name	Sonja Siegl
Geburtstag	30.09.1982
Geburtsort	Wien
Land	Österreich
Staatsbürgerschaft	österreichisch
Familienstand	verheiratet
Universität	Universität für Bodenkultur Wien

Ausbildung

10/2006-11/2010:	Doktorats-Studium, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Angewandte Mikrobiologie, Department für Biotechnologie. Thema: „Lebenszyklusanalyse von erneuerbaren Energiesystemen.“
10/2001-10/2006:	Diplomstudium Lebensmittel- und Biotechnologie Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)
2005	Auszeichnung der Diplomarbeit zum Thema: „Betrieb und Charakterisierung von mikrobiologischen Brennstoffzellen“ mit dem Klaus Fischer-Innovationspreis für Technik und Umwelt
09/2005-06/2006	ERASMUS-Auslandsstipendium Universitat Autònoma de Barcelona
09/1993-06/2001	AHS (naturw. Realgymnasium), Wien 19, Billrothstraße 26-30 2001 Reifeprüfung mit ausgezeichnetem Erfolg
Wien	November 2010