



Viktoria Leitner

**Die energetische Nutzung von Reststoffbiomasse für eine  
nachhaltige Entwicklung.**

**Ausarbeitung eines für Österreich optimalen  
Verwertungskonzeptes für Wirtschaftsdünger und feste  
agrarische Abfälle.**

**DISSERTATION**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

**Begutachter: Ao. Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Michael Narodoslawsky**

Institut für Prozess- und Partikeltechnik an der Technischen Universität Graz



Graz 2015

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

---

## **Gender Erklärung**

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Dissertation die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet und auf geschlechtsspezifische Differenzierung zum Beispiel Nutzer/Innen verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten in meinem Sinne und im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für beide Geschlechter. Es wird an dieser Stelle außerdem darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

## DANKSAGUNG

Mit diesen letzten Worten, die ich hier zu Papier bringe, beende ich heute einen kurzen, aber bedeutenden Lebensabschnitt. Dass diese Arbeit am Ende erfolgreich abgeschlossen werden konnte, verdanke ich einer Reihe wichtiger Menschen auf diesem oftmals herausfordernden Weg, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Allen voran Dr. Jäger von der FH-Wels der mir, durch die Mitarbeit in seinem Team, die Durchführung meiner Arbeiten ermöglicht hat. Außerdem meinen lieben KollegInnen in Wels, die wichtige wissenschaftliche, wie auch menschliche Beiträge zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben. DANKE - Katharina, Klaus, Peter, Daniel und Manuel.

Dank gilt natürlich auch meinem Betreuer Herrn Prof. Narodslawsky, der meiner Arbeit den letzten Schliff verpasst hat und der durch seine Anregungen eine Idee zu einer fertigen Arbeit erwachsen hat lassen.

Auch meinem geliebten Begleiter durch mein Leben und durch diese wichtige Etappe auf unserem gemeinsamen Weg, möchte ich an dieser Stelle Danke sagen. Lieber Michael ohne dich, deine Geduld, dein Verständnis und deine zahlreichen Motivierungsversuche wäre diese Arbeit wohl noch nicht so schnell fertig geworden.

Aber vor allem möchte ich einer Person danken, die mich fachlich und menschlich entlang dieses Weges begleitet hat. Ohne sie könnte ich heute niemandem Danke sagen:

*Lieber Papa, diese Arbeit widme ich dir!*

diese Arbeit wurde aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln gefördert.



# Kurzfassung

Die Bereitstellung von Energie aus erneuerbaren Quellen ist für eine nachhaltige Entwicklung unumgänglich. Als Alternative zu fossilen Energieträgern steht uns die Nutzung von Sonnenenergie und ihren Derivaten zur Verfügung. Biomasse ist eines dieser nutzbaren Derivate, welche aus einstrahlender Sonnenenergie über den Prozess der Photosynthese entsteht. Für eine nachhaltige Nutzung von Biomasse gilt es zu beachten, dass dem System nur so viel Masse entnommen werden darf wie im selben Zeitraum nachgebildet wird. Der limitierende Faktor bei der Entstehung von Biomasse ist dabei nicht die einstrahlende Sonnenenergie, oder eine geringe Wachstumsgeschwindigkeit sondern die für das Wachstum notwendige Fläche. Die jährlich zur Verfügung stehende Biomasse ist somit limitiert und bei der Entwicklung neuer Nutzungswege ist darauf zu achten, dass bei der Verwertung von Biomasse konkurrierende Interessen zu berücksichtigen sind. Rohstoffe die in Prozessen nicht durch andere ersetzbar sind, sind in der Verwertungskette prioritär zu behandeln. Daraus folgt, dass die energetische Verwertung immer am Ende der Verwertungskette stehen soll, da Energie auch aus anderen Quellen gewinnbar ist. Biomasse, welche für die Energieerzeugung also von besonderem Interesse ist, sind organische Reststoffe aus Haushalt, Industrie und Landwirtschaft. Zwei Reststoffströme mit hohem Mengenpotential sind die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Reststoffe Wirtschaftsdünger und feste agrarische Abfälle. Für diese Biomasse sind keine oder nur sehr wenige alternative Nutzungsformen neben der energetischen Verwertung bekannt. Derzeit wird nur ein sehr geringer Anteil der zur Verfügung stehenden Masse genutzt. In der vorliegenden Arbeit wurden die Vorteile und die bestehenden Herausforderungen bei der energetischen Nutzung dieser Rohstoffe ermittelt. Bei der Entwicklung einer für Österreich optimalen Verwertungsstrategie wurde dabei vor allem auf die Nachhaltigkeit des Systems geachtet. Die konkreten Forschungsfragen, welche in der vorliegenden Arbeit zu behandeln waren lauten:

- Welche Rahmenbedingungen müssen verändert werden um den Anteil des zur Energieproduktion genutzten Flüssigmistes in Österreich deutlich zu erhöhen?
- Kann für Österreichs dezentrale landwirtschaftliche Struktur ein Anlagenkonzept entwickelt werden, welches kostengünstig Flüssigmist vergast?

- Welche Technologien stehen für die energetische Nutzung von Weizenstroh zur Verfügung und wie kann Weizenstroh mit größtmöglicher Ausbeute energetisch verwertet werden?

Für die Beantwortung dieser Fragen galt es zum einen die Österreichischen Rahmenbedingungen bestmöglich zu bestimmen und zum anderen die Schwachpunkte der bereits vorhandenen Verwertungskonzepte zu ermitteln und Lösungsstrategien zu entwerfen. Dabei wurden neben einer ausführlichen Datenerhebung und der Bearbeitung vorhandener wissenschaftlicher Literatur auch eigene Laborversuche durchgeführt.

Für die Verwertung des Flüssigmistes wurde vor allem auf den hohen Wassergehalt und die geringe Energiedichte Rücksicht genommen. Anhand vorhandener Literatur und vorhandener Anlagenkonzepte in Entwicklungsländern wurden Lösungsstrategien für eine in Mitteleuropa anwendbare Low-Tech Technologie erarbeitet. Dabei war die Nutzung vorhandener Infrastruktur in Form der am Hof befindlichen Güllegrube zentrales Element der weiteren Entwicklungsarbeiten. In Güllegruben könnten aufgrund gesetzlicher Vorgaben Verweilzeiten von bis zu sechs Monaten realisiert werden. Derart lange Verweilzeiten sind in industriellen Biogasanlagen aus Kostengründen nicht denkbar. Für diesen speziellen Anwendungsfall müssen optimale Betriebsbedingungen daher erst bestimmt werden. In eigenen Laborversuchen wurde die optimale Betriebstemperatur ermittelt und die Abhängigkeit der Gasausbeute von Temperatur und Verweilzeit bestimmt. Im Rahmen einer ökologischen Bewertung wurde außerdem der ökologische Nutzen einer anaeroben Vergärung von Flüssigmist untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass weniger die Emissionsreduktion während der Lagerung oder Ausbringung, denn die Erzeugung erneuerbarer Energie Vorteile gegenüber der gängigen Praxis bietet. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass die Vergärung der Gülle am Hof aufgrund hoher Transportemissionen ökologische Vorteile gegenüber der Vergärung in einer zentralen Anlage bietet. Auch aus ökonomischer Sicht konnte dieses Ergebnis bestätigt werden.

Für die Verwertung von Weizenstroh wurde die optimale Integration einer Biogasanlage in eine Bioethanolanlage untersucht. Dabei wurde die Ressourceneffizienz des Prozesses ins Zentrum der Untersuchung gerückt. Anhand einer ergebnisoffenen Analyse wurde die Verschaltung mit der höchsten Nettoenergieausbeute ermittelt. Dabei

war für eine lückenlose Bilanzierung die Durchführung eigener Laborversuche notwendig. Die Bestimmung der optimalen Prozesskette wurde durch den Einsatz von Prozessnetzwerksynthese ermöglicht. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten klare Vorteile der Vergasung gegenüber der Erzeugung flüssiger Brennstoffe. Diese Aussage war nur durch den gewählten ergebnisoffenen Ansatz möglich.

# Abstract

The supply of energy from renewables is a prerequisite for a sustainable development of energy markets. As an alternative to fossil energy sources we can use solar energy and its derivatives. Biomass is one of these useable derivatives which originates from solar energy through the process of photosynthesis. To ensure a sustainable use of biomass the extraction rate may not exceed regeneration. The limiting factor in a bio-based society is not the irradiating solar energy or a low growth of the biomass but the surface necessary for growing it. The yearly available biomass is limited and in the development of new ways of utilisation, all competing biomass processes have to be considered. Processes without interchangeable resources have to be treated with the highest priority. Manufacturing processes for energy production are diverse therefore energetic utilisation of biomass should always be the end of the utilisation chain. Biomass resources with great potential for energetic use are organic residues from households, industry and agriculture. Two process streams with large potential are farm fertilizers and solid farm residues. For this biomass none or only few alternatives are known beside energetic utilisation. Currently only a very low portion of the theoretical potential is used.

In the present work the advantages of intensive energetic utilisation as well as the existing challenges of using these organic by-products were determined. A special focus was put on the sustainability of the processes. The specific research questions of the present work are:

- Which basic conditions have to be changed to raise the portion of liquid manure used for energy production in Austria?
- What is a possible installation concept for liquid manure gasification with special regard to Austria's decentralised basic agricultural conditions?
- Which technologies are available for the energetic use of wheat straw and what is the process with the highest energetic yield?

To be able to answer these questions the basic circumstances of Austrian agriculture and the weak points of the existing utilization concepts had to be evaluated and solution



strategies had to be established. Therefore own laboratory test were carried out as well as a detailed survey of the available scientific literature.

For the utilisation of the liquid manure the high water content and the low energy density had to be considered. Based on literature results and existing plant concepts in developing countries strategies were compiled for a Low-Tech technology applicable in Central Europe. Using the available infrastructure in the form of the existing liquid manure pit was the central idea of the new plant concept. Due to existing legal requirements, retention times of up to six months could be realized in slurry pits. In industrial biogas plants maximum retention times are limited by economic reasons. Consequently, optimum operating conditions must be determined for this new plant concept. In own laboratory experiments the optimum operating temperature was determined and the dependence of the gas yield on temperature and retention time was determined. Additionally an ecological evaluation of different manure management systems was performed. As a result of the assessment it was shown that the highest ecological impact results from the production of renewable energy and that the on-farm liquid manure digestion is preferable to centralised systems. Transport of liquid manure is ecologically as well as economically critical.

For the utilisation of wheat straw the optimum integration of a biogas plant into a bioethanol facility was examined. The aim of the integrated process was to achieve maximum resource efficiency. With the help of a result-open analysis (process network synthesis) the process chain with the highest net-energy yield was determined. For the process network synthesis input parameters had to be determined by performing own laboratory experiments. The results of the investigation showed clear advantages of gasification compared to the production of liquid fuels.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis .....	XII
Abkürzungsverzeichnis .....	XIV
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung.....	3
1.3 Methodik und Vorgangsweise .....	3
1.4 Abgrenzung zu anderen Arbeiten.....	5
<b>2 NACHHALTIGKEIT - EIN SYSTEM IM WANDEL.....</b>	<b>6</b>
2.1 Das Konzept Nachhaltiger Entwicklung .....	7
2.2 Die ökologische Nachhaltigkeit .....	9
2.2.1 Der Treibhauseffekt .....	9
2.2.2 Der Kohlenstoffkreislauf in Zusammenhang mit nachhaltiger Entwicklung .....	10
2.2.3 Mehrdimensionale ökologische Bewertung mittels Ökobilanz.....	12
2.3 Nachhaltige Energienutzung .....	15
2.3.1 Nachhaltige Energieträger.....	17
2.3.2 Merkmale eines nachhaltigen Energiesystems.....	19
2.3.3 Politisches Bekenntnis zu einer nachhaltigen Energienutzung .....	21
<b>3 BIOMASSE UND IHRE BEDEUTUNG FÜR EINE NACHHALTIGE ENTWICKLUNG.....</b>	<b>25</b>
3.1 Biomasse - Entstehung, Nutzung, Abbau und Nachhaltigkeit.....	25
3.1.1 Kohlenstoffkreislauf und Photosynthese.....	26
3.1.2 Die menschliche Nutzung von Biomasse.....	27
3.2 Der Weg zu einer biobasierten Gesellschaft.....	29
3.2.1 Die kaskadische Nutzung von Biomasse .....	30
3.2.2 Kaskadische Rohstoffnutzung – das Bioraffineriekonzept .....	31
3.3 Organische Reststoffe.....	32
3.3.1 Energetische Verwertung organischer Reststoffe .....	32
3.4 Biotechnologische Verfahren für die energetische Nutzung von Biomasse.....	34
3.5 Die Bewertung der Nachhaltigkeit von Biomasse Verwertung .....	35

<b>4</b>	<b>ALLGEMEINE GRUNDLAGEN DER BIOGAS- UND BIOETHANOLERZEUGUNG .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Methanfermentation .....</b>	<b>35</b>
4.1.1	Begriffbestimmungen .....	35
4.1.2	Klassifizierung von Biogasanlagen .....	37
4.1.3	Biochemische Grundlagen der Biogaserzeugung .....	41
4.1.4	Verwertungsmöglichkeiten von erzeugtem Biogas .....	46
4.1.5	Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen .....	50
4.1.6	Entwicklung von Biogasanlagen in Österreich und Europa .....	52
<b>4.2</b>	<b>Bioethanolerzeugung .....</b>	<b>57</b>
4.2.1	Einleitung .....	57
4.2.2	Bioethanolherstellung .....	57
4.2.3	Die Verwertung von Lignocellulose .....	59
4.2.4	Vorbehandlung von Biomasse für die biotechnologische Verwertung .....	60
4.2.5	Hydrolyse .....	62
4.2.6	Fermentation .....	63
4.2.7	Produktabtrennung .....	64
4.2.8	Wirtschaftlichkeit von Lignocelluloseethanolanlagen .....	65
4.2.9	Entwicklung von Lignocelluloseethanolanlagen in Europa und der Welt .....	68
<b>4.3</b>	<b>Bioethanol versus Biogas als alternativer Treibstoff .....</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Laborversuche zu anaeroben Vergärung .....</b>	<b>72</b>
5.1.1	Batch Versuche nach VDI 4630 .....	72
5.1.2	Kontinuierliche Labor Biogasversuche .....	74
5.1.3	Mathematische Ermittlung des Biogasertragstests .....	76
5.1.4	Mathematische Gasertragsbestimmung nach dem Modell von Hill .....	77
<b>5.2</b>	<b>Laborversuche zur Verwertung von Weizenstroh .....</b>	<b>80</b>
5.2.1	Vorbehandlung .....	80
5.2.2	Bestimmung des Massenverlustes während der Vorbehandlung .....	81
5.2.3	Verzuckerung .....	82
5.2.4	Fest/Flüssig Trennung .....	82
5.2.5	Fermentation .....	82
<b>5.3</b>	<b>Substratcharakterisierung .....</b>	<b>83</b>
<b>5.4</b>	<b>Energetische Prozessoptimierung .....</b>	<b>83</b>
<b>5.5</b>	<b>Ökologische Prozessbewertung .....</b>	<b>84</b>
<b>5.6</b>	<b>Analytik und sonstige Methoden .....</b>	<b>86</b>
5.6.1	Bestimmung von Trockenmasse- und organischem Trockenmassegehalt .....	86
5.6.2	Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfes .....	86
5.6.3	Bestimmung des pH-Wertes .....	86
5.6.4	Bestimmung des FOS/TAC Wertes .....	86
5.6.5	Bestimmung von organischen Säuren und Zuckern .....	87
5.6.6	Bestimmung von Kohlenhydraten und Lignin in Biomasse .....	87

<b>6</b>	<b>ENERGETISCHE VERWERTUNG VON WIRTSCHAFTSDÜNGER.....</b>	<b>88</b>
6.1	Allgemeine Grundlagen .....	89
6.2	Status quo der Wirtschaftsdüngerverwertung in Österreich .....	91
6.2.1	Ermittlung österreichischen landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen .....	91
6.2.2	Stand der Technik beim Wirtschaftsdüngermanagement .....	95
6.2.3	Der Transport von flüssigem Wirtschaftsdünger .....	101
6.3	Energetische Wirtschaftsdüngerverwertung in Österreich, Europa und der Welt .....	102
6.4	Motivation und Hindernisse für die anaerobe Fermentation von Wirtschaftsdünger .....	104
6.4.1	Das ungenutzte Energiepotential.....	104
6.4.2	Ökologische Interessen .....	106
6.4.3	Soziale Interessen.....	106
6.4.4	Ökonomische Interessen .....	107
6.4.5	Ökonomische Limitierungen.....	108
6.5	Charakterisierung von Kleinanlagen in ruralen Entwicklungsregionen .....	108
6.6	Biogas aus Wirtschaftsdünger – das Anlagenkonzept .....	112
6.6.1	Identifizierung der wichtigsten Investitions- und Betriebskosten von Biogasanlagen.....	113
6.6.2	Reduktion der Anlagenkosten durch Nutzung vorhanden Infrastruktur .....	115
6.6.3	Reduktion der Betriebskosten durch wartungsarme Rührtechnik .....	116
6.6.4	Maximierung des Ertrages durch optimierte Nettoenergieausbeute und optimale Gasverwertung .....	118
6.7	Ermittlung der optimalen Fermentationstemperatur für die hofintegrierte anaerobe Vergärung von Wirtschaftsdünger – eigene Versuche und Ergebnisse.....	121
6.7.1	Literaturanalyse.....	121
6.7.2	Substratcharakterisierung.....	122
6.7.3	Ermittlung des Biogaspotentials von Rindergülle bei verschiedenen Temperaturen und Verweilzeiten .....	123
6.7.4	Ermittlung der durchschnittlichen Fermentertemperatur .....	127
6.7.5	Ermittlung der optimalen Fermentertemperatur .....	128
6.7.6	Erweiterung des Systems durch Simulation.....	131
6.8	Ökologische Bewertung hofintegrierter Güllevergärung .....	133
6.8.1	Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen .....	133
6.8.2	Sachbilanz.....	135
6.8.3	Wirkungsabschätzung .....	139
6.8.4	Auswertung und Sensitivitätsanalyse.....	139
6.9	Nachhaltige Güllevergärung – Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick.....	143
<b>7</b>	<b>ENERGETISCHE VERWERTUNG FESTER AGRARISCHER ABFÄLLE</b>	<b>144</b>
7.1	Allgemeine Grundlagen .....	145
7.1.1	Das nachhaltige Strohpotential .....	147
7.2	Energetische Optimierung einer kombinierten Bioethanol und Biogasanlage .....	148

7.2.1	Eckdaten des untersuchten Bioethanolprozesses .....	149
7.2.2	Datenerhebung im Labor .....	151
7.2.3	Prozessoptimierung mittels Prozessnetzwerksynthese.....	159
<b>7.3</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick der energetischen Verwertung von Stroh .....</b>	<b>163</b>
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>164</b>
<b>8.1</b>	<b>Die Energiestrategie von morgen schon heute denken.....</b>	<b>164</b>
<b>8.2</b>	<b>Die Rolle von Biomasse in einer nachhaltigen Energiestrategie.....</b>	<b>165</b>
<b>8.3</b>	<b>Die energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger .....</b>	<b>167</b>
<b>8.4</b>	<b>Die energetische Verwertung fester agrarischer Abfälle .....</b>	<b>169</b>
<b>8.5</b>	<b>Empfehlungen für weiterführende Arbeiten .....</b>	<b>169</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>171</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schnittmengenmodell (links) und Vorrangmodell (rechts) der Nachhaltigkeit .....	8
Abbildung 2 Das Integrierende Nachhaltigkeitsdreieck .....	8
Abbildung 3 Die Energiebilanz der Erde .....	10
Abbildung 4 Der globale Kohlenstoffkreislauf .....	12
Abbildung 5 Globaler Energieverbrauch verschiedener Sektoren .....	15
Abbildung 6 Energieeinsatz der Haushalte nach Sektoren in Österreich (links) und den OECD-Ländern (rechts) .....	16
Abbildung 7 Die Nutzung erneuerbare Energieträger .....	17
Abbildung 8 Vom theoretischen zum erschließbaren Potential .....	18
Abbildung 9 Endenergieverbrauch in Österreich seit 1990 .....	22
Abbildung 10 THG-Einsparungsziele der EU-MS außerhalb des EU-ETS bis zum Jahr 2020..	23
Abbildung 11 Anteil Erneuerbarer Energien (EE) der EU-MS im Jahr 2005 und Ziele für das Jahr 2020. EU-Gesamtziel 20 % .....	24
Abbildung 12 Möglichkeiten der Energiebereitstellung aus Biomasse .....	28
Abbildung 13 Kreislaufwirtschaft veranschaulicht am Beispiel Rundholz .....	30
Abbildung 14 Darstellung von einstufiger und mehrstufiger (zweistufiger) Fermentation .....	40
Abbildung 15: Der anaerobe Abbauprozess von Biomasse zu Biogas .....	41
Abbildung 16 mögliches Temperaturfenster bei mesophiler und Thermophiler Fermentation ..	45
Abbildung 17 Börsenkurs von Mais in den letzten 10 Jahren.....	50
Abbildung 18 Abhängigkeit der Investitionskosten von der inst.elektrischen Leistung .....	51
Abbildung 19 Anteil unterschiedlicher Kategorien an den Gesamtinvestitionskosten in Abhängigkeit der Anlagengröße .....	51
Abbildung 20 Horizontalfermenter – Selbstbau aus dem Jahr 1992 (links) und high-tech Anlage aus dem Jahr 2009 (rechts).....	52
Abbildung 21 Biogaskapazität in Österreich seit dem Jahr 2002.....	53
Abbildung 22 Entwicklung von installierter Leistung [MW], spezifischer Leistung[kW] und Biogasanlagenzahl in Deutschland mit Rücksicht auf EEG-Novellen. ....	54
Abbildung 23 Installierte Biogaskapazität ausgewählter EU-Länder in ktoe in den Jahren 2006-2012.....	55
Abbildung 24 Kernprozess der Lignocelluloseethanol Bioraffinerie.....	59
Abbildung 25 Aufbau der Zellmembran von Pflanzen .....	59
Abbildung 26 REM-Aufnahmen von Stroh unbehandelt (links) mit Dampf gekocht (mitte; 200°C-20min) und mit Steam-Explosion vorbehandelt (rechts; 200°C-20min).....	62
Abbildung 27 Siedediagramm vom Gemisch Ethanol-Wasser .....	64

Abbildung 28 Energiebedarf der Destillation in Abhängigkeit der Ethanolkonzentration im Feed.....	65
Abbildung 29 Beitrag unterschiedlicher Teilprozesse an den Gesamtproduktionskosten .....	66
Abbildung 30 Kilometerleistung verschiedener Biotreibstoffe je Hektar Anbaufläche.....	70
Abbildung 31 Die Entwicklung einer Gesellschaft – vom Kohlenstoff zum Wasserstoff.....	71
Abbildung 32 Gasvolumensmessung mittels Eudiometerrohr. Versuchsapparatur wie in der Literatur abgebildet (links) und wie im Versuch eingesetzt (rechts). .....	73
Abbildung 33 Schematische Darstellung und Foto der kontinuierlichen Labor-Biogasreaktoren .....	75
Abbildung 34 Anlagenskizze Batch-Steamexplosionanlage der FH OOE Campus Wels .....	80
Abbildung 35 Foto von der Batch-Steamexplosionanlage der FH OOE Campus Wels .....	81
Abbildung 36: Darstellung einer Maximalstruktur zur Produktion von Produkt G als P-Graph	84
Abbildung 37 Vergleich der Verteilung von Betrieben und GVE in Abhängigkeit des Viehbestandes bei Rindern .....	92
Abbildung 38 Vergleich der Verteilung von Betrieben und GVE in Abhängigkeit des Viehbestandes bei Schweinen .....	92
Abbildung 39 Statistische Karte des Rinderbestandes nach Gemeinden .....	94
Abbildung 40 Statistische Karte des Schweinebestandes nach Gemeinden .....	94
Abbildung 41 Wiese OptiTwin für dem gleichzeitigen Transport von Schüttgut und Flüssigkeiten. Eine Möglichkeit zur Kostenreduktion bei Gülletransporten.....	102
Abbildung 42 Sammeln von Yak-Dung als Brennstoff im Hochland von Tibet .....	103
Abbildung 43 Verschiedene Typen von Kleinbiogasanlagen in Entwicklungsgebieten.....	109
Abbildung 44 Rechtliche Vorschriften zum Bau einer Biogasanlage in Ö angewendet auf die asiatischen Anlagentypen Janata und Deenbandu.....	111
Abbildung 45: Spezifische Gasgestehungskosten eingeteilt nach Kostenkategorien in Abhängigkeit der Anlagengröße .....	113
Abbildung 46: Querschnitt eines Tiefbehälters mit massiver Decke .....	116
Abbildung 47: Schema zur Berechnung der kürzesten Strecke um einen Punkt .....	119
Abbildung 48 Anhängigkeit der Transportkosten an den Gesamtkosten bei der Verwertung von der gesamten Gülle in einer Region in einem 300 kW <sub>el</sub> BHKW .....	120
Abbildung 49 Tägliche Biogasproduktion bei verschiedenen Prozesstemperaturen und einer Verweilzeit von 33 Tagen. ....	124
Abbildung 50 Tägliche Biogasproduktion bei verschiedenen Prozesstemperaturen und einer Verweilzeit von 66 Tagen. ....	125
Abbildung 51 Biogasertrag in Abhängigkeit der Verweilzeit.....	126
Abbildung 52 Biogasertrag in Abhängigkeit der Temperatur .....	126

Abbildung 53 Vergleich der Außentemperatur (gepunktete Linie) mit der Fermentertemperatur gemessen an drei Stellen .....	127
Abbildung 54 Ergebnisse der Temperaturoptimierung bei winterlichen Bedingungen .....	129
Abbildung 55 Ergebnisse der Temperaturoptimierung bei sommerlichen Bedingungen .....	131
Abbildung 56 Vergleich von Simulationsergebnissen nach Hill und Laborergebnissen .....	132
Abbildung 57 Vergleich von Simulationsergebnissen nach Hill und Laborergebnissen nach Anpassung des Wertes $B_0$ als Funktion von Zeit und Temperatur.....	133
Abbildung 58 Systemgrenzen der untersuchten Prozesse zur Gülleverwertung .....	135
Abbildung 59 SPI für den Systemvergleich bei Rindergülle – Darstellung der Anteile der Teilprozesse .....	141
Abbildung 60 SPI für den Systemvergleich bei Schweinegülle – Darstellung der Anteile der Teilprozesse .....	142
Abbildung 61 Einfluss der Transportdistanz zur Gemeinschaftsanlage auf den SPI.....	143
Abbildung 63 Verfahrensfließbild der untersuchten integrierten Bioethanol und Biogasanlage .....	149
Abbildung 64 Charakterisierung von dampfexplodierten Weizenstroh .....	153
Abbildung 65 Ermittlung der Enzymkinetik von Accellerase® 1500. Bestimmung der Zuckerkonzentration im Hydrolysat. ....	153
Abbildung 66 Untersuchung der Glucoseinhibierung von Accellerase® 1500 .....	154
Abbildung 67 Biogasausbeute des festen Rückstandes nach der Hydrolyse in Abhängigkeit des Restzuckergehaltes.....	158
Abbildung 68 Optimalstruktur ermittelt durch Prozessnetzwerksynthese .....	160
Abbildung 69 Energiebedarf der Teilprozesse bei der Verwertung von Weizenstroh.....	163
Abbildung 70 Die Verwertung von Rohöl .....	166

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 Zieldimensionen der Nachhaltigen Entwicklung .....	9
Tabelle 2: Auswahl einiger bekannter Bewertungsmethoden von Ökobilanzen.....	15
Tabelle 3 jährliches theoretisches Energiepotential erneuerbarer Energieträger .....	18
Tabelle 4 Energie- und Exergiegehalte verschiedener Energieträger in Joule.....	20
Tabelle 5 Realisierbare Potentiale bis 2020 zur Erreichung des 34 % Zieles a .....	24
Tabelle 6 Die wichtigsten menschlichen Nutzungspfade für die Verwertung von Biomasse.....	27
Tabelle 7 Einteilung organischer Reststoffe .....	33
Tabelle 8 Energiedichten verschiedener Biomassen .....	34
Tabelle 9 Häufig eingesetzten Substrate in Biogasanlagen.....	39
Tabelle 10 Typische Biogaserträge häufig eingesetzter Substrate .....	39



Tabelle 11 Vorgaben der Kraftstoffverordnung (BGBl. II Nr. 209/2004).....	49
Tabelle 12 allgemeine Übersicht über physikalische und chemische Vorbehandlungsmethoden .....	60
Tabelle 13 Übersicht über verschiedene Vorbehandlungsmethoden – Wirkungsweise.....	61
Tabelle 14 Einflussparameter auf die Kostenoptimierung bei der Erzeugung von Bioethanol ..	66
Tabelle 15 Methanerträge nach Buswell und Müller für Pentosen und Hexosen .....	77
Tabelle 16 Empfohlene Werte für B0 und BVS.....	78
Tabelle 17 Simulationskonstanten des mathematischen Modells nach Hill .....	79
Tabelle 18 Anzahl der Rinder je Betrieb sortiert nach Betriebsgrößenklassen.....	91
Tabelle 19 Berechnung der anfallenden Flüssigmistmenge je GVE bei Rindern .....	93
Tabelle 20 Berechnung der anfallenden Flüssigmistmenge je GVE bei Schweinen .....	93
Tabelle 21 Energiepotential von Gülle aus verschiedenen Studien .....	105
Tabelle 22 gängige Materialien für Biogas Kleinanlagen.....	110
Tabelle 23 Anteil verschiedener Kostengruppen auf die Gesamtinvestition von Kleinanlagen .	114
Tabelle 24 Biogasertrag von Rindergülle in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit..	124
Tabelle 25 Wichtige Inputgrößen für die Temperaturoptimierung .....	128
Tabelle 26 Nettoenergieertrag in kWh pro Tag.....	129
Tabelle 27 Nettoenergieertrag in kWh pro Tag.....	130
Tabelle 28 Emissionen von Rohgülle bei Lagerung und Ausbringung.....	137
Tabelle 29 Emissionen von vergorener Gülle bei Lagerung und Ausbringung .....	138
Tabelle 30 Ermittlung des Strom und Wärmebedarfs von Biogasanlagen.....	139
Tabelle 31 Ergebnisse der ökologischen Bewertung mit SPionWeb.....	140
Tabelle 32 Korn- und Stroherträge aus dem Jahr 2013.....	146
Tabelle 33 Prozessbedingungen des Modelles.....	150
Tabelle 34 Charakterisierung von Stroh – Trockenmasse.....	151
Tabelle 35 Charakterisierung von Stroh- Kohlenhydrate und Lignin .....	152
Tabelle 36 Massenbilanz über die Vorbehandlung – Kohlenhydrate und Lignin.....	155
Tabelle 37 Charakterisierung der Flüssigfraktion nach der Hydrolyse – eine Massenbilanz .....	155
Tabelle 38 Charakterisierung der Flüssigfraktion nach der Fermentation – eine Massenbilanz.	157
Tabelle 39 Biogasausbeuten und Methangehalte von Stroh und fester Biomasse nach der Hydrolyse.....	157
Tabelle 40 Biogasausbeuten und Methangehalte von Hydrolysat Flüssigkeit nach der Fermentation .....	159
Tabelle 41 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Energieausbeuten bei variierender Ethanolausbeute für den optimierten Ethanolprozess .....	161

Tabelle 42 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Energieausbeuten bei variierender Ethanolausbeute .....	162
Tabelle 43 Vereinfachte Ermittlung erzielbarer Erlöse bei der Methanerzeugung aus Rindergülle .....	168

## Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
AF	Säurekoeffizient (acid coefficient)
AFEX	Ammonia Fibre Expansion
AG	Aktiengesellschaft
Arge	Arbeitsgemeinschaft
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BGA	Biogasanlage
BGBI	Bundesgesetzblatt
BVS	Biodegradeable Volatile Solids
C/N	Kohlenstoff zu Stickstoff Verhältnis
cm	Zentimeter
CNG	Compressed Natural Gas
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DIN	Deutsche Industrie Norm
e.V.	eingetragener Verein
E85	Ethanol 85%
EE	Erneuerbare Energie
EEA	European Environmental Agency
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EN	Europäische Norm
EPA	Environmental Protection Agency
ESEIA	European Sustainable Energy Innovation Alliance
ETBE	Ethyl-tert-butylether
EU	Europäische Union
EU-ETS	Emission Trading System der EU
EU-MS	Mitgliedsstaaten der Europäischen Union
FOS	flüchtige organische Säuren
FPU	Filterpapiereinheiten
g	Gramm
GR	Glukoseverflüssigungsrate
Gt	Gigatonnen
GVE	Großvieheinheit
GWP	greenhouse warming potential (Treibhauspotential)
ha	Hektar
HANPP	Human appropriation of net primary production
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
HVZ	hydraulische Verweilzeit
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
KSG	Klimaschutzgesetz

KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
kW <sub>el</sub>	Kilowatt elektrisch
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft – Wärme Kopplung
L	Liter
LKW	Lastkraftwagen
MFC	Methanemissionskoeffizient
min	Minute
MJ	Megajoule
mL	Milliliter
MÖSt	Mineralölsteuer
MtOE	Millionen Tonnen Öläquivalent
MW	Megawatt
NAWARO	nachwachsende Rohstoffe
NL	Normliter
NPP	Nettoprimärproduktion
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ÖAMTC	Österreichischer Automobil und Touring Club
ÖKL	Österreichisches Kuratorium für Landtechnik
ÖPUL	Österreichisches Program für umweltgerechte Landwirtschaft
ÖSG	Ökostromgesetz
OTM	organische Trockenmasse
ÖVGW	Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach
PAFC	Phosphorsäurebrennstoffzelle
PKW	Personenkraftwagen
PNS	Prozess Netzwerk Synthese
PP	Polypropylen
ppm	parts per million
PVC	Polyvinylchlorid
Q	Volumenstrom Zufluss
REM	Rasterelektronenmikroskop
RI	refractive index (Brechungsindex)
SPI	Sustainable Process Index
TAC	totaler anorganischer Carbonate
TC	totaler Kohlenstoff
tkm	Tonnenkilometer
TM	Trockenmasse
TU	Technische Universität
UV	Ultraviolett
V	(Reaktor)Volumen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDLFUA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V.
VE	vollentsalzt (Wasser)
VFA	volatile fatty acids = FOS
Vol%	Volumsprozent
WHO	World Health Organization
XR	Xyloseverflüssigungsrate
$\eta$	Energieinhalt des Produktes
$\mu\text{m}$	Mikrometer
$\psi$	Exergiegehalt des Produktes

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Im Jahr 1987 veröffentlichte die Umweltkommission der vereinten Nationen unter dem Titel *Our common future* (gl. Brundtland-Report) einen Bericht der die fundamentalen Säulen der nachhaltigen Entwicklung definiert [vgl. Umweltkommission der vereinten Nationen]. Durch die Gleichstellung von Entwicklungszielen auf ökonomischer, sozialer und umweltpolitischer Ebene soll ein gegeneinander ausspielen dieser Interessen verhindert werden. Alle drei Säulen stehen miteinander in Wechselwirkung und eine stabile Entwicklung ist nur möglich, wenn alle Ebenen Berücksichtigung finden [vgl. Weltkommission für Umwelt und Entwicklung 1987]. Der Brundtland-Report ist kein Bericht mit festen definierten Zielen, aber mit dem deutlichen Bekenntnis, dass unser System dahingehend geändert werden muss, dass unser Planet auch für kommende Generationen als Lebensgrundlage dienen kann. Die Erhaltung eines Systems, welches maßgeblich auf die Nutzung fossiler Rohstoffe angewiesen ist, widerspricht dieser Ideologie. Die Bestimmung exakter Öl oder Gas Reserven ist dabei nebensächlich, da dies nur den Zeitpunkt des notwendigen Systemwandels festlegt, an der Tatsache der Notwendigkeit allerdings nichts ändert.

Um langfristig eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten, hat die Europäische Union in verschiedensten Bereichen Nachhaltigkeitsziele definiert. Am bekanntesten ist das 2020 Klima- und Energiepaket. Auf Grundlage dieses Paketes wurden 4 EU-Richtlinien erarbeitet, welche gewährleisten sollen, dass die seitens der EU gesteckten Klima- und Energieziele bis 2020 erreicht werden können. Diese Ziele für 2020, auch bekannt als 20-20-20 targets sind [vgl. Europäische Kommission<sup>a</sup>]:

- 20% Reduktion von Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990
- 20 % Steigerung des Anteils erneuerbarer Energie am Gesamtprimärenergiebedarf
- 20 % Energieeffizienzsteigerung

Noch vor der Erreichung der Ziele wurde bereits im Jahr 2014 vorbereitend auf ein weltweites Klimaabkommen im Jahr 2015 von der EU Kommission ein Nachfolgepaket vorgeschlagen und vom europäischen Rat in etwas abgeänderter Form Ende Oktober

2014 beschlossen. Die darin enthaltenen Ziele bis zum Jahr 2030 lauten (vgl. Europäische Kommission<sup>b</sup>):

- 40 % Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990
- 27 % Anteil Erneuerbarer Energien als verbindliches EU Ziel
- 27 % Energieeinsparungen als unverbindliches EU Ziel

Dieses Reglement muss für eine Wirksamkeit noch zwischen Europäischer Kommission und dem Europäischen Rat konsolidiert werden und vom europäischen Parlament akzeptiert werden. Klar erkennbar ist jedoch der politische Wille, eine Systemänderung weiter voran zu treiben.

Ein wichtiger Baustein am Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung ist die Nutzung erneuerbarer Energieträger. Die energetische Nutzung von Biomasse ist dabei eine Möglichkeit für die nachhaltige Bereitstellung von Energie. Diese spielt vor allem in der kurz- und mittelfristigen Entwicklung eine wichtige Rolle, da vor allem etablierte Technologien für die Energienutzung eingesetzt werden [vgl. Wohlfahrtstätter et al., S.9f; Kaltschmitt et al. 2009, S.V; Sick 2014, S.23f) und alle bekannten Endenergieträger aus Biomasse erzeugt werden können [vgl. Kaltschmitt et al. 2009, S.19].

Das begrenzte Potential von Biomasse verhindert, dass eine Systemänderung alleine durch die Erzeugung erneuerbarer Energie aus Biomasse möglich ist [vgl. Field et al. 2007 S.68ff]. In einer bereits 2006 veröffentlichten Studie der European Environmental Agency (EEA) wird das Potential der durch Biomasse erzeugbaren Primärenergie mit 236 MtOE (Millionen Tonnen Öläquivalent) angegeben, was 13% des angenommenen Primärenergieverbrauches ausmacht [vgl. Europäische Umweltkommission 2006]. Über 40 % der in dieser Studie berücksichtigten Biomasse wird der Kategorie „Abfall“ zugeordnet, wobei landwirtschaftliche, industrielle und Haushaltsabfälle berücksichtigt werden. Derzeit wird nur ein begrenzter Teil des Potentials dieser organischen Reststoffe genutzt. Bei der Erschließung dieser Rohstoffe werden vorhandene Technologien mit neuen Herausforderungen konfrontiert, die erst zum Teil gelöst werden konnten. Besondere Eigenschaften wie geringe Energiedichte, hohe Transport und Lagerkosten und aufwändige biotechnologische Verwertbarkeit verursachen einen hohen ökonomischen Druck bei der Etablierung der Technologien.

Für Österreich sind die bedeutendsten Reststoffbiomasseströme Abfälle aus der Holzverarbeitungsindustrie (41,6%), Schwarzlauge (12,5%), Flüssigmist (11,5%) und

festen agrarischen Abfälle (10,4%) [vgl. Europäische Umweltkommission 2006, S.49] . In dieser Arbeit wurde die nachhaltige energetische Nutzung von Flüssigmist und festen agrarischen Abfällen genauer untersucht. Es sollte durch diese Arbeit ein Beitrag geleistet werden, den Nutzungsgrad dieser potentiellen Rohstoffe zu erhöhen. Dabei wurden ökonomische, ökologische und soziale Chancen und Risiken erhoben und diskutiert.

## **1.2 Problemstellung**

Da Biomasse neben der Energieproduktion viele andere Interessen abdecken muss und die für den Anbau notwendige Fläche limitiert ist, steht für Energieproduktion nur eine begrenzte Menge zur Verfügung (vgl. Kapitel 3). Es muss daher angestrebt werden, die gesamten zur Verfügung stehenden organischen Stoffströme, stofflich oder energetisch zu nutzen. Dabei ist der volkswirtschaftliche Nutzen bezogen auf die verbrauchte Fläche zu optimieren. Auf ökologische Grenzen ist dabei im Speziellen Rücksicht zu nehmen. Auch anfallende organische Abfall- und Nebenströme müssen verwertet werden. In Kapitel 1.1 wurden die in Österreich mengenmäßig bedeutendsten Reststoffströme bereits angeführt. In dieser Arbeit erfolgte die Einschränkung auf die Reststoffe Wirtschaftsdünger und Weizenstroh (als Vertreter fester agrarischer Abfall). Im Vordergrund steht in der vorliegenden Arbeit die energetische Verwertung, wobei auch andere konkurrierende Verwertungswege diskutiert werden. Im Fokus steht die verbesserte energetische Nutzung von Reststoffbiomasse mit maximalen Flächenertrag. Die in diesem Zusammenhang noch unbeantworteten und durch diese Arbeit behandelten Fragestellungen sind daher:

- Welche Rahmenbedingungen müssen verändert werden, um den Anteil des zur Energieproduktion genutzten Flüssigmistes in Österreich deutlich zu erhöhen?
- Kann für Österreichs dezentrale landwirtschaftliche Struktur ein Anlagenkonzept entwickelt werden, welches kostengünstig Flüssigmist vergast?
- Welche Technologien stehen für die energetische Nutzung von Weizenstroh zur Verfügung und wie kann Weizenstroh mit größtmöglicher Ausbeute energetisch verwertet werden?

## **1.3 Methodik und Vorgangsweise**

Diese Arbeit unterteilt sich in praktische Laborarbeit und integrierte Systemanalyse. Diese Kombination war notwendig, da einige für die Bewertung und/oder Optimierung notwendigen Daten nicht in der Literatur vorhanden waren. Die Arbeit kann darüber

hinaus in zwei Schwerpunkte unterteilt werden die durch das eingesetzte Substrat charakterisiert werden. Der erste Teil (Kapitel 6) befasst sich mit der energetischen Verwertung von Wirtschaftsdünger, Teil zwei (Kapitel 7) behandelt die Nutzung des landwirtschaftlichen Reststoffes Weizenstroh.

Hinsichtlich der energetischen Nutzung von Wirtschaftsdünger konnte die Verwertung in Biogasanlagen als optimale Technologie identifiziert (siehe Kapitel 6.3) werden. Ausgehend vom Status quo der Wirtschaftdüngerverwertung wurden die Einflüsse dieses Verwertungsweges auf sozialer, ökonomischer und ökologischer Ebene diskutiert. Es wurde außerdem die derzeitige Situation der energetischen Verwertung von Wirtschaftsdünger in Österreich, Europa und der Welt ermittelt und Rahmenbedingungen vergleichend betrachtet. Ausgehend von diesem Vergleich und dem Ergebnis, dass nur ein verschwindend geringer Anteil des in Österreich anfallenden Wirtschaftdüngers energetisch verwertet wird, wurden mögliche Hinderungsgründe für einen weiteren Ausbau ermittelt. Zu diesem Zwecke wurden, basierend auf statistischen Daten, der durchschnittliche österreichische Landwirt sowie die charakteristischen landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen definiert. Auf Basis dieser ermittelten Rahmenbedingungen und Literaturangaben zu Investitions- und Betriebskosten von Biogasanlagen wurden mögliche Lösungen für eine intensivere Nutzung des Wirtschaftdüngers erarbeitet. Ergebnis dieser Machbarkeitsstudie war die Skizzierung eines hofintegrierten, kostengünstigen Anlagenkonzepts mit möglichst geringen Investitions- und Betriebskosten. Als eine der möglichen ökonomischen Optimierungen dieser Kleinanlagen wurde die Auswirkung eines unbeheizten Fermenters auf die Gesamtgasausbeute untersucht. Diese Analyse wurde durchgeführt, da in der Literatur für lange Verweilzeiten höhere Nettoenergieerträge bei unbeheizten Fermentern im Vergleich zu beheizten Fermentern berichtet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zusätzlich zu einer intensiven Literaturarbeit über einen Zeitraum von 2 Jahren eigene Laborversuche durchgeführt und die optimale Fermentertemperatur ermittelt. Die erhaltenen Ergebnisse wurden in das Anlagenkonzept integriert. Mittels Lebenszyklusanalyse wurde das entworfene hofintegrierte Anlagenkonzept ökologisch bewertet. Für die ökologische Bewertung kam das Web basierte Bewertungstool, SPIONWeb der TU Graz [vgl. <http://spionweb.tugraz.at/de/spi>] zum Einsatz.

Für den Reststoff Weizenstroh bestehen im Gegensatz zur Wirtschaftdüngerverwertung verschiedenste energetische aber auch stoffliche Verwertungstechnologien (vgl. Kapitel

7.1). Zu Beginn mussten also diese Technologien untersucht und das für die energetische Nutzung zur Verfügung stehende Strohpotential ermittelt werden. Aufgrund der limitierten Verfügbarkeit von Biomasse und im speziellen aufgrund der Konkurrenz verschiedenster Verwertungstechnologien für Stroh ist anzustreben, den maximalen Energieoutput je Tonne Inputmaterial zu generieren. Durch die Prozessoptimierung mittels Prozessnetzwerksynthese (vgl. Kapitel 5.4) sollte gewährleistet werden, dass eine Energieoutput-optimierte Nutzung von Stroh gewährleistet werden kann. Als Basis der Bewertung wurde das Konzept der Strohbioraffinerie (vgl. Kapitel 4.2.3) herangezogen und eine Biogasanlage in das System integriert. Abweichend zu allen bereits vorhanden Untersuchungen einer kombinierten Ethanol- und Biogasanlage wurde die Biogasanlage nicht als Abfallverwertungsanlage in das System integriert. Alle Ströme entlang der Prozesskette der Bioraffinerie wurden als potentieller Inputstrom in die Biogasanlage gesehen. Es sollte dadurch eine Optimierung des Gesamtprozesses und nicht von Einzeltechnologien möglich werden. Die für die Optimierung notwendigen Prozessdaten wurden über Literaturrecherche und eigene Laborversuche ermittelt. Die Prozessoptimierung erfolgte mittels PNS studio [<http://www.p-graph.com/pnsstudio/>], indem der energetische Output monetär bewertet und maximiert wurde.

#### **1.4 Abgrenzung zu anderen Arbeiten**

Sowohl die Verwertung von Wirtschaftsdünger wie auch die energetische Nutzung von Weizenstroh war bereits Inhalt zahlreicher Journalbeiträge und anderer Publikationen (vgl. Kapitel 6 und Kapitel 7) die für die vorliegende Arbeit wichtigen Veröffentlichungen werden an passender Stelle aufgegriffen und zitiert). Abgrenzend zu diesen bestehenden Arbeiten wurde in vorliegender Dissertation eine ergebnisoffene Untersuchung durchgeführt. Dies bedeutet, dass der Untersuchungsrahmen der zu bewertenden Technologien so offen wie möglich definiert wurde, um eine optimale Nutzung der Rohstoffe und der dadurch verbrauchten Fläche zu gewährleisten. Im Speziellen wurde zum Beispiel für die energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger der Trend zu immer größer werdenden Biogasanlagen nicht als selbstverständlich hingenommen (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22), sondern die Gründe und Rahmenbedingungen ökonomisch optimaler Fermentergrößen hinterfragt und geprüft. Diese Herangehensweise war notwendig, da die Arbeit mit Rücksicht auf die österreichischen landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen durchgeführt wurde.



Österreich besitzt im internationalen Vergleich der Industriestaaten eine kleinstrukturierte Landwirtschaft. Für die Nutzung von Wirtschaftsdünger in für Europa gängigen Biogasanlagen wären lange Transportwege notwendig. Der Transport von Gülle ist jedoch in vielen Fällen ein limitierender Faktor (vgl. Kapitel 6.2.3 und 6.4.5). Basierend auf den aus der Literatur erhobenen Daten mit Ergänzung der eigenen Versuchsergebnisse wurde schließlich ein Anlagenkonzept entwickelt, welches optimale Voraussetzungen für die Umsetzung in Österreich bietet.

Für die energetische Verwertung von Weizenstroh stehen verschiedene Technologien zur Verfügung [vgl. Technische Universität Wien 2011; Clark 2007; Knoll 2013], eine bekannte ist die Bioethanolerzeugung (vgl. Kapitel 4.2). Dabei werden die in der Biomasse enthaltenen Kohlenhydrate über verschiedene Teilprozesse in Bioethanol umgewandelt. Wird neben der energetischen Verwertung auch eine stoffliche Verwertung integriert, spricht man von einer Bioraffinerie. Um den Eigenenergiebedarf von Strohbioraffinerien zu decken, scheint es sinnvoll, für die Verwertung der organischen Reststoffe eine Biogasanlage in das Gesamtsystem zu integrieren. Die Möglichkeiten der Integration einer Biogasanlage zur Erreichung eines energieautarken Prozesses wurde bereits öfters untersucht [vgl. Modaresi et al. 2012; Bauer et al. 2009; Kravanja et al. 2013; Lassmann et al. 2011; Lanzerstofer und Jäger 2008]. Es wurden dabei verschiedene Aspekte der Verschaltung analysiert, wobei jedoch immer nur die Reststoffströme der Bioraffinerie in der Biogasanlage verwertet werden. Abgrenzend zu den bereits durchgeführten Untersuchungen wurde in dieser Arbeit jedoch die Biogasanlage nicht auf die Verwertung von Reststoffströmen eingeschränkt. Die Biogasanlage wurde nicht als Abfallverwertungstechnologie sondern als Energielieferant bewertet.

## **2 Nachhaltigkeit - ein System im Wandel**

Weltweit werden politische Instrumente eingesetzt, um einen Systemwandel von einer ressourcenausbeutenden zu einer nachhaltigen Gesellschaft zu erreichen. Einzelne gesellschaftliche Aspekte greifen dabei wie Zahnräder einer Uhr ineinander und die Funktionstüchtigkeit des Systems kann nur gewährleistet werden, wenn alle Teile im Adaptierungsprozess Berücksichtigung finden. Eine nachhaltige Energiebereitstellung ist dabei eines der Räder auf dem Weg zu einer nachhaltigen Gesellschaft.

## 2.1 Das Konzept Nachhaltiger Entwicklung

Der bereits in der Einleitung erwähnte und für die Definition von Nachhaltigkeit wichtige Brundtland-Report definiert den Begriff nachhaltige Entwicklung wie folgt:

*Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. It contains within it two key concepts:*

- *the concept of 'needs', in particular the essential needs of the world's poor, to which overriding priority should be given; and*
- *the idea of limitations imposed by the state of technology and social organization on the environment's ability to meet present and future needs*

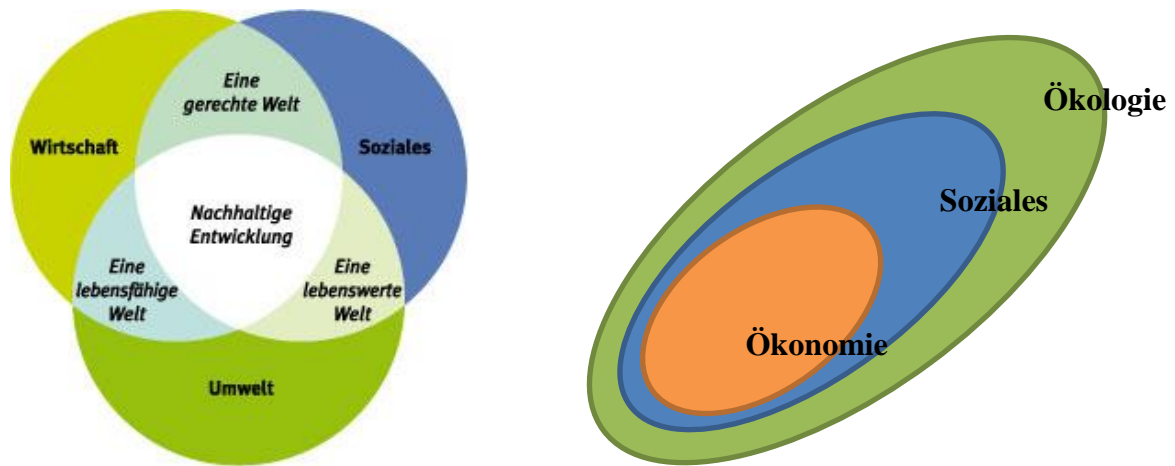
[Weltkommission für Umwelt und Entwicklung 1987, S.41 ]

Nachhaltige Entwicklung wird also definiert über die Erfüllung der lebensnotwendigen Bedürfnisse aller Menschen der heutigen aber auch der zukünftigen Generation. Als wichtige Voraussetzung wird dabei die Fähigkeit der Umwelt integriert, diese Bedürfnisse zu erfüllen. Im Bericht Our common future wird dabei im Speziellen darauf hingewiesen, dass die menschlichen Eingriffe in die Natur in der modernen Gesellschaft bedeutender in Menge und Auswirkung sind, als jemals zuvor. Entgehend aus einer Entwicklung basierend auf Ausbeutung von Ressourcen sollten durch den Bericht die Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Entwicklung definiert und ein Umdenkprozess gestartet werden.

Aus den im Bericht der Vereinten Nationen angeführten Notwendigkeiten einer nachhaltigen Entwicklung sind zahlreiche Zukunftsmodelle entstanden. Gemein ist dabei allen Modellen, dass für eine nachhaltige Entwicklung auf die drei Dimensionen Ökologie, Soziales und Ökonomie gemeinsam Rücksicht genommen wird. Nur im Wechselspiel miteinander kann Entwicklung unter Berücksichtigung aller Bedürfnisse geschehen. Lediglich die Gewichtung der einzelnen Ebenen unterscheidet sich in den vorhandenen Modellen [vgl Gehrlein 2004, S. 20ff]. Eines der wohl bekanntesten Modelle ist das Drei-Säulen Modell der Nachhaltigkeit. An seiner klassischen Darstellung dreier gleicher Säulen mit übergeordnetem Dach wird allgemein kritisiert, dass zu wenig Abhängigkeit der einzelnen Säulen zueinander vermittelt wird. Auch wenn eine der drei Säulen entfernt wird bleibt das Konstrukt stabil was im Sinne der Nachhaltigkeit nicht gegeben sein sollte. Es hat sich daher eine Darstellung als Dreieck

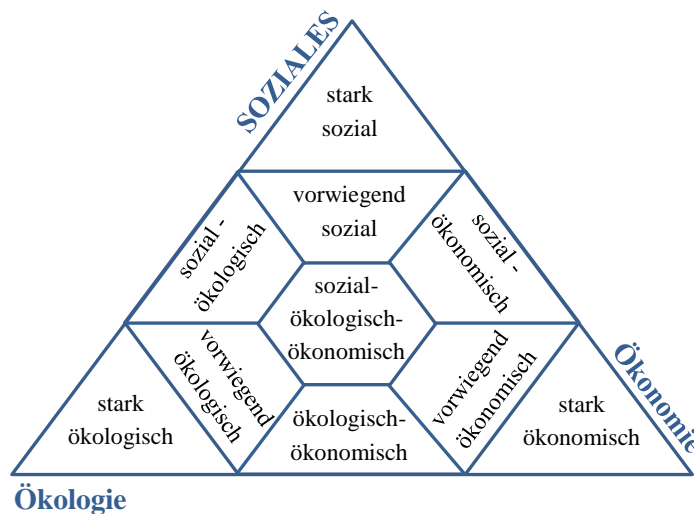
- 2. Nachhaltigkeit - ein System im Wandel -

entwickelt, wodurch Nachhaltigkeit nur mehr bei der Berücksichtigung aller Ebenen möglich ist. Eine weitere Entwicklung des Säulenmodells ist das Schnittmengenmodell, welches in Abbildung 1 dargestellt ist. In diesem Modell soll verdeutlicht werden, dass zwischen den drei Säulen eine starke Abhängigkeit besteht. In diesem Modell wird außerdem der Begriff Säulen durch den Begriff Dimensionen ersetzt [vgl. Hauff und Kleine 2009, S.119]. Geht das Drei-Säulen-Modell von einer äquivalenten Gewichtung der Wirkungsdimensionen aus, weist das Vorrangmodell der ökologischen Ebene die größte Bedeutung zu. Es geht davon aus, dass ohne eine intakte Umwelt Leben und somit Entwicklung erst gar nicht möglich ist.



**Abbildung 1 Schnittmengenmodell (links) und Vorrangmodell (rechts) der Nachhaltigkeit**  
 Quelle: <http://hitech.bfh.ch>; eigene Darstellung nach Busch-Lüty 1995

Eine relativ neue Illustration von Nachhaltigkeit ist die Darstellung als Gibbssches Dreieck, wie in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2 Das Integrierende Nachhaltigkeitsdreieck**  
 Quelle: eigene Darstellung nach Hauff und Kleine 2005

Dieses Modell vereint die Darstellung als Dreieck mit dem Schnittmengenmodell. Nach Hauff und Kleine erfüllt dieses neue Modell die Anforderungen an die komplexe Diskussion, da es die Wechselbeziehung der Dimensionen darstellt ohne die Prägnanz aufzugeben [vgl. Hauff und Kleine 2005, S.25].

Die wichtigsten Eckpunkte der einzelnen Ebenen unabhängig von deren Gewichtung und den verschiedenen Modellen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1 Zieldimensionen der Nachhaltigen Entwicklung**

*Quelle: G.J. Krol in K. Engelhard 1998*

Ökologisch	Sozial	Ökonomisch
Erhalt der Pufferkapazität der Natur	gerechte Verteilung zwischen Individuen	Steigende Lebensqualität
Nutzung erneuerbarer Ressourcen im Rahmen ihrer Regenerationsfähigkeit	gerechte Verteilung zwischen Industrie- und Entwicklungsländern	Hoher Beschäftigungsstand
Minimale Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen	gerechte Verteilung zwischen den Generationen	Preisniveaustabilität
		außenwirtschaftliches Gleichgewicht

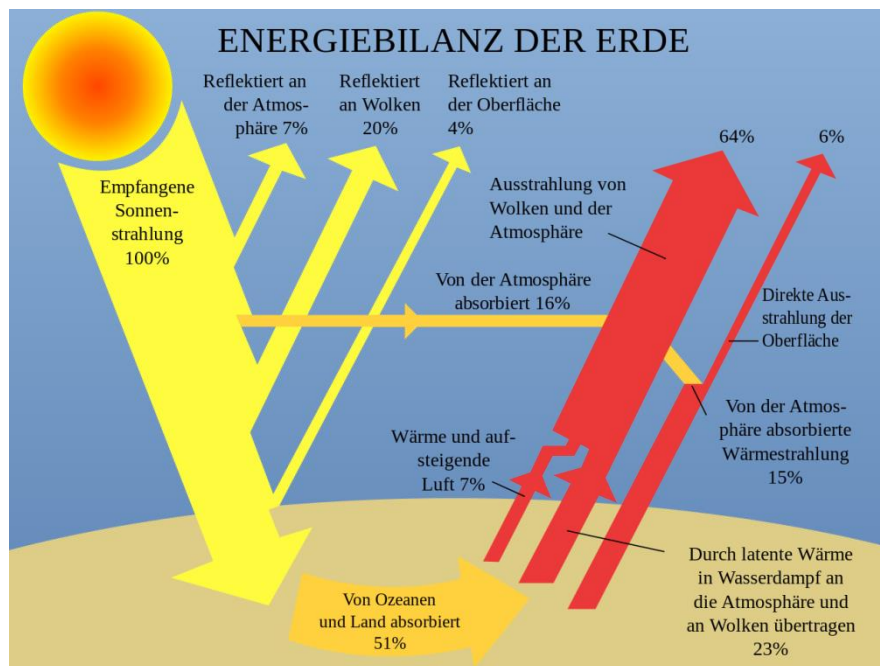
## 2.2 Die ökologische Nachhaltigkeit

Das Ziel der ökologischen Nachhaltigkeit ist wie bereits oben erwähnt, Natur und Umwelt für die nachfolgenden Generationen zu erhalten. Dies umfasst den Erhalt der Artenvielfalt, den Klimaschutz, die Pflege von Kultur- und Landschaftsräumen in ihrer ursprünglichen Gestalt sowie generell einen schonenden Umgang mit der natürlichen Umgebung [vgl. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft<sup>a</sup> (BMLFUW)]. Ein zentrales Thema ist dabei der Klimaschutz und die Reduktion des vom Menschen verursachten Treibhauseffektes, welcher einen signifikanten Einfluss auf das Leben auf Erden nach sich zieht.

### 2.2.1 Der Treibhauseffekt

Das Klima unserer Erde wird durch die Ein- und Abstrahlung von Energie bestimmt. Die Energiebilanz sieht dabei wie in Abbildung 3 dargestellt aus. Die Sonne sendet kurzwellige Strahlung aus, von der 55 % bis zur Erdoberfläche durchdringen. Diese Energie wird vom Erdboden und der Atmosphäre als Wärme gespeichert und in der Nacht als Infrarotstrahlung wieder abgegeben. Diese Rückstrahlung wird von

bestimmten Gasen in der Lufthülle absorbiert und reflektiert, wodurch die Temperatur der Atmosphäre steigt. Die daraus resultierende Erwärmung der bodennahen Luftmassen wird als Treibhauseffekt bezeichnet. Diese für Infrarotstrahlung undurchlässigen Gase werden unter dem Begriff Treibhausgase zusammengefasst. Treibhausgase sind von Natur aus in der Atmosphäre vorhanden. Leben auf der Erde ist erst durch diesen natürlichen Treibhauseffekt möglich.



**Abbildung 3 Die Energiebilanz der Erde**

Quelle: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth\\_energy\\_budget.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_energy_budget.svg)

Durch den Eingriff in langfristige Stoffkreisläufe wurden und werden vom Menschen zusätzliche Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert. Die Konzentration der Gase steigt und die Wirkung des Treibhauseffektes nimmt zu. Diese Veränderung der Konzentration natürlicher Treibhausgase wird als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet. Durch diesen Effekt wird das Klima der Erde verändert, was direkten Einfluss auf das Ökosystem hat. Daher ist eine Reduktion emittierter Treibhausgase ein zentrales Anliegen des Klimaschutzes und einer ökologisch nachhaltigen Entwicklung. [vgl. Bakan und Raschke 2002, S.91ff]

### 2.2.2 Der Kohlenstoffkreislauf in Zusammenhang mit nachhaltiger Entwicklung

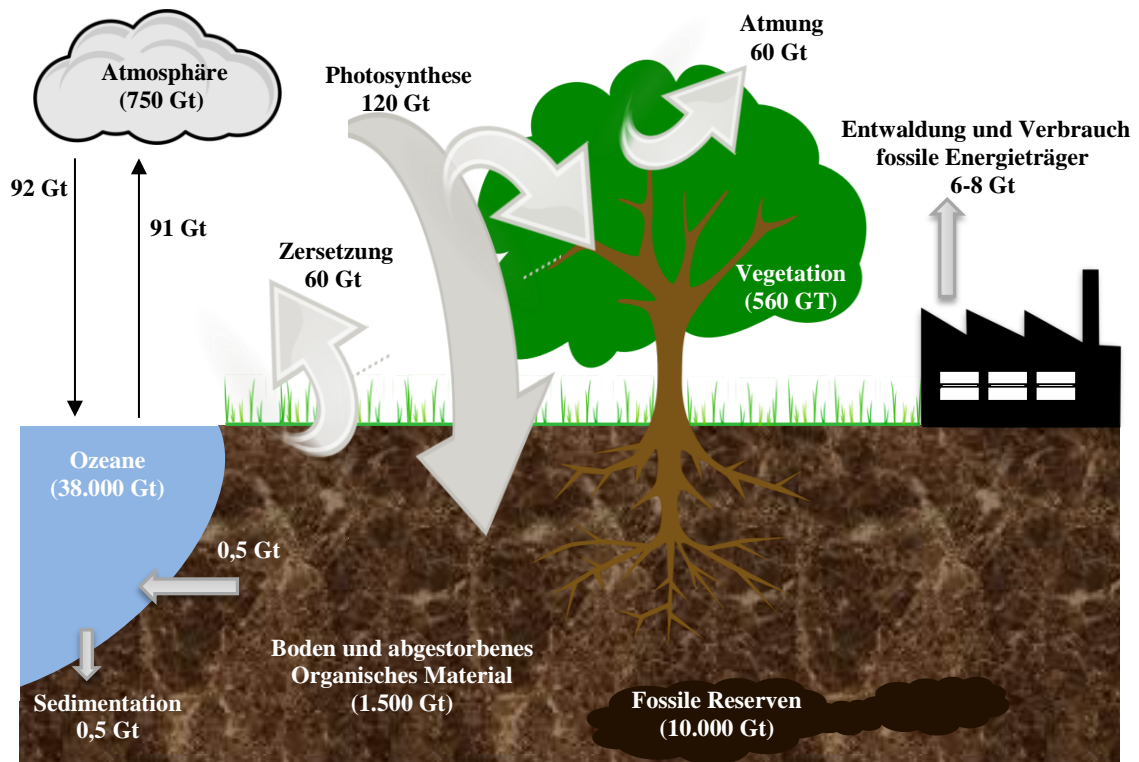
Eines der wichtigsten Treibhausgase, das Kohlendioxid, ist die Quelle des gesamten Kohlenstoffes aller lebenden Organismen und fossilen Ablagerungen. Er wird in der Photosynthese im organischen Material fixiert und gelangt über die Nahrungskette zu

allen Lebewesen unseres Ökosystems. Über die Atmung von Menschen, Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen wird der Kohlenstoff als  $\text{CO}_2$  wieder in die Atmosphäre abgegeben. Die Differenz von Aufnahme über die Photosynthese und Abgabe über Respiration entspricht der Nettoprimärproduktion. Bis vor kurzem dachte man, dass sich im Ökosystem ohne menschlichen Eingriff die Aufnahme in das terrestrische System und die Abgabe in die Atmosphäre die Waage halten. Neue Forschungen legen jedoch die Vermutung nahe, dass Landmassen mehr Kohlenstoff aufnehmen, als im selben Zeitraum über Atmung wieder freigesetzt werden kann [vgl. Smith und Smith 2009, S.634f]. Der Übergang von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in unser Ökosystem und wieder zurück wird als Kohlenstoffkreislauf bezeichnet. Dabei sind die in menschlichen Auf- und Abbauprozess der Biosphäre nur ein Teil der Kohlenstoffflüsse im Zyklus. Wenn organisches Material unter Wasserabschluss bei fehlendem Sauerstoff akkumuliert, erfolgt die Zersetzung nur unvollständig und es kommt anstatt zur Abgabe von  $\text{CO}_2$  an die Atmosphäre zu Carbonifikation und zur langfristigen Fixierung des Kohlenstoffs im terrestrischen System. Der Kohlenstoff in den von uns heute genutzten fossilen Energieträger ist über diesen Prozess und einen Zeitraum von Millionen von Jahren im Boden fixiert worden. [vgl. Smith und Smith 2009, S. 631ff]

Die Flussraten dieser Prozesse sind nur sehr gering, weshalb man auch vom langfristigen Kohlenstoffkreislauf spricht. [vgl. Kappas 2009, S.159]

Die Verwendung biogenen Materials als Biomasse oder fossile Energieträger ist in jedem Fall ein Eingriff in den natürlichen Kreislauf von Entstehung und Zerfall. Dabei kann Kohlenstoff über seinen natürlichen Zeitraum hinaus fixiert oder vorzeitig an die Atmosphäre abgegeben werden [vgl. Türk 2014, S.66ff]. Bei der Nutzung fossiler Energieträger ist der Eingriff von besonderer Bedeutung, da Kohlenstoff aus dem langfristigen Kreislauf in nur kurzen menschlichen Zeiträumen in die Atmosphäre freigegeben wird. Diese rasche Freisetzung hat einen Anstieg der Konzentration von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre zu Folge, was wiederum zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes und einem Anstieg der Temperatur und dadurch einer Veränderung unseres Klimas wie oben beschrieben führt [vgl. Breiholz et al. 2009, S.30f]. Eingriffe in den langfristigen Kohlenstoffkreislauf sind daher im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zu vermeiden. Die Nutzung von Biomasse ist so zu gestalten, dass die Freisetzung von  $\text{CO}_2$  durch natürliche und anthropogene Einflüsse die Fixierung von Kohlenstoff nicht übersteigt.

Wie in Abbildung 4 ersichtlich werden durch Eingriffe des Menschen jährlich zirka 6-8 Gt CO<sub>2</sub> außerhalb des natürlichen Kohlenstoffkreislaufes in die Atmosphäre abgegeben. Im selben Zeitraum wird von den Ozeanen etwa 1 Gt CO<sub>2</sub> aufgenommen und davon 0,5 Gt als Sediment langfristig eingelagert.



**Abbildung 4 Der globale Kohlenstoffkreislauf**  
*Quelle: eigene Darstellung nach Smith und Smith 2009*

### 2.2.3 Mehrdimensionale ökologische Bewertung mittels Ökobilanz

Eine für die ökologische Bewertung zur Verfügung stehende Methode mit hohem Qualitätsstandard ist die Ökobilanz. Diese Analyse ist nach standardisierten Methoden durchzuführen und ermöglicht die Bewertung der ökologischen Auswirkungen unterschiedlichster Prozesse und Produkte entlang des gesamten Lebenszyklus [vgl. Klöpffer 1997 S.223].

Die Durchführung einer Ökobilanz wurde in der DIN EN ISO 14044:2006-10 standardisiert. Die Relevanz einer Ökobilanz wird in der DIN EN ISO 14044:2006-10 wie folgt angeführt:

*„Die Ökobilanz kann helfen*

- *beim Aufzeigen von Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten in den verschiedenen Phasen ihres Lebensweges;*
- *zur Information von Entscheidungsträgern in Industrie, Regierungs- oder Nichtregierungsorganisationen (z.B. bei der strategischen Planung, Prioritätensetzung, Produkt- oder Prozessentwicklung oder entsprechenden Neuentwicklung);*
- *beim Auswählen von relevanten Indikatoren der Umwelteigenschaften einschließlich der zugehörigen Messverfahren, und*
- *beim Marketing (z. B. beim Implementieren einer Umweltkennzeichnung, beim Treffen einer Umweltaussage oder beim Erstellen einer Umweltdeklaration für ein Produkt).“*

[DIN EN ISO 14044:2006-10]

Die Durchführung einer Ökobilanz gliedert sich immer in die 4 Schritte [vgl. EN ISO 14044:2006; Klöpffer und Renner 1992 S. 272; Klöpffer 1997 S. 224ff; Klöpffer und Grahl 2009; Priewasser 2003 S. 94]

- Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen. Am Beginn jeder Ökobilanz sind das Ziel und der Grund der Untersuchung klar zu formulieren. Außerdem müssen die Rahmenbedingungen der Arbeit definiert werden. Es sind dabei Fragen hinsichtlich des geografischen, zeitlichen und technologischen Geltungsbereiches, der Systemgrenzen, der Vereinfachungen und Annahmen, der Zielgruppe, des Allokationsverfahrens und der berücksichtigten Umwelteinflüsse zu beantworten. Außerdem muss die sogenannte funktionelle Einheit, also die Bewertungseinheit des Prozesses festgelegt werden. Nur eine gewissenhafte Definition der untersuchten Prozesse kann eine erfolgreiche und vor allem vergleichbare Bewertung gewährleisten.



Sachbilanz. Die Sachbilanz könnte auch als Stoff- und Energiebilanz des Systems bezeichnet werden. Hier werden alle Stoff- und Energieströme des Systems quantitativ erhoben. Dieser Schritt bildet die Grundlage für die Ermittlung der vorhandenen Umwelteinflüsse. Nur wenn diese Daten sorgfältig und genau erhoben werden, ist das Ergebnis der Analyse aussagekräftig. Da die Ökobilanz eine Lebenszyklusanalyse darstellt, sind Stoff- und Energiebilanzen für primäre Prozesse aber auch für die dem Produkt vorgeschaltete Prozesse zu erheben. Der Detailgrad ergibt sich aus dem Anfangs definierten Systemgrenzen der Untersuchung.

Wirkungsabschätzung. In der Phase der Wirkungsabschätzung werden die in der Sachbilanz erhobenen Umwelteinflüsse sogenannten Wirkungskategorien zugeteilt. Üblicherweise findet man in Ökobilanzen 5-10 Wirkungskategorien (z.B. Beitrag zum Treibhausgaseffekt, Beitrag zum sauren Regen...).

Auswertung. In der Auswertung werden nach ausreichender Prüfung der Analyse und der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse (siehe Ende des Absatzes) die Auswirkungen in den Wirkungskategorien bewertet. Dabei erfolgt in den meisten Fällen durch Multiplikation mit einem normativen Faktor eine Gewichtung der Umwelteinflüsse in Abhängigkeit der ökologischen Schadenswirkung. Anhand dieser Interpretation werden Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen ausgearbeitet. In der Sensitivitätsanalyse der Ökobilanz werden bedeutsamsten Stoff- und Energieströme identifiziert und ihre potentielle Wirkung qualitativ und quantitativ beurteilt.

Da die Einteilung in Umweltkategorien und die Generierung vieler einzeln zu bewertender Umwelteinflüsse oft die Verständlichkeit und Signifikanz der Analyse verschlechtert, wurden verschiedenen Methoden für die Auswertung der Sachbilanz entwickelt, wobei hier zum Teil Einschränkungen im Bewertungsumfang vorgenommen wurden [vgl. Priewasser 2003 S.92f]. Eine Auflistung der bekanntesten Methoden befindet sich in Tabelle 2.

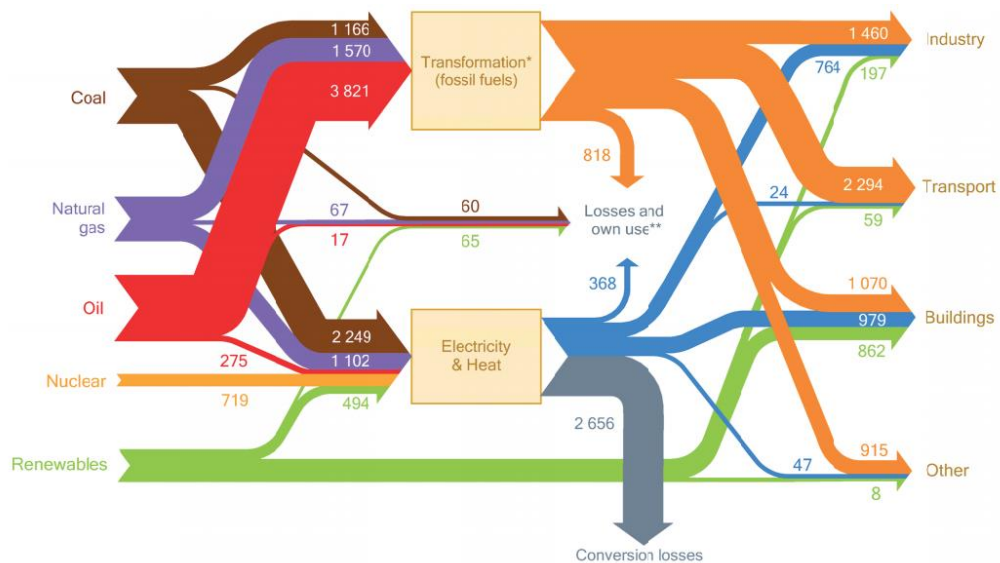
In dieser Arbeit wurde für die ökologische Bewertung die Methode des Sustainable Process Index (vgl. Kapitel 5.5) gewählt. Dies ist eine Bewertungsmethode aus der Familie unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung des ökologischen Fußabdruckes. Details zu dieser Methode und Vorteile zu anderen Methoden können im Kapitel 5.4 nachgelesen werden.

**Tabelle 2: Auswahl einiger bekannter Bewertungsmethoden von Ökobilanzen**  
*Quelle: eigene Darstellung*

CML	Wirkungsorientierte Charakterisierung
KEA	Kumulierter Energieaufwand
MIPS	Materialinput pro Serviceeinheit
Ecopoints 2006	Ökologische Knappheit
Eco-Indicator99	Umweltrelevanz in Form einer aggregierten Kennzahl
Ökologischer Fußabdruck	Flächenverbrauch als aggregierte Größe der Umwelteinflüsse von Prozessen

### 2.3 Nachhaltige Energienutzung

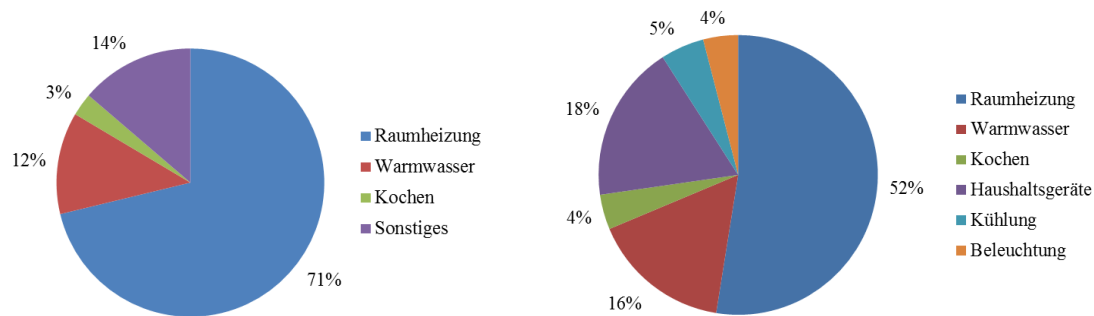
Betrachtet man das Energiesystem der Erde, sieht man, dass Energie aus fünf zentralen Energieträgern gewonnen und zu großen Teilen in den drei Hauptsektoren Industrie (28 %), Verkehr (27 %) und Haushalte (33,6 %) verbraucht wird (siehe Abbildung 5)



**Abbildung 5 Globaler Energieverbrauch verschiedener Sektoren**  
*Quelle: International Energy Agency 2012, S.62*

In diesen Sektoren gilt es unterschiedliche Interessen zu befriedigen die in verschiedenen Ländern durchaus Unterschiede aufweisen. Die Verbrauchsstruktur der Energie im Haushalt ist für Österreich und alle OECD-Ländern in Abbildung 6 dargestellt.

## - 2. Nachhaltigkeit - ein System im Wandel -



**Abbildung 6 Energieeinsatz der Haushalte nach Sektoren in Österreich (links) und den OECD-Ländern (rechts)**

*Quelle: eigene Darstellung nach Statistik Austria 2012 und Statista 2014.*

Aus diesen Zahlen lässt sich ableiten, dass die Bereitstellung von Wärme und der Transport weltweit die größten Energieverbraucher sind.

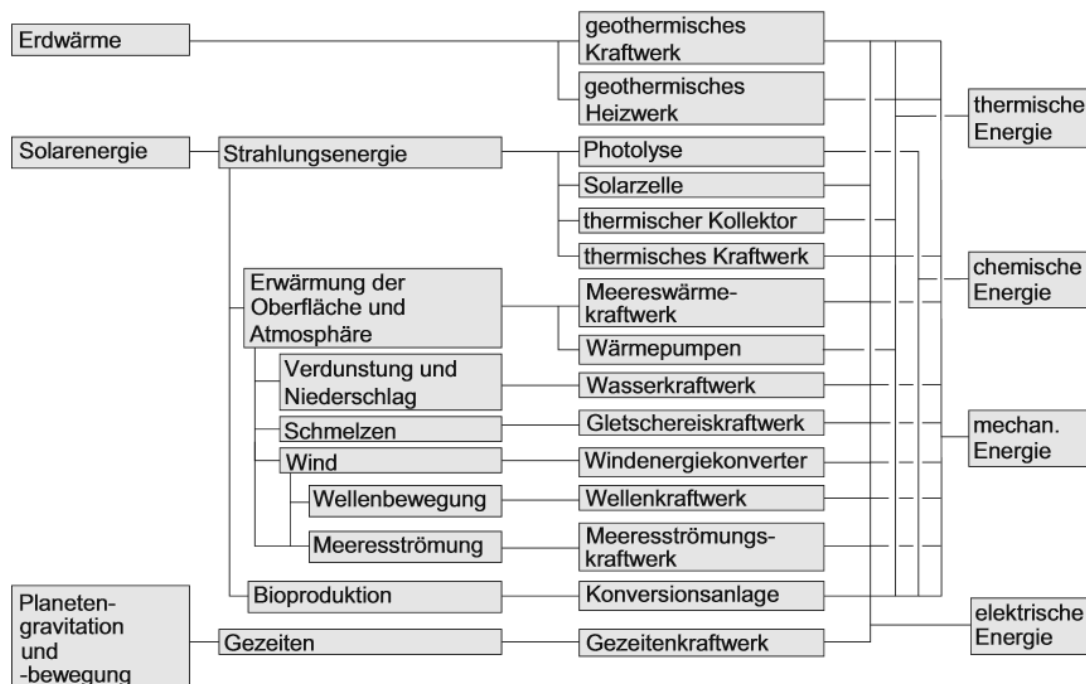
Unser derzeitiges Energiesystem ist von der Nutzung sogenannter fossiler Energieträger geprägt. Unter fossilen Energieträger versteht man im Allgemeinen Kohle, Öl und Gas. Alle fossilen Energieträger basieren auf organischen Kohlenstoffverbindungen, die beim Prozess der Verbrennung unter der Abgabe von Energie zu Kohlendioxid oxidiert werden. Fossile Energieträger sind definiert als Abbauprodukte organischer Masse, welche unter Luftabschluss nicht verrotten und dadurch ihre chemische Energie erhalten [vgl. Umweltbundesamt<sup>a</sup>]. Dieser Umwandlungsprozess ist langsam und die heute genutzten fossilen Energieträger haben ihren Ursprung in der geologischen Vorzeit [vgl. Smith und Smith 2009, S. 632]. Fossile Energieträger entsprechen aus den folgenden Gründen nicht dem Prinzip der Nachhaltigkeit:

- Ihre Entstehung passiert nicht in menschlichen Zeiträumen. Der Verbrauch übersteigt die Nachbildungsrate bei weitem. Das Vorkommen ist somit endlich und eine Energiebereitstellung auch für nachkommende Generationen nicht gewährleistet.
- Bei der Verbrennung fossiler Energieträger wird Kohlenstoff des langfristigen organischen Kohlenstoffkreislaufs freigegeben. Folglich wird in die Atmosphäre mehr Kohlenstoff abgegeben als in derselben Zeit von der Erde fixiert werden kann. Es kommt zu einer Zunahme des in der Atmosphäre gespeicherten CO<sub>2</sub>. Dieses CO<sub>2</sub> wirkt als Treibhausgas und führt zu einer nachhaltigen Veränderung des Erdklimas. Die Befriedigung der Bedürfnisse zukünftiger Generationen ist dadurch gefährdet.

- Durch die Nutzung fossiler Energieträger in Regionen ohne eigene Vorkommen wird diesen Volkswirtschaften ein erheblicher Anteil an Kapital entzogen, welches nicht mehr in die Entwicklung der Region investiert werden kann.

### 2.3.1 Nachhaltige Energieträger

Das nachhaltige Pendant fossiler Energieträger wird erneuerbarer Energieträger genannt. Diese Energieträger sind dadurch gekennzeichnet, dass sie laufend und in jedem Fall in einem menschlichen Zeithorizont nachgebildet werden [vgl. Umweltbundesamt<sup>b</sup>]. Beim Einsatz erneuerbarer Energieträger ist darauf zu achten, dass ihre Nutzung den Prinzipien der Nachhaltigkeit entspricht, Erneuerbare Energieträger werden ständig durch Sonnenenergie oder andere Quellen (Geothermie, Gezeiten) gespeist. Sonnenenergie kann dabei direkt oder indirekt durch die Nutzung ihrer Derivate als Energieträger dienen. Die auf der Erde nutzbaren Derivate der Sonnenenergie sind Wind-, Wasserkraft und Biomasse. Die Möglichkeiten der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern sind in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7 Die Nutzung erneuerbare Energieträger**

*Quelle: Kaltschmitt et al. 2014*

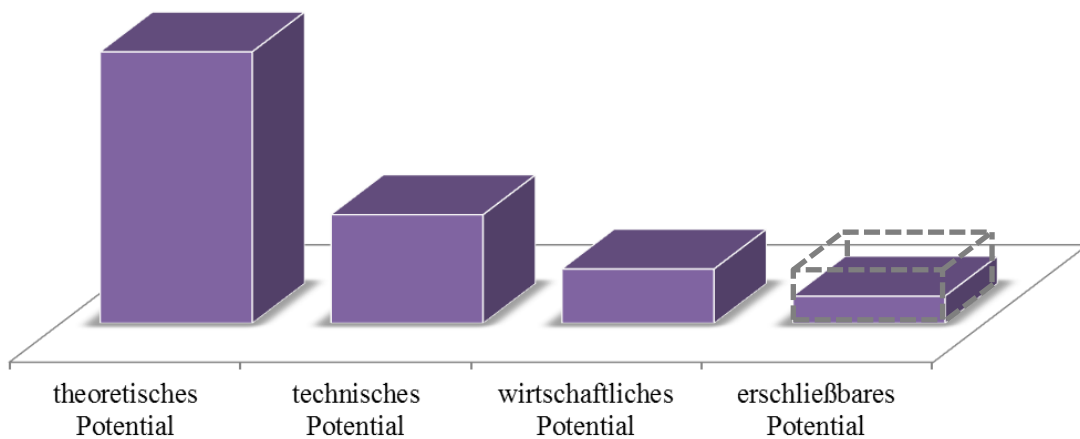
Die jährlich nutzbare Energiemenge der einzelnen Energieträger unterscheidet sich deutlich, Tabelle 3 zeigt das theoretische, weltweite Potenzial wie von Perez und Perez [vgl. Perez und Perez 2009] angegeben.

**Tabelle 3 jährliches theoretisches Energiepotential erneuerbarer Energieträger**

*Quelle: eigene Darstellung nach Perez und Perez 2009*

Energieträger	theoretisches Energiepotential [TWyr]
Solar	23.000
Wind	25-27
Meereswärme	3-11
Biomasse	2-6
Wasser	3-4
Geothermie	0,3-2
Gezeiten	0,3
Weltenergieverbrauch	16

Dabei gilt zu beachten, dass das theoretische nicht dem nutzbaren Potential gleichzusetzen ist. Verschiedene Restriktionen vermindern das theoretische Potential deutlich. Kaltschmitt und Wiese [vgl. Kaltschmitt und Wiese 1995, S.17] haben dazu den in Abbildung 8 dargestellten Zusammenhang ermittelt.



**Abbildung 8 Vom theoretischen zum erschließbaren Potential**

*Quelle: eigene Darstellung nach Kaltschmitt und Wiese 1995*

Dabei bezeichnet das theoretische Potential das gesamte physikalische Angebot einer Ressource und bildet somit die Obergrenze. Das technische Potential berücksichtigt diverse Verluste aber auch die Einhaltung notwendiger ökologischer Grenzen oder das zeitliche Ungleichgewicht von Energieangebot und Nachfrage. Das wirtschaftliche Potential berücksichtigt die Energiegestehungskosten und die erzielbaren Erlöse vor

allem im Vergleich zu alternativen Angeboten. Das erschließbare Potential berücksichtigt wiederum, dass in den meisten Fällen das wirtschaftliche Potential nicht voll ausgeschöpft werden kann. Dies kann beispielsweise in rechtlichen Limitierungen begründet sein.

Für die theoretischen Potentiale aus Tabelle 3 bedeutet das, dass diese für realistische Potentialerhebungen noch deutlich zu reduzieren sind. Die Deckung des Weltenergiebedarfs kann daher nur von Solarenergie alleine oder einem Mix aus Solarenergie und anderen Energieträgern erfolgen. Nach Priewasser [vgl. Priewasser 2007, S. 427] ist davon auszugehen, dass durch Sonnenenergie etwa 150 % des Weltenergiebedarfes gedeckt werden können. Wasserkraft und Windkraft könnten in etwa 24 % des Weltenergiebedarfs decken und durch Biomasse kann als realistische Obergrenze eine Substitution von 30 % angenommen werden. Dass ein Mix für die alternative Energiebereitstellung am wahrscheinlichsten ist, wird auch durch die räumliche und zeitliche Veränderung des Angebots an erneuerbarer Energie beeinflusst. So zeigt Windenergie beispielsweise deutliche monatliche und tägliche Schwankungen aber auch eine starke regionale und lokale Abhängigkeit [vgl. Kaltschmitt et al. 2014, S. 806ff]. Alle erneuerbaren Energieträger haben ihre Vor- und Nachteile, auf die in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher eingegangen wird.

### **2.3.2 Merkmale eines nachhaltigen Energiesystems**

Die Nutzung erneuerbarer Energieträger ist nicht das alleinige Merkmal eines nachhaltigen Energiesystems. Eine der wichtigsten Maßnahmen ist die Reduktion des Energieverbrauches. Der Ausbau erneuerbarer Energie alleine, könnte ein ungebremstes Energieverbrauchswachstum nicht kompensieren [vgl. Pehnt 2010, S.10]. Daher sind auch beide Maßnahmen wichtige Elemente in der nationalen aber auch europäischen Energiepolitik (vgl Kapitel 2.3.3).

Priewasser [vgl. Priewasser 2003, S.124] beschreibt in seiner Arbeit die Umweltverträglichkeit des Energiesystems durch die folgenden drei Faktoren:

1. die Verringerung des Energieeinsatzes nach Maßgabe der technischen Möglichkeiten
2. die Präferenzierung umweltschonender Energieträger und Energieumwandlungssysteme
3. eine zweckgerechte Energieverwendung

Die ersten beiden Merkmale wurde bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, das letzte wird nachfolgend anhand der Exergieeffizienz erklärt [vgl. Kanoglu et al. 2012, S.2].

Als Exergie wird jener Anteil der Energie bezeichnet, der Arbeit verrichten kann. Beispielhaft sind in Tabelle 4 die Energie- und Exergiegehalte einiger Energieträger angeführt.

**Tabelle 4 Energie- und Exergiegehalte verschiedener Energieträger in Joule**  
*Quelle: eigene Darstellung nach Dincer und Rosen 2013, S.65*

Quelle	Energie	Exergie
Arbeit/Elektrizität	100	100
Erdgas	100	99
Dampf mit 120°C	100	24
Wasser mit 80°C	100	16

Die Berechnung der Exergieeffizienz erfolgt analog der Berechnung der Energieeffizienz (Gleichung 1) über die Relation von Exergieinput und Exergiegehalt im Produkt (Gleichung 2). [vgl. Dincer und Rosen 2013, S.13]

$$\eta = \text{Energieinhalt des Produktes} / \text{Energieinput} \quad (1)$$

$$\psi = \text{Exergiegehalt des Produktes} / \text{Exergieinput} \quad (2)$$

Die Berechnung der Exergieeffizienz differenziert also die Wertigkeit des Energiegehaltes des Produktes und gibt dadurch einen detaillierteren Einblick in die Leistungsfähigkeit eines Prozesses. An den oben angeführten Beispielen lässt sich das wie folgt erklären. Bei der Umwandlung von Strom in Warmwasser ist bei verlustfreier Umwandlung die Energieeffizienz 100 % die Exergieeffizienz allerdings nur 16 %. Nutzt man allerdings Dampf mit 120°C zur Warmwasserbereitung liegt die Exergieeffizienz deutlich höher, nämlich bei 67 %. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Energie zielgerichtet unter Berücksichtigung ihres Exergiegehaltes in Prozessen eingesetzt werden sollte, denn steigende Exergieeffizienz bedeutet sinkenden ökologischen Einfluss und steigende Nachhaltigkeit. Priewasser spricht in diesem Zusammenhang auch von einer rationellen Energienutzung [vgl. Priewasser 2003, S. 123] was in der Ausformulierung mit der eben beschriebenen Exergieeffizienz gleichzusetzen ist.

Eine Ausnahme dieser Regel stellt die Umwandlung exergetisch hochwertiger Energie in eine mindere Form zum Zwecke der Speicherung dar. Als Beispiel kann hier die

Wärmespeicherung von Strom (Power to Heat) angeführt werden. Allerdings werden diese Technologien nur dann angewendet, wenn keine Alternativen mit höherer Exergieeffizienz zur Verfügung stehen.

### **2.3.3 Politisches Bekenntnis zu einer nachhaltigen Energienutzung**

Aufgrund des regionalen Kontextes der Arbeit soll an dieser Stelle nur auf die politischen Aktivitäten der EU27 und Österreich eingegangen werden.

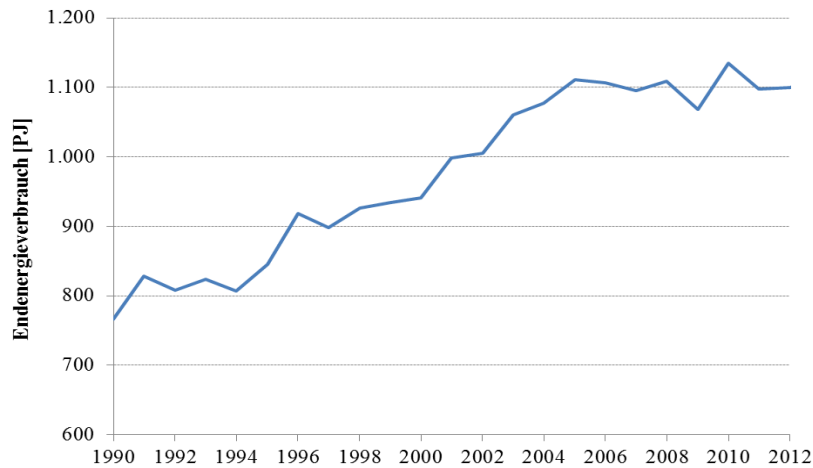
Das Klima und Energiepaket der EU mit den 20-20-20 Zielen sowie geplante nachfolgende Pakete wurden bereits in der Einleitung angeführt. Die darin enthaltenen Ziele beinhalten die wichtigsten Parameter einer nachhaltigen Energiesystems in Form von Effizienzsteigerung, Nutzung erneuerbarer Energieträger und Reduktion der Treibhausgasemissionen, wobei sich letzteres nicht auf die Energienutzung beschränkt.

#### 2.3.3.1 Effizienzsteigerung der Energienutzung

Die Effizienzsteigerung und folglich die Reduktion des Energieverbrauches nimmt direkten Einfluss auf die weiteren Ziele des Klima- und Energiepaketes. Eine Senkung der verbrauchten Energie hat sofort eine Reduktion der Treibhausgase und eine Zunahme des Anteils Erneuerbarer Energie zu Folge, wenn der derzeitige Anteil erneuerbarer Energie unverändert bleibt. Seitens der EU wurde zu dieser Thematik die Energy Efficiency Directive [vgl. RICHTLINIE 2012/27/EU] erarbeitet welche in Österreich durch das im Jänner 2015 in Kraft getretenen Energieeffizienzgesetzes umgesetzt wurde [vgl. Bundes-Energieeffizienzgesetz EEffG]. In einer Studie des Umweltbundesamtes zu der Entwicklung im Energiesektor unter Berücksichtigung der Ziele für 2020 wird deutlich, dass eine Erreichung der Ziele im Bereich erneuerbare Energien nur in Verbindung mit Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und einer Stabilisierung des Endenergieverbrauches bei 1.100 PJ möglich sind [vgl. Krutzler et al. 2009, S. 59]. In dieser Studie wurden Modellszenarien basierend auf den bestehenden und geplanten Maßnahmen erstellt und die Energieverbräuche für die verschiedenen Energieträger sowie der Anteil erneuerbarer Energie ermittelt. Die Entwicklung des Endenergieverbrauches in Österreich ist in Abbildung 9 dargestellt.



## - 2. Nachhaltigkeit - ein System im Wandel -



**Abbildung 9 Endenergieverbrauch in Österreich seit 1990**

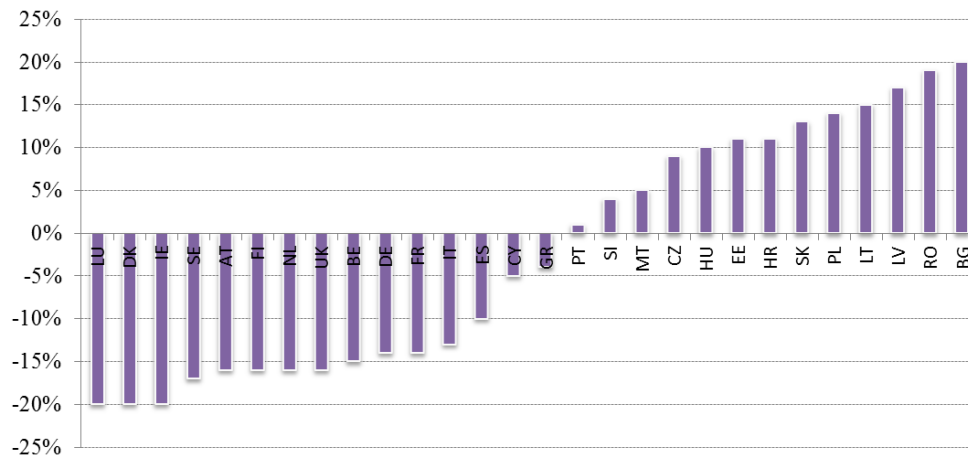
*Quelle: eigene Darstellung nach Statistik Austria 2013*

### 2.3.3.2 Reduktion der Treibhausgase

Der Klimaschutz und hier im speziellen die Reduktion der Treibhausgase spielt in der Klima- und Energiepolitik der EU eine zentrale Rolle. Die EU verfolgt dabei zwei Strategien. Die Reduktion von Emissionen aus der Industrie wird durch ein Emissions-Handels-System (EU-ETS) reguliert. Hier werden die verfügbaren Zertifikate jährlich reduziert, so dass im Jahr 2020 21 % der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 2005 eingespart werden können. Außerhalb des EU-ETS werden die Mitgliedsstaaten verpflichtet Maßnahmen zu setzen, um die vereinten Einsparungsziele zu erreichen. Die EU verfolgt dabei ein Effort-Sharing-System, was bedeutet, dass länderspezifische Einsparungsziele den Möglichkeiten des Landes entsprechend festgelegt wurden. Im Mittel wird dadurch eine Einsparung von 10 % im Vergleich zum Jahr 2005 erreicht, die länderspezifischen Zahlen sind in Abbildung 10 zusammengefasst. [vgl. Europäische Kommission<sup>c</sup>]

Österreich verpflichtet sich zu einer Einsparung von 16 %. Um dies zu erreichen wurde im Jahr 2011 das Klimaschutzgesetz (KSG) beschlossen welches die Erstellung von Maßnahmen zur Erreichung der Ziele in den Sektoren, Abfallwirtschaft, Energie und Industrie (außerhalb EU-ETS), Fluorierte Gase, Gebäude, Landwirtschaft und Verkehr vorsieht [vgl. BMLFUW<sup>b</sup>]. Für die Jahre 2013-2014 wurde ein Maßnahmenkatalog erarbeitet, welcher in den Folgejahren erweitert werden soll. Die darin angeführten Maßnahmen sollen die Erreichung der für 2020 gesteckten Ziele ermöglichen. Wie der aktuelle KSG-Fortschrittsbericht zeigt, führen die bereits definierten Maßnahmen in den ersten Jahren zu ausreichend Treibhausgaseinsparungen. Für die Erreichung der

Klimaziele für 2020 müssen jedoch wie vorgesehen noch weitere Maßnahmen gesetzt werden [vgl. BMLFUW 2014]. Vergleicht man die tatsächlichen Emissionen mit den Modellszenarien für die Entwicklung bis 2020 auf Basis der bereits bestehenden Maßnahmen, erkennt man, dass vor allem im Verkehrssektor zusätzliche Maßnahmen erforderlich werden [vgl. Umweltbundesamt 2013, S. 61].



**Abbildung 10 THG-Einsparungsziele der EU-MS außerhalb des EU-ETS bis zum Jahr 2020**

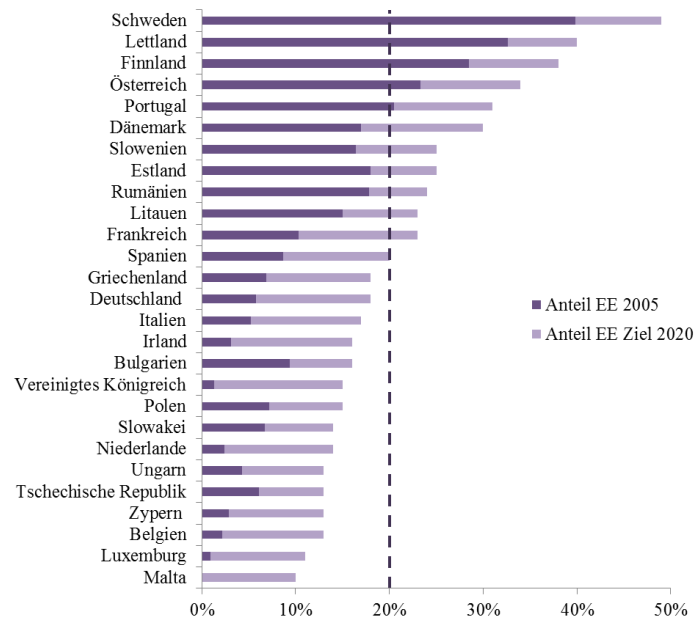
*Quelle: eigene Darstellung nach Europäische Kommission<sup>c</sup>*

Dass der Reduktion der Treibhausgasemissionen die höchste Priorität zugewiesen ist in den vorgeschlagenen Zielen für 2030 deutlich erkennbar. Durch dieses neue Ziel einer 40 prozentigen Reduktion von Treibhausgasemissionen wird dieses Thema erneut ins Zentrum jeder energiepolitischen Diskussion gerückt. Diese Entwicklung wird durchaus kritisch gesehen und von Experten eine stärkere Fokussierung der Energieeffizienz empfohlen [vgl. Steinmüller und Tichler 2014].

### 2.3.3.3 Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie

In der EU Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (2009/28/EG) wurde das für die EU geltende Ziel von 20 % erneuerbare Energie im Jahr 2020 festgelegt. Ähnlich den Treibhausgaseinsparungszielen sind die individuellen Ziele der Mitgliedsstaaten unterschiedlich. Auch hier wurden die Ziele unter Rücksichtnahme der nationalen Möglichkeiten bestimmt. Die exakten Anteile erneuerbarer Energie für das Jahr 2020 sind in der Richtlinie 2009/28/EG Annex 1 festgehalten. Die Startwerte im Jahr 2005 sowie die Ziele des Anteils Erneuerbarer Energie (EE) für das Jahr 2020 sind in Abbildung 11 dargestellt.

- 2. Nachhaltigkeit - ein System im Wandel -



**Abbildung 11 Anteil Erneuerbarer Energien (EE) der EU-MS im Jahr 2005 und Ziele für das Jahr 2020. EU-Gesamtziel 20 %**

Quelle: eigene Darstellung nach RICHTLINIE 2009/28/EG Anhang I

Um die Erreichung dieser Ziele zu gewährleisten wurde in der Richtlinie 2009/28/EG außerdem festgelegt, dass alle EU-Mitgliedsstaaten nationale Aktionspläne erarbeiten müssen, welche die notwendigen Maßnahmen für die Erreichung der Ziele zusammenfassen sollen. Für Österreich zeigt Tabelle 5 die in diesem Zusammenhang erhobenen Potentiale für die verschiedenen Energieträger [vgl. BMLFUW 2009, S.15].

**Tabelle 5 Realisierbare Potentiale bis 2020 zur Erreichung des 34 % Zieles<sup>a</sup>**

Quelle: eigene Darstellung nach BMFLUW 2009

	Ist-2005 [PJ]	Potential-2020 [PJ]
<b>Wasserkraft</b>	<b>129,1</b>	<b>144-154</b>
<b>Bioenergie</b>	<b>176,4</b>	<b>208-272</b>
Landwirtschaft	4,7	51-55
Forstwirtschaft	117,9	127-157
Abfälle und Ablauge	44,8	60
<b>Sonstige Erneuerbare</b>	<b>12,6</b>	<b>84-92,3</b>
Photovoltaik	0,1	7,2-10,8
Solarwärme	3,8	26-28
Wind	4,8	26-26,5
Wärmepumpe	3,9	25-27
<b>Summe</b>	<b>318</b>	<b>436-518,3</b>

a...Ist-Stand ist vorwiegend Primärenergie. Potentiale sind überwiegend Endenergiepotentiale, nur im Bereich „Bioenergie“ teilweise auch Primärenergiepotentiale. Differenzbildung nicht möglich

Neben der in Österreich starken Wasserkraft kommt dabei auch der Energie aus Biomasse eine zentrale Rolle zu. Trotz des geringeren globalen Potentials von Biomasse wie in Tabelle 3 angeführt, ist ihre Nutzung in der Systemumstellung für Österreich (sowie auch für alle anderen EU-Staaten) von besonderer Wichtigkeit. Dies lässt sich vor allem dadurch erklären, dass für alle fossilen Energieträger ein aus Biomasse herstellbares Pendant existiert [vgl Kaltschmitt et al. 2009, S.19]. Die Nutzung von Bioenergie ist somit ohne große infrastrukturelle Veränderung möglich. Durch die Photosynthese stellt die Natur bereits ein Syntheseschritt zur Verfügung, der Sonnenenergie in speicherbare Form überführt. Eine bedarfsgerechte Produktion wird dadurch möglich. Aufgrund der Wichtigkeit in der kurz- und mittelfristigen Systemumstellung auf ein nachhaltiges Energiesystem wurde Biomasse als Energieträger in der vorliegenden Arbeit für eine detailliertere Betrachtung ausgewählt.

### **3 Biomasse und ihre Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung**

Neben der energetischen Nutzung erfüllt Biomasse für den Menschen aber auch für andere Lebewesen weitere wichtige Aufgaben. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist auf diese Interessen Rücksicht zu nehmen. In den nachfolgenden Kapiteln wird aufgezeigt, wie eine nachhaltige Nutzung dieser Ressource aussieht und welche Rolle dabei die energetische Verwertung spielt.

#### **3.1 Biomasse - Entstehung, Nutzung, Abbau und Nachhaltigkeit**

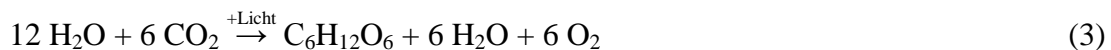
Biomasse bezeichnet die Gesamtheit organischen Materials eines Ökosystems. Sie hat ihren Ursprung in der einstrahlenden Sonnenenergie. Die Energie eines Ökosystems fließt dabei über den Prozess der Photosynthese von den Primärproduzenten über die Konsumenten zu den Destruenten. Auf jeder Stufe wird der größte Teil der dort eintreffenden Energie von den Organismen in Form von Wärme abgegeben. Diese Energie geht im System verloren und wird als Infrarotstrahlung an die Atmosphäre abgegeben. Jährlich wird etwas weniger als 1% der eintreffenden Sonnenenergie in Biomasse umgewandelt, was weltweit einer jährlichen Biomasseproduktion von etwa 200 Milliarden Tonnen (Werte schwanken in der Literatur) entspricht [vgl. Raven et al. 2006, S.798]. Wie jeder Kreislauf hat auch der Energiekreislauf eines Ökosystems eine ausgeglichene Bilanz. Die Zahl der Konsumenten aber auch der Destruenten ist von der

Zahl der Produzenten abhängig. Veränderungen in Art und Zahl einer dieser drei Gruppen hat direkte Auswirkungen auf den gesamten Kreislauf und beeinflusst die Biodiversität unseres Planeten. Die Zahl der Produzenten ist wiederum durch die für das Wachstum notwendige Fläche limitiert. In einem nachhaltigen System ist also darauf zu achten, dass ausreichend Fläche für den Erhalt unseres Ökosystems zur Verfügung steht.

### 3.1.1 Kohlenstoffkreislauf und Photosynthese

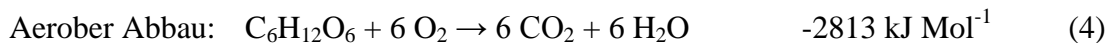
Der oben beschriebene Energiekreislauf der Erde steht in direkter Verbindung mit dem Kohlenstoffkreislauf, da die eintreffende Sonnenenergie durch die Photosynthese als Kohlenstoffverbindungen gespeichert wird. In einer vereinfachten Darstellung werden in der Photosynthese die beiden anorganischen Verbindungen Wasser und Kohlendioxid in Glucose, Wasser und Luftsauerstoff umgewandelt. Die Glucose ist in weiterer Folge zuständig für das Biomassewachstum. [vgl. Hartmann 2015, S.3]

Die Reaktionsgleichung der Photosynthese lautet:



Die Photosynthese entzieht also der Atmosphäre Kohlenstoff und baut es über die Primärproduzenten in das Ökosystem ein. Der Kohlenstoff gelangt über die Nahrungskette weiter von den Herbivoren zu den Karnivoren. In allen Stufen wird dabei ein Teil des Kohlenstoffes durch Atmung in Form von  $\text{CO}_2$  an die Atmosphäre abgegeben. Das Ende der Nahrungskette bilden die bereits erwähnten Destruenten, die den Kohlenstoff aus tierischen und Pflanzlichen Gewebe abbauen und wieder in die Atmosphäre entlassen. [vgl. Smith und Smith 2009, S.631]

Dieser finale Abbau kann aerob (mit Sauerstoff) oder anaerob (ohne Sauerstoff) erfolgen. Die zugehörigen Gleichungen lauten:



Die in der Glucose gespeicherte Energie wird dabei als Wärme abgegeben, wobei beim anaeroben Abbau im Gegensatz zu aeroben Abbau ein Großteil der Energie im entstehenden Methan enthalten bleibt.

- 3. Biomasse und ihre Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung -

Der Mensch kann sich die über die Photosynthese gespeicherte Energie außerhalb der Nahrungskette zu Nutze machen, indem er in diesen natürlichen Kreislauf eingreift. Dies kann über Biomasseverbrennung (nutzbare Energie  $-2813 \text{ kJ Mol}^{-1}_{\text{Glucose}}$ ) oder die Verbrennung des im anaeroben Abbau entstehenden Methans (nutzbare Energie  $-2672 \text{ kJ Mol}^{-1}_{\text{Glucose}}$ ) erfolgen.

**3.1.2 Die menschliche Nutzung von Biomasse**

Der Mensch ist Konsument im Sinne der Ökologie und auf die Energiezufuhr durch Nahrung angewiesen. Als Allesfresser kann der Mensch pflanzliche oder tierische Biomasse verwerten. Die Aufnahme von Nahrung ist allerdings nur ein Nutzungspfad von vielen, welche der Mensch in seiner Entwicklungsgeschichte für die Verwertung von Biomasse etabliert hat. Das menschliche Einwirken auf das jährliche Biomassewachstum wird als Menschliche-Verwendung-der-Nettoprimärproduktion (HANPP = human appropriation of net primary production) bezeichnet, wobei die Nettoprimärproduktion (NPP) den jährlich durch Photosynthese fixierten Kohlenstoff bezeichnet. Nach Haberl et al. [vgl. Haberl et al. 2013] beträgt die HANPP zirka 24 % der NPP (Werte schwanken in der Literatur), wobei starke regionale Schwankungen des HANPP beobachtbar sind [vgl. Imhoff et al. 2004]. Von der HANPP entfallen etwa 40 % auf menschlichem Flächenverbrauch, der eine Reduktion der NPP zur Folge hat. Die restlichen 60 % werden geerntet oder vorsätzlich zerstört [vgl. Haberl et al. 2013]. Die primären Verwertungswege sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

**Tabelle 6 Die wichtigsten menschlichen Nutzungspfade für die Verwertung von Biomasse**

*Quelle: eigene Darstellung nach Imhoff et al. 2004*

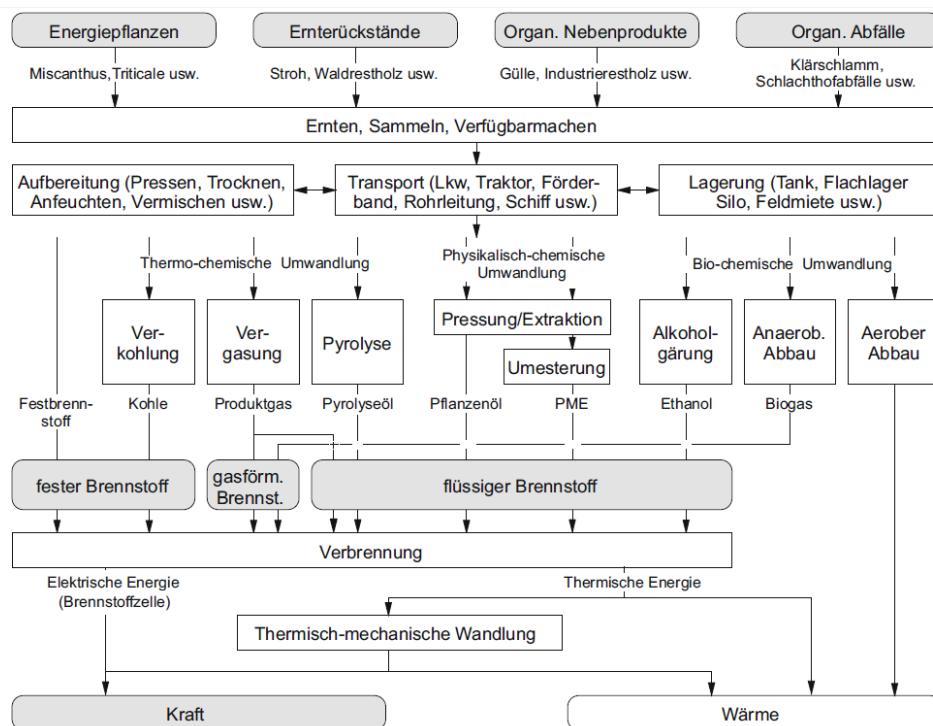
Produktion von...	Kohlenstoff [Pg]	prozentuell
Pflanzlichen Nahrungsmitteln	1,73	15,0%
Fleisch	1,92	16,6%
Milch	0,27	2,3%
Eiern	0,17	1,5%
Papier	0,28	2,4%
Fasern	0,36	3,1%
Holz (Brennstoff)	4,31	37,3%
Holz (Baustoff)	2,5	21,7%
Summe	11,54	100,0%

### - 3. Biomasse und ihre Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung -

Ein Viertel der nutzbaren Biomasse wird also für die Befriedigung der Bedürfnisse nur einer Rasse herangezogen, was direkten Einfluss auf Anzahl und Lebensweise anderer Arten haben muss [vgl. Haberl et al. 2007]. Die Nutzung von Biomasse ist somit nicht grundsätzlich, wie oftmals vereinfacht dargestellt, als nachhaltig zu bewerten. Vielmehr gilt es eine ökologisch verantwortungsvolle Nutzung von Biomasse zu definieren [vgl. ESEIA 2014]. Dabei gilt es auf einen verantwortungsvollen Umgang mit dieser Ressource entlang des gesamten Lebenszyklus zu achten, die Ressource so effizient als möglich einzusetzen und die Qualität der für das Wachstum notwendigen Fläche zu erhalten.

Aus den Zahlen in Tabelle 6 ist außerdem ersichtlich, dass nur 35 % der durch den Menschen genutzten Biomasse als Nahrung verwertet wird. Ein ebenso großer Teil wird bereits heute für die Energieproduktion verwendet, aber auch die stoffliche Verwertung spielt eine entscheidende Rolle.

Die Möglichkeiten der Energieproduktion aus Biomasse sind vielfältig und nicht wie aus Tabelle 6 geschlussfolgert werden könnte auf Holz beschränkt. Typische Bereitstellungsketten von Energie aus Biomasse sind in Abbildung 12 zusammengefasst.



**Abbildung 12 Möglichkeiten der Energiebereitstellung aus Biomasse**

Quelle: Kaltschmitt et al. 2014

Es ist davon auszugehen, dass vor allem die stoffliche Verwertung von Biomasse in den kommenden Jahren zunehmen wird, da langfristig nicht nur im Energiesektor ein Umstieg auf erneuerbare Rohstoffe notwendig ist.

### **3.2 Der Weg zu einer biobasierten Gesellschaft**

Die Entwicklung einer biobasierten Gesellschaft ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung. Dabei gilt es langfristig alle Prozesse durch erneuerbare Rohstoffe zu ersetzen, die dem Prinzip der Nachhaltigkeit nicht entsprechen. Die Verwendung fossiler Rohstoffe entspricht nur dann dem Prinzip der Nachhaltigkeit, wenn die Rate der Entnahme, der Rate der Wiedereingliederung der Rohstoffe ins System gleichkommt. Dies ist bei der Verbrennung von fossilen Rohstoffen zur Energieerzeugung nicht der Fall. Aus diesem Grund ist die Energiebereitstellung aus Biomasse auch ein zentrales Anliegen am Weg zu einer biobasierten Gesellschaft [vgl. ESEIA 2014, S.4].

Wie bereits weiter oben erwähnt ist der limitierende Faktor für das Biomassewachstum und damit deren Nutzung die verfügbare Fläche. Setzt man nun diese limitierte Verfügbarkeit mit den möglichen menschlichen Verwertungsformen und den Prinzipien der nachhaltigen Nutzung in Verbindung wird deutlich, dass der Wettstreit um die Ressource Biomasse weiter zunehmen wird.

An dieser Stelle gilt es zu berücksichtigen, dass auch um die Flächennutzung starke Konkurrenzsituationen bestehen. Einerseits zwischen unterschiedlichen Biomassearten, aber auch mit anderen menschlichen Interessen, die zu einem Flächenverbrauch führen. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass in den kommenden Jahrzehnten das urbare Land je Einwohner abnehmen wird. [vgl. ESEIA 2014, S.11f]

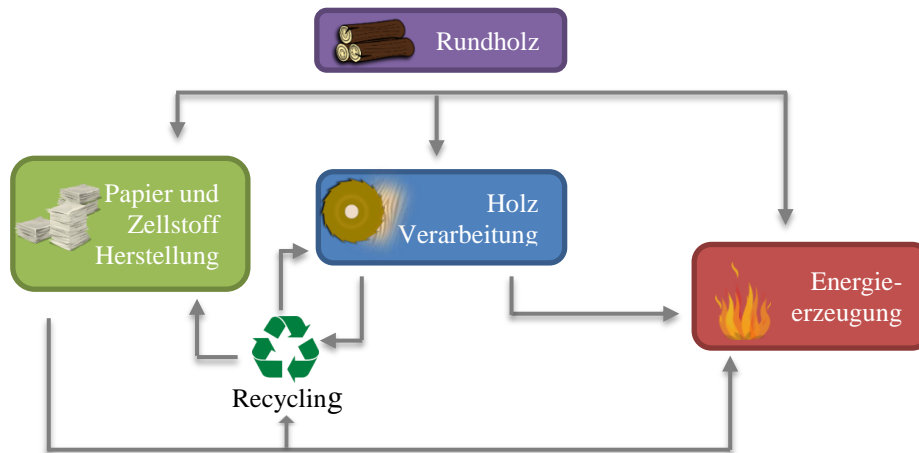
Der Verbrauch von Fläche ist allerdings nicht der alleinige ökologische Einfluss den der Mensch durch intensive Biomassenutzung erwirkt. Die wichtigsten sind der Einfluss auf regionale Wasserzyklen und der Einsatz von Stickstoffdünger. [vgl. ESEIA 2014, S.12f]

Um den ökologischen Druck durch intensive Biomassenutzung so gering als möglich zu halten, ist auf eine möglichst effiziente Nutzung der Ressource Rücksicht zu nehmen. Dabei ist es anzustreben, die Ressource so lange als möglich in der Nutzungskette zu erhalten und dabei möglichst viele Interessen befriedigen zu können. [vgl. ESEIA 2014 S.12] Dies kann in Form von Wiederverwendung, Wiederverwertung und kaskadischer Rohstoffnutzung erfolgen.



### 3.2.1 Die kaskadische Nutzung von Biomasse

Kaskadische Rohstoffnutzung bedeutet die schrittweise Wiederverwertung des Produktes nach dem Ende seines Lebenszyklus. Dabei sollte speziell auf die Substituierbarkeit des eingesetzten Rohstoffes Rücksicht genommen werden. Einige Interessen können nicht oder nur schwer durch andere Ressourcen bedient werden (z.B. Nahrung, Papierherstellung) und sind daher im Nutzungskreislauf prioritär zu behandeln [vgl. ESEIA 2014, S.37] Energieerzeugung, welche auch durch andere erneuerbare Energieträger erfolgen kann, sollte daher immer am Ende des Nutzungspfades angesiedelt sein [vgl. Arnold et al. 2009, S.27].



**Abbildung 13 Kreislaufwirtschaft veranschaulicht am Beispiel Rundholz**  
*Quelle: eigene Darstellung*

Am Beispiel Holz soll die kaskadische Rohstoffnutzung erklärt werden. Dazu findet man in Abbildung 13 eine Übersicht über Verwertungsmöglichkeit von Holz.

Holz ist Ausgangsstoff für die Papier- und Zellstoffherstellung. Teile der benötigten Fasern und Papiere können zwar über Recycling wiederverwendet werden, allerdings ist die Nutzung des Altpapiers, aufgrund der Faserverkürzung beim Aufarbeitungsprozess, mit sechs bis sieben Zyklen beschränkt [vgl. Staudt et al. 1999, S.17]. In Europa wird etwa ein Fünftel des geernteten Holzes in Papier- und Zellstofffabriken verbraucht [vgl. Mantau 2012, S.10]. Andere Einsatzgebiete von Holz sind Plattenherstellung, Bauholz oder Möbelholz [vgl. Piringer und Fischer 2003]. Auch die thermische Verwertung von Holz ist eine mögliche Verwertungsform [vgl. Mantau 2012, S.10]. Da Energie auch aus Reststoffen der anderen Verwertungsformen oder aus ganz anderen Produkten hergestellt werden kann, sollte die energetische Verwertung des Primärproduktes Holz

vermieden werden. Prof. Merl [vgl. Merl 2006], Lehrender an der TU Wien hat die kaskadische Rohstoffnutzung von Holz wie folgt kommentiert:

*„Aus ökologischer Sicht müssen deshalb unter Einbeziehung der erzielbaren Wertschöpfung sowie der damit verbundenen Arbeitsplätze entlang der Wertschöpfungskette die Überlegungen in der Holznutzung darauf abzielen, Holz zuerst hochwertig stofflich zu nutzen und letztlich effizient energetisch mit möglichst geringem Transportaufwand zu verwerten. Stoffliche und energetische Verwertung müssen unter Betrachtung des gesamten Systems aneinander gekoppelt optimiert werden. Eindimensionale, beispielsweise nur auf den energetischen Blickwinkel fokussierte Betrachtungen können zu ökonomischen und ökologischen Fehlentwicklungen führen....“ [Merl 2006]*

Neben der von Prof. Merl erwähnten Erhöhung der Wertschöpfung des Produktes ist kaskadische Rohstoffnutzung auch aus Sicht des Umweltschutzes anzustreben. Dies betrifft einerseits die ökologischen Auswirkungen bei der Brauchbarmachung wie auf Seite 26 bereits erwähnt, aber auch eine möglichst lange Fixierung des während der Photosynthese gespeicherten Kohlendioxids.

### **3.2.2 Kaskadische Rohstoffnutzung – das Bioraffineriekonzept**

Abgeleitet von der Rohölraffinerie hat sich für die Veredelung von Biomasse das Wort Bioraffinerie entwickelt. Voraussetzung für die Subsumierung unter dem Begriff Bioraffinerie ist immer die stoffliche und energetische Verwertung des Rohstoffes, welche eindeutig durch die auf europäischer Ebene erarbeitete Wortdefinition der IEA festgelegt wurde.

*“Biorefinery is the sustainable processing of biomass into a spectrum of marketable products and energy”* *[IEA Bioenergy Task 42 S.7]*

Bei Bioraffinerien unterscheidet man energie- und produktorientierte Bioraffinerien, wobei auch bei den energiebasierten Technologien Nebenströme stofflich verwertet werden müssen.

Eine der bekanntesten und am längsten erforschten energiebasierten Bioraffinerien für die Verwertung von Lignocellulosen ist die Bioethanolanlage. In ihr wird die in Form von Cellulose und meist auch Hemicellulose gespeicherte Energie durch biotechnologische Verfahren in Ethanol umgewandelt. Hier gilt es zu beachten, dass

Ethanol nicht nur als Treibstoff sondern auch für die Synthese Verwendung finden kann. Für eine bessere Wirtschaftlichkeit des Prozesses ist neben der Herstellung von Ethanol auch die Produktion hochpreisiger Erzeugnisse notwendig.

### **3.3 Organische Reststoffe**

Wie bereits in Kapitel 3.1 festgehalten bezeichnet der Begriff Biomasse die gesamte organische Masse eines Ökosystems. Neben dieser ökologischen Definition gilt es den Rechtsbegriff Biomasse abzugrenzen, der den Begriff auf den menschlichen Wirkungsbereich beschränkt. Nach § 5 Abs 1 Z 7 Ökostromgesetz 2012 (ÖSG 2012) bezeichnet Biomasse

*... den biologisch abbaubaren Anteil von Erzeugnissen und Rückständen der Landwirtschaft mit biologischem Ursprung (einschließlich pflanzlicher und tierischer Stoffe), der Forstwirtschaft und damit verbundener Industriezweige einschließlich der Fischerei und der Aquakultur sowie den biologisch abbaubaren Anteil von Abfällen gemäß Z 1; der biologisch abbaubare Anteil von Abfällen, die nicht in der Anlage 1 angeführt sind, ist nicht Biomasse im Sinne dieses Bundesgesetzes...* [Ökostromgesetz 2012]

Biomasse bezeichnet also Primärprodukte aus Land- und Forstwirtschaft, sowie organische Rückstände und Abfälle. Organische Reststoffe bieten für die energetische Nutzung, gegenüber Primärprodukten den Vorteil, dass bisher noch keine oder nur kaum Nutzungsmöglichkeiten vorhanden sind. Sie können nach Gwehenberger und Narodoslawsky in drei Rohstoffgruppen eingeteilt werden (vgl Tabelle 7 nächste Seite).

#### **3.3.1 Energetische Verwertung organischer Reststoffe**

Bei der energetischen Verwertung von Reststoffen ist im Vergleich zu anderer Biomasse vorteilhaft, dass für diese Rohstoffe oft keine alternativen Verwertungsformen zur Verfügung stehen. Es kann dadurch auch, wie im Kapitel 3.2.1 Kaskadische Biomassenutzung beschrieben, eine Technologie mit geringerer Priorität mit Substrat bedient werden.

**Tabelle 7 Einteilung organischer Reststoffe**  
eigene Darstellung nach ESEIA 2014, S.20

Rohstoffkategorie	Ursprung	Beispiele
SEKUNDÄR	Landwirtschaftliche Reststoffe	Gülle, Mist
		Schlachtabfälle
	Industrieabfälle	Talg
		Ölpressekuchen
		Glycerol aus der Biodieselher.
		Getrockneter
		Fermentationsrückstand
		Schwarzlauge
		Zuckerrübenschnitzel
		Trester
		Gerbrückstände
		Ernterückstände aus Land- und Forstwirtschaft
	Stroh	
	Blätter von Feldfrüchten	
Rückstände aus Weingärten		
TERTIÄR	Kommunale Abfälle	Altpapier
		Altplastik
		Organischer Hausmüll
		Gartenschnitt
		Alt-Speisefett
SONSTIGES	Ungenutzte Biomasse	Abwasser
	Derzeit nicht kultiviertes Land	Gras
		Mikroalgen

Für die energetische Nutzung von Reststoffen gelten dieselben Rahmenbedingungen wie bei der Nutzung von Biomasse. Die organische Masse kann wie in Abbildung 12 bereits dargestellt verbrennt, vergast oder biotechnologisch verwertet werden. Im Vergleich zu primären Rohstoffen ist man bei der Verwertung von organischen Reststoffen allerdings mit zusätzlichen Herausforderungen konfrontiert. Ist ein optimiertes Logistikkonzept für Bioressourcen im Allgemeinen schon schwierig zu realisieren, spielen Transportkosten bei organischen Reststoffen oft noch viel bedeutendere Rollen. Hier ist vor allem auf den geringen Energiegehalt der einsetzbaren Rohstoffe zu achten und die daraus resultierenden maximalen Transportwege [vgl. ESEIA 2014 S.15].

**Tabelle 8 Energiedichten verschiedener Biomassen**  
*Quelle: eigene Darstellung nach ESEIA 20014*

	Feuchtigkeit [% m/m]	Energiedichte [MJ m <sup>-3</sup> ]
Heizöl	0	36.000
Rapssamen	9	17.220
Weizen	15	10.050 – 11.250
Hackschnitzel	6	2.440
organischer Hausmüll	70	1.800
Stroh	15	1.500 – 2.025
Gülle	95	700

Bei biotechnologischer Verwertung sind neben der geringen Energiedichte vor allem Eigenschaften wie Inhomogenität und schwierigere biologische Abbaubarkeit Herausforderung in der energetischen Verwertung von Reststoffen [Sims und Taylor 2008]. Für die Reststoffe Gülle und Weizenstroh werden die jeweiligen Herausforderungen in den Kapiteln 6 und 7 detailliert bearbeitet.

### **3.4 Biotechnologische Verfahren für die energetische Nutzung von Biomasse**

Bei der biotechnologischen Energieerzeugung aus Biomasse kann man Fermentationen zu gasförmigen oder flüssigen Energieträgern unterscheiden. Fermentationen mit Gasen als Endprodukte nennt man Biogasanlagen wobei man hier Methan- und Wasserstofffermentationen unterscheiden kann. Bei der Fermentation von Biomasse zu Flüssigprodukten sind die Alkohole Butanol, Ethanol und Methanol die gewünschten Endprodukte. Beim biologischen Abbau von Biomasse spalten Mikroorganismen und Enzyme die komplexen Biopolymere zu immer kleineren Einheiten, bis das gewünschte Endprodukt erhalten wird. In vielen Fällen muss die Biomasse um in industriellen Prozessen in kurzer Zeit abgebaut zu werden nach der Ernte konditioniert werden. Durch diese Vorbehandlung der Biomasse wird die Zugänglichkeit für Enzyme und Mikroorganismen verbessert und die Abbaugeschwindigkeit erhöht. Unterschiedliche Technologien nutzen verschiedene biologische Abbauwege und Organismen, und werden daher auch bei ganz unterschiedlichen Prozessbedingungen betrieben. Die beiden Prozesse Methanfermentation und Ethanolfermentation werden im Rahmen dieser Arbeit detaillierter beschrieben. Allgemein lässt sich für biologische Verfahren

festhalten, dass bei jeder Fermentation ein Fermentationsrückstand gewonnen werden kann. Dabei handelt es sich ebenfalls um in Biomasse umgesetzte Kohlenstoffverbindungen. Dieser Kohlenstoff konnte zwar im Prozess nicht in Energie umgewandelt werden, steht jedoch als organischer Dünger oder Futtermittel zur Verfügung.

### **3.5 Die Bewertung der Nachhaltigkeit von Biomasse Verwertung**

Wie in Abschnitt 3.2 dargestellt gibt es eine Vielzahl verschiedener Prozesse, die um denselben Rohstoff konkurrieren, wobei neben dem Einsatz unterschiedlicher Technologien für ähnliche Erzeugnisse auch die Herstellung verschiedener Produkte erfolgen kann. Aufgrund der limitierten Fläche und der dadurch nur begrenzt zur Verfügung stehenden Biomasse ist es im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung notwendig, diese Prozesse vergleichend zu bewerten und hinsichtlich ihrer sozialen, ökonomischen aber auch ökologischen Auswirkungen zu bewerten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Prozesse für die Verwertung biogener Rohstoffe nur ökologisch bewertet. Die sich ergebenden sozialen und ökonomischen Auswirkungen wurden jedoch angesprochen.

## **4 Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung**

### **4.1 Methanfermentation**

Methanfermentation oder auch Biogasfermentation bezeichnet die biologische Umwandlung von organischer Masse zu Methan und Kohlendioxid. Dieser Prozess findet bei atmosphärischen Druck und unter Ausschluss von Luftsauerstoff statt.

#### **4.1.1 Begriffbestimmungen**

Biogas: Als Biogas wird jenes Gas bezeichnet, welches beim anaeroben Abbau von organischer Masse entsteht. Es ist ein Gemisch aus Methan, Kohlendioxid, Wasser, Wasserstoff und andern Spurengasen wie z.B Schwefelwasserstoff.

Biomethan: Als Biomethan wird der Anteil des Methans im Biogas bezeichnet. Methan ist jener Bestandteil im Biogas der energetisch genutzt werden kann. Der Methangehalt im Biogas bestimmt den Heizwert des Gases. Es kann durch unterschiedliche Verfahren vom restlichen Gas im Biogas abgetrennt werden.

#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

Anaerober Abbau von Biomasse: Biomasse kann grundsätzlich mit oder unter Ausschluss von Sauerstoff erfolgen. Beim anaeroben Abbau, also dem sauerstofffreien Abbau von Biomasse, entsteht neben dem Inertgas Kohlenstoffdioxid auch Methan. Aufgrund des fehlenden Luftsauerstoffs findet keine vollständige Oxidation des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs statt.

Substrat: Als Substrat bezeichnet man im Zusammenhang mit Biogasanlagen jene Stoffe, die in der Anlage zu Biogas umgewandelt werden. Es ist dies also ein anderer Begriff für die biogenen Rohstoffe der Anlage.

Fermentation/Fermenter: Fermentation bezeichnet eine Umwandlung organischer Stoffe mit der Hilfe von Mikroorganismen. Als Fermenter wird jener Behälter bezeichnet, in dem diese Umwandlungsreaktion stattfindet. Fermentationen laufen meist unter Kontrolle der Umweltbedingungen wie Temperatur und pH-Wert ab.

Batch-Fermentation: Die Batch Fermentation ist ein diskontinuierliches Verfahren. Dies bedeutet, dass der Fermenter nur einmal und zwar zum Beginn des Abbaus mit allen notwendigen Nähr- und Rohstoffen befüllt wird. Nach Verbrauch der Nährstoffe und dadurch dem Ende des Abbaus wird der Fermenter vollständig entleert und ein neuer Zyklus kann beginnen. Die Batch-Fermentation zur Biogasgewinnung findet hauptsächlich im Labor Anwendung.

Kontinuierliche Fermentation: Die kontinuierliche Fermentation ist durch einen konstanten Input und Outputstrom gekennzeichnet. Im Reaktor stellen sich konstante Prozessbedingungen ein. Dieser konstante Betriebszustand wird als Steady-State bezeichnet.

Quasi kontinuierliche Fermentation: Bei langsamen Reaktionsgeschwindigkeiten und langen Verweilzeiten kann die permanente Substratzugabe durch eine periodische Substratzugabe ersetzt werden. Die meisten Biogasanlagen werden auf diese Art betrieben. Die Substratzugabe erfolgt dabei mehrmals täglich. Je nach Reaktordesign laufen die vier Stufen des anaeroben Abbaus (nähere Information im Kapitel 4.1.3) dabei getrennt voneinander oder parallel ab.

Einstufige Biogasfermentation: Bei einer einstufigen Fermentation gibt es nur einen Fermenter. In diesem Reaktor werden die Umweltbedingungen der sensibelsten Mikroorganismen eingestellt. In Biogasanlagen entspricht dies den Bedingungen der Methanbakterien.

Mehrstufige Biogasfermentation: Der anaerobe Abbau findet in mindestens zwei voneinander räumlich getrennten Fermentern statt. In den Reaktoren können dadurch verschiedene Umweltbedingungen eingestellt werden. Es kann dadurch in vielen Fällen ein stabilerer und schneller Abbau des Substrates gewährleistet werden.

Hydrolyse: Als Hydrolyse bezeichnet man die Spaltung einer chemischen Verbindung durch Reaktion mit Wasser. Beim anaeroben Biomasseabbau werden komplexe Polymere (Kohlenhydrate, Proteine etc.) in Monomere (Zucker, Aminosäuren etc.) umgewandelt.

Wachstumsgeschwindigkeit: Die Wachstumsgeschwindigkeit bezeichnet das Wachstum von Organismen in Abhängigkeit der Zeit. Sie ist spezifisch für jeden Organismus. Die Wachstumsgeschwindigkeit kann durch Umweltfaktoren beeinflusst werden. Sie ist abhängig von Stoffwechsellistung des Organismus. Steigende Temperaturen (innerhalb spezifischer Grenzen) begünstigen den Substratumsatz und daher auch das Wachstum.

#### **4.1.2 Klassifizierung von Biogasanlagen**

Die Einteilung der verschiedenen am Markt etablierten Biogastechnologien kann anhand verschiedener Kategorien durchgeführt werden. Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale sind im folgenden Kapitel zusammengefasst:

##### 4.1.2.1 Einteilung nach dem Inputmaterial

Eine einfache und gängige Einteilung der Anlagen, welche vor allem für den Erhalt von Förderungen und Anlagengenehmigungen von Interesse ist, ist die Klassifizierung nach dem eingesetzten Substrat. So werden sogenannte Abfallverwertungsanlagen von Anlagen, welche nachwachsende Rohstoffe verwerten unterschieden. Als Unterscheidungsmerkmal dient hier vor allem die Definition des Begriffes Abfall. In Österreich ist der Begriff Abfall nach Abfallwirtschaftsgesetz (AWG). Gemäß §2 Abs. 1 AWG2002 wie folgt definiert:

*„Abfälle im Sinne dieses Bundesgesetzes sind bewegliche Sachen,*

- 1. deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat oder*
- 2. deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen (§ 1 Abs. 3) nicht zu beeinträchtigen.*



*(2) Als Abfälle gelten Sachen, deren ordnungsgemäße Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall im öffentlichen Interesse erforderlich ist, auch dann, wenn sie eine die Umwelt beeinträchtigende Verbindung mit dem Boden eingegangen sind. Die Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall im öffentlichen Interesse kann auch dann erforderlich sein, wenn für eine bewegliche Sache ein Entgelt erzielt werden kann.“* [§2 Abs. 1 AWG2002]

Unter diesen Begriff sind folglich alle organischen Reststoffe der Industrie, Gewerbe und Haushalten zu subsumieren.

Organische Reststoffe aus der Landwirtschaft wie auch Gülle und Jauche bilden, wie nachfolgender Auszug aus dem AWG zeigt, eine Ausnahme dieser Bestimmung.

*„Die Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung von Mist, Jauche, Gülle und organisch kompostierbarem Material als Abfall ist dann nicht im öffentlichen Interesse (§ 1 Abs. 3) erforderlich, wenn diese im Rahmen eines land- und forstwirtschaftlichen Betriebs anfallen und im unmittelbaren Bereich eines land- und forstwirtschaftlichen Betriebs einer zulässigen Verwendung zugeführt werden“* [§2 Abs. 3 AWG2002]

Werden diese Reststoffe im Rahmen eines landwirtschaftlichen Betriebes in einer Biogasanlage verwertet, ist diese Anlage nicht als Abfallverwertungsanlage zu klassifizieren. Da diese Reststoffe derzeit jedoch nur in geringen Mengen und meistens als Co-Substrat (Definition siehe unten) verwertet werden gibt es keine gesonderte Klassifizierung dieses Inputmaterials.

Die meisten landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden als sogenannte nachwachsende Rohstoffe (NAWARO)-Anlagen betrieben. Als Inputmaterial dienen hier vor allem eigens für die Energieproduktion in der Biogasanlage angebaute Energiepflanzen wie Mais, Miscanthus, Triticale und ähnliche, aber auch Zwischenfrüchte<sup>1</sup> sind als NAWAROs zu klassifizieren. NAWARO- wie auch Abfallverwertungsanlagen sind als Mono- und Co-Fermentation betreibbar. Diese Unterscheidung bezieht sich dabei lediglich auf die Anzahl zum selben Zeitpunkt eingesetzter Materialien.

Die für die Biogaserzeugung in Österreich am häufigsten eingesetzten Rohstoffe ihre jährlich anfallenden Gesamtmengen sowie der Anteil in Biogasanlagen eingesetzten Mengen sind in Tabelle 9 Zusammengefasst.

---

<sup>1</sup> Zwischenfrüchte bezeichnet Kulturen, die zwischen 2 Hauptfruchtarten angebaut werden

**Tabelle 9 Häufig eingesetzten Substrate in Biogasanlagen**

Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung nach Sinabel und Stürmer 2012; bmlfuw2014

	Anteil an der Gesamtmasse der Rohstoffe in BGA	Anteil der in BGA genutzten Menge an der jährl. Gesamtmasse
Silomais	37,5 %	15 %
Wirtschaftsdünger	7 %	3 %
Biogene Abfälle	10 %	8 %
Sonstige Energiepflanzen	38,5 %	-
Andere	7 %	-

Durchschnittliche Biogaserträge gängiger Biogassubstrate sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Der erzielbare Biogasertrag ist vom Energiegehalt des Rohstoffes und von der Abbaubarkeit abhängig. Biogaserträge werden in der Regel durch standardisierte Labortests bestimmt.

**Tabelle 10 Typische Biogaserträge häufig eingesetzter Substrate**

Quelle: eigene Darstellung nach Schwab und Reinhold

Substrat	TS [%]	OTS von TS [%]	Biogasertrag [L <sub>N</sub> kg <sub>OTS</sub> <sup>-1</sup> ]	Methangehalt [%]
Rindergülle (ohne Futterrest)	8	80	280	55
Schweinegülle	6	80	400	60
Grassilage (nass und angewelkt)	25	88	560	54
Maissilage (teigreif, körnerreich)	30	96	600	52
Speisereste	16	87	980	60

#### 4.1.2.2 Einteilung nach Trockenmassegehaltes des Gärrestes

Eine weitere Möglichkeit der Klassifizierung von Biogasanlagen ist die Einteilung nach dem Trockenmassegehaltes des Gärrestes, wobei Fest- und Flüssigfermentation zu unterscheiden ist. Bei Trockenmassegehalten <16% spricht man von Nassfermentation, darüber von Trockenfermentation [vgl. Bayerische Landesamt für Umwelt 2007]. Ausschlaggebend ist dabei nicht der Trockenmassegehalt des Inputmaterials sondern jener des Gärrestes. Substrate mit Trockenmassegehalten >16% können durch die Zugabe von Prozesswasser also trotzdem nass vergoren werden.

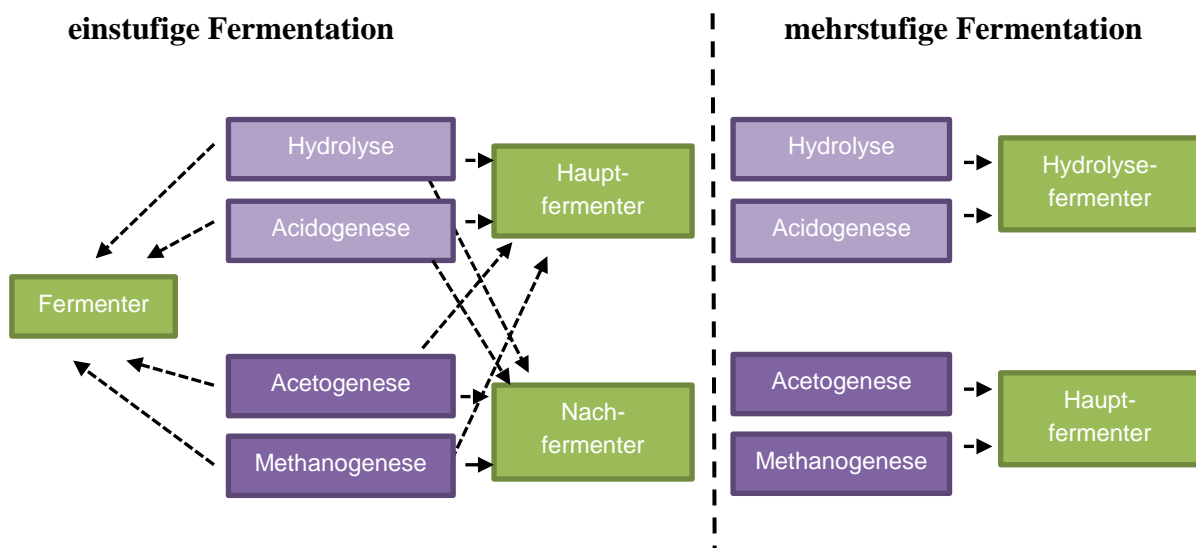
Der kritische Trockenmassegehalt von 16% ergibt sich daraus, dass Gärrest in Nassfermentationsanlagen mit konventioneller Pumpentechnik pumpfähig sein sollte.

Trockenfermentationsanlagen werden meist in befahrbaren Boxen im Batch-Verfahren betrieben [vgl. Weiland 2006]. Diese Anlagen werden aufgrund ihrer baulichen Ähnlichkeit auch als Garagenanlagen bezeichnet. Die Manipulation der Gärresten erfolgt dabei in den meisten Fällen durch Radlader oder ähnliche Geräte. Aber auch kontinuierliche Trockenfermentationen wie das Kompogassystem der Firma axpo [vgl. axpo] sind am Markt erhältlich.

#### 4.1.2.3 Einstufige und mehrstufige Fermentation

Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal bei der Klassifizierung von Biogasanlagen ist die räumliche Trennung der verschiedenen Phasen. Ausschlaggebend ist dabei nicht das Vorhandensein mehrerer Fermenter sondern die Optimierung der Reaktionsbedingungen in den einzelnen Reaktoren.

Eine Übersicht über einstufige und mehrstufige Fermentation ist in Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14 Darstellung von einstufiger und mehrstufiger (zweistufiger) Fermentation**  
*Quelle: eigene Darstellung*

Derzeit befinden sich viele Anlagen mit mehreren Fermentern im Betrieb, wobei nur die wenigsten als echte mehrstufige Fermentationen betrieben werden. In diesen Anlagen dient die höhere Anzahl an Fermentern lediglich einer Verweilzeitverlängerung bei optimalen hydraulischen Bedingungen. Die Reaktionsbedingungen in den einzelnen Fermentern sind jedoch gleich. Mehrstufige Anlagen sind meist als 2-stufige Anlagen ausgeführt. Das bedeutet, dass die ersten zwei Phasen des anaeroben Abbaus (vgl. 4.1.3 Mikrobielle Grundlagen der Biogaserzeugung) räumlich von Phase drei und vier

## - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

getrennt werden. Das Ergebnis ist ein als sogenannter Hydrolysereaktor ausgeführter Fermenter, mit kurzen Verweilzeiten und sauren Prozessbedingungen.

### 4.1.2.4 Einteilung nach der Fermentationstemperatur

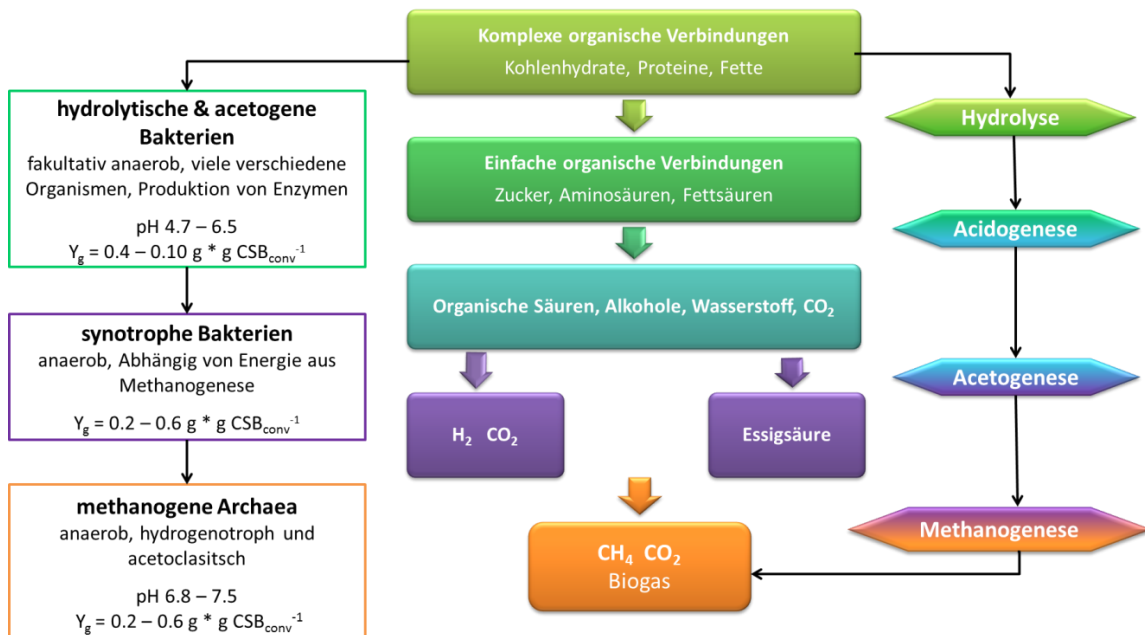
Bei Biogasanlagen werden 3 Betriebsweisen unterschieden:

- psychrophile Betriebsweise < 25 °C
- mesophile Betriebsweise 25 – 45 °C
- thermophile Betriebsweise > 45 °C

In Österreich werden die meisten Biogasanlagen im mesophilen Temperaturbereich betrieben [vgl. Bundesministerium für Verkehr und Innovation und Technologie (bmvit) 2008]. Welchen Einfluss die Temperatur auf die Fermentation hat und nach welchen Kriterien die Betriebstemperatur bestimmt wird im Kapitel 4.1.3.1 beschrieben.

### 4.1.3 Biochemische Grundlagen der Biogaserzeugung

Biogas ist ein Produkt mikrobieller Zersetzung von Biomasse im anaeroben Milieu. Komplexe organische Strukturen werden dabei von Mikroorganismen zu einfacheren Verbindungen und in weiterer Folge CH<sub>4</sub> (Methan) und CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid) abgebaut. Biomasse wird dabei fast vollständig zu Biogas vergoren und nur geringe Teile sind für Bakterienwachstum und Wärmeproduktion notwendig.



**Abbildung 15: Der anaerobe Abbauprozess von Biomasse zu Biogas**

Quelle: eigene Darstellung nach Batstone et al. 2002; Bauer et al. 2009 S.27f; Schieder et al. 2010 S.2ff

Der komplexe mikrobielle Abbauprozess lässt sich dabei vereinfacht in 4 voneinander abhängige Phasen unterteilen. Die 4 Phasen unterscheiden sich dabei durch die beteiligten Mikroorganismen und die optimalen Prozessbedingungen. Abbildung 15 veranschaulicht diesen Abbauprozess welcher in weiterer Folge nach Abbaustufen gegliedert beschrieben wird. [vgl. Bauer et al. 2009 S.27f; Schieder et al.2010 S2ff]

Stufe 1 Hydrolyse: In der ersten Abbaustufe der sogenannten Hydrolyse werden Polymere wie Kohlenhydrate, Proteine oder Fette enzymatisch in lösliche, niedermolekulare Verbindungen abgebaut. Eine Mischpopulation fakultativ anaerober Bakterien dominiert die Mikroorganismen der ersten Phase. Die Geschwindigkeit dieser Phase wird dabei maßgeblich von der Aktivität der extrazellulär wirkenden Enzyme Cellulasen, Amylasen, Proteasen und Lipasen bestimmt. Der optimale pH-Wert der wirkenden Enzyme liegt zum großen Teil im sauren Bereich. Die optimale Temperatur der enzymatischen Reaktionen liegt meist im niederen thermophilen Bereich (ca. 50 °C).

Stufe 2 Acidogenese: Die in Stufe 1 entstandenen löslichen Zwischenprodukte werden in der Acidogenese von Mikroorganismen intrazellulär weiter abgebaut. Entstehende Produkte sind dabei organische Säuren wie, Propionsäure oder Buttersäure, Kohlendioxid, Wasserstoff und Alkohole.

Stufe 3 Acetogenese: In weiterer Folge werden die kohlenstoffreicheren organischen Säuren zur C<sub>2</sub>-Säure Acetat abgebaut. Die in dieser Phase wirkenden Mikroorganismen sind dabei von der in der letzten Phase frei werdenden Energie abhängig und werden daher als syntrophe Bakterien bezeichnet.

Stufe 4 Methanogenese: Die letzte Phase des Abbauprozesses ist die Umwandlung von Wasserstoff und Kohlendioxid oder Essigsäure zu Methan. Zirka 60-70 % des gebildeten Methans entstehen aus der Umwandlung von Essigsäure, die Verwertung von Wasserstoff hat jedoch einen Einfluss auf die Stabilität des Prozesses. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Acetat verwertenden methanogenen Bakterien liegt bei zirka 48 – 85 h, jene der H<sub>2</sub> Verwerter deutlich darunter. Methanbildende Bakterien sind strikte Anaerobier und bevorzugen einen neutralen pH-Wert. Aufgrund der langen Generationszeiten und einer starken pH-Wert Sensibilität ist die Methanogenese der Prozessparameter bestimmende Schritt.

#### 4.1.3.1 Einflussfaktoren des anaeroben Abbaus

Wie jeder biotechnologische Prozess lässt sich auch die Effizienz der Biogaserzeugung durch verschiedene Prozessbedingungen kontrollieren. Die wichtigsten sind dabei Temperatur, pH-Wert und organische Belastung.

Wichtig ist zu beachten, dass der anaerobe Abbau von Biomasse wie oben beschrieben in 4 Phasen verläuft, welche unterschiedliche optimale Prozessbedingungen haben. Werden diese 4 Phasen wie im vollkommen durchmischten Rührkessel nicht räumlich oder zeitlich voneinander getrennt, müssen Bedingungen gefunden werden, die die Funktion aller beteiligten Organismen gewährleisten. Hierfür gilt es jene Organismengruppe zu identifizieren, welche am sensibelsten auf Abweichungen von den Optimalbedingungen reagiert. Beim anaeroben Abbau sind dies die methanogenen Bakterien der vierten Phase [vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2013, S.12]. Sie haben die geringste Wachstumsgeschwindigkeit und sind daher in den meisten Fällen das Nadelöhr des anaeroben Abbaus. Es ist darauf zu achten, dass die Prozessbedingungen möglichst nahe dem Optimum dieser Organismen eingestellt werden um eine möglichst hohe Aktivitätsrate dieser Organismen zu gewährleisten.

Nicht alle Prozessparameter haben gleich starken Einfluss auf die Prozessstabilität. Für eine bessere Übersichtlichkeit sollen die wichtigsten nachfolgend einzeln diskutiert werden.

##### pH Wert

Wie in Abbildung 15 ersichtlich liegt der optimale pH-Wert unterschiedlicher Stufe 1 und 2 im sauren Bereich und jener der Stufe 4 im neutralen. Bei einer 1-stufigen Fermentation und somit dem parallelen Ablauf aller 4 Phasen ist darauf zu achten, dass der pH-Wert in einem neutralen Bereich stabilisiert wird [vgl. Liebetrau 2006, S.38]. Der Abbau von Organik führt zu Bildung von Säuren was ein Sinken des pH-Wertes zur Folge hat. Wird diesem Sinken nicht entgegengewirkt kommt es zu einem gehemmten Wachstum der methanogenen Organismen und einer immer langsameren Umbau von Säuren in Biogas. Im Gegensatz dazu bedeutet der sinkende pH-Wert für die Stufen 1 und 2 optimalere Bedingungen was einen immer schnelleren Abbau von komplexer Biomasse in Säuren und einen immer schneller sinkenden pH-Wert zur Folge hat. Ein sinkender pH-Wert hat somit das Erliegen von Phase 4 und somit der Biogasbildung zur Folge. Dem Sinken des pH-Wertes kann zum Beispiel durch eine optimierte Fütterung

des Fermenters entgegen gewirkt werden [vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2013, S.92]. Durch eine optimale organische Belastung halten sich Säurebildung und Säureverbrauch die Waage und es kommt zu keiner negativen Beeinflussung des pH-Wertes. Ein Eingreifen kann dort notwendig werden, wo mit schwankenden Substratzusammensetzungen und in Folge dadurch unregelmäßigen organischen Belastungen zu rechnen ist werden [vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2013, S.28]. Die Stabilisierung des pH-Wertes kann dabei auf verschiedene Arten erfolgen. Wichtigste Kenngröße ist aber sicherlich die Pufferkapazität des Fermenterinhalt. Bei einer hohen Pufferkapazität kommt es trotz steigender Säurekonzentrationen zu keiner pH-Wert Änderung im Reaktor [vgl. Liebetrau 2006, S.38]. Die Pufferkapazität kann durch die Wahl geeigneter Substrate mit hoher Pufferkapazität (z.B Gülle) oder der Zugabe von Additiven (z.B Carbonatpuffer) positiv beeinflusst werden [vgl. Hecht 2008 S.6ff]. Kurzfristige Änderungen im pH-Wert können dadurch ohne negative Beeinflussung des Gesamtprozesses überstanden werden.

Bei einer zweistufigen Biogasanlage, wird in der ersten Stufe der für die Hydrolyse und Acidogenese optimale saure pH-Wert eingestellt. Dies ist vor allem bei schwer abbaubaren Substraten von Vorteil, denn der Hydrolyseschritt kann hier zum zeitlimitierenden Faktor des Gesamtabbaues werden. Der neutrale pH-Wert der zweiten Stufe stellt sich bei abgestimmter Fütterung und ausreichend Pufferkapazität problemlos selber ein.

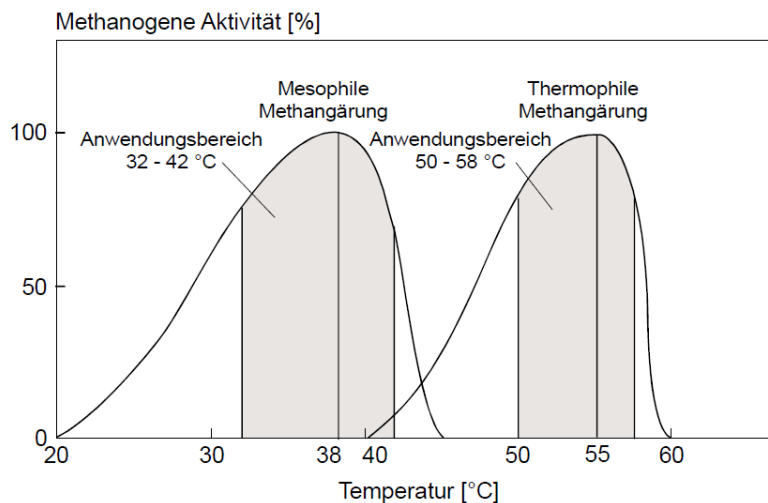
### Temperatur

Wie bereits oben erwähnt sind bei der Biogasproduktion drei Temperaturbereiche zu unterscheiden, der psychrophile, der mesophile und der thermophile Bereich. Wie chemische Reaktionen sind auch biochemische Reaktionen von der Prozesstemperatur beeinflusst [vgl. Chmiel 2011; S.74]. Auch hier gilt grundsätzlich, dass höhere Temperaturen höhere Aktivitätsraten zur Folge haben. Bei der Biogasproduktion gibt es für jeden Temperaturbereich spezialisierte Mikroorganismen, die im tiefen, mittleren oder hohen Temperaturbereich ihr Aktivitätsmaximum erreichen.

Psychrophile Fermentation findet in Europa keine Anwendung mehr, da die heutigen Anlagen einen hohen Technifizierungsgrad aufweisen und somit eine ständige Temperaturregelung problemlos realisierbar ist.

#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

Thermophile Mikroorganismen haben eine zirka 40 % höhere Aktivität als mesophile Mikroorganismen. Die Biogasausbeute je Zeiteinheit ist daher deutlich erhöht [vgl. Zoetemeyer et al. 1982]. Trotzdem wird der Großteil der Biogasanlagen im mesophilen Bereich betrieben. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Vielfalt der Mikroorganismen bei mesophilen Temperaturen größer ist und somit geringere Änderungen in der Prozesstemperatur aber auch in anderen Reaktionsbedingungen meist ohne Aktivitätseinbußen überstanden werden können. Der Prozess ist also weniger aktiv aber deutlich stabiler.



**Abbildung 16 mögliches Temperaturfenster bei mesophiler und Thermophiler Fermentation**  
Quelle: [http://biogas-infoboard.de/pdf/Biologie\\_der\\_Biogaserzeugung.pdf](http://biogas-infoboard.de/pdf/Biologie_der_Biogaserzeugung.pdf)

#### Organische Belastung und Hydraulische Verweilzeit:

Biogasanlagen werden in der Regel quasi kontinuierlich mit frischem Substrat beschickt. Die Fütterungsintervalle sind dabei so zu wählen, dass sich im Fermenter stabile Bedingungen einstellen können. Es müssen sowohl der Volumensstrom als auch die absolute Menge an organischem Material im zugeführten Material konstant sein. Die organische Belastung resultiert aus der täglich zugeführten Menge und dem Gesamtvolumen des Reaktors. Die zugeführte Menge und das Volumen des Reaktors bestimmen die mittlere hydraulische Verweilzeit. Die hydraulische Verweilzeit ist der Quotient aus Reaktorvolumen und Volumensstrom.

$$HVZ = V / Q$$

(6)

HVZ ..... hydraulische Verweilzeit [d]  
V ..... Reaktorvolumen [L]  
Q ..... Volumensstrom Zufluss [L/d]

Die hydraulische Verweilzeit muss so gewählt werden, dass sich Bakterienwachstum und Bakterienaustrag durch den Abfluss die Waage halten. Sie wird bei einer einstufigen Fermentation von der Generationszeit der methanogenen Bakterien



bestimmt und liegt minimal bei etwa bei 10-15 Tagen [vgl. Braun 1982, S.73]. Die optimale Verweilzeit ergibt sich aus der Abbaugeschwindigkeit des Substrates und kann durch Laborversuche abgeschätzt werden [vgl. Mähnert 2007, S.19].

Die organische Belastung des Reaktors ist, wie bereits kurz beim Prozessparameter pH-Wert beschrieben, eine wichtige Regelgröße eines stabilen Prozesses. Sie ist durch die Aktivität der Methanogenese bestimmt und so zu wählen, dass die Bildung von Säuren aus frisch zugeführten organischem Material und die Bildungsrate von Methan ausgeglichen ist, sodass es keine Beeinflussung des pH-Wertes gibt. Die organische Belastung wird in Kilogramm organische Trockenmasse je Liter Fermentervolumen und Tag angegeben [ $\text{kg}_{\text{OTS}} \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ].

#### **4.1.4 Verwertungsmöglichkeiten von erzeugtem Biogas**

Wie bereits oben erwähnt ist Biogas ein Gemisch aus Methan, Kohlendioxid und anderen Spurengasen mit einer vom Inputmaterial abhängiger Zusammensetzung. Hauptenergieträger ist dabei das im Gas enthaltene Methan welches sich chemisch nicht von fossilem Methan unterscheidet. Die Einsatzmöglichkeiten von Biogas und Erdgas sind somit äquivalent, wobei Biogas je nach Verwertungstechnologie einer mehr oder weniger intensiven Gasaufbereitung unterzogen werden muss [vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V (FNR), S.106ff)

##### 4.1.4.1 Thermische Verwertung

Die Verbrennung von Biogas in Gasthermen ist mit nur geringen Anpassungen gegenüber Erdgas möglich. Die Verwertung von Biogas nur zur Wärmeerzeugung ist jedoch nicht weit verbreitet. Dies ergibt sich vor allem daraus, dass Gasthermen vor allem in den Wintermonaten betrieben werden, Biogas aber über das Jahr konstant produziert wird. Wärme aus Biogas wird meist nur als Nebenprodukt der Verbrennung in Motoren zur Stromerzeugung genutzt.

##### 4.1.4.2 Verbrennungsmotoren mit und ohne Kraftwärmekopplung

Die Verbrennung von Biogas in einem Gas-Otto- oder Zündstrahlmotor zur Stromerzeugung ist in Österreich die am weitesten verbreitete Nutzungsform von Biogas [vgl. bmvit 2008, S.5]. Der Österreichische Interessensvertreter Arge Kompost und Biogas beschreibt die Funktionsweise wie folgt:

*„Diese Motor und Generator Kombination wird auch als Blockheizkraftwerk (BHKW) bezeichnet. Gas- Ottomotoren sind die mit Abstand am häufigsten eingesetzten BHKWs in Österreich. Bei Gas- Ottomotoren sollte der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas die Werte von 150 – 200 ppm/m<sup>3</sup> Gas nicht überschreiten. Problematische Gasbestandteile entstehen vor allem bei der Kofermentation von biogenen Abfällen. Hier können Siloxane und Phosphorverbindungen zu Problemen im Motorraum und im Abgas führen [Herdin 2002]. Gas- Ottomotoren sind speziell für den Gasbetrieb optimiert und arbeiten nach dem normalen Ottoprinzip. Es können aber auch umgebaute Diesellaggregate mit ausgestatteten Zündkerzen verwendet werden. Im Gegensatz zum Gas- Ottomotor arbeitet der Zündstrahlmotor nach dem Dieselprinzip. Das Biogas wird hier über einen Gasmischer der Verbrennungsluft beigefügt und durch das eingespritzte Zündöl gezündet. Der Zündanteil macht dafür ca. 10 % der zugeführten Brennstoffleistung aus. Als Zündöl kann z.B. Biodiesel verwendet werden. Für einen Gas- Ottomotor kann mit Investitionen von ca. 800 € und bei Zündstrahlmotor von ca. 750 € je KW installierter elektrischer Leistung und erreichen einem elektrischen Wirkungsgrad von ca. 40 % [Eder B., Schulz H, 2006].“*

[arge kompost&biogas Energetische Nutzung]

#### 4.1.4.3 Mikrogasturbine

Eine weitere Möglichkeit zur Stromerzeugung aus Biogas ist die Verwendung von Mikrogasturbinen. Die nachfolgende Information ist einem Bericht der Bayrischen Landesanstalt für Umwelt über die Wärmenutzung in kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen entnommen:

*„Der Begriff Mikrogasturbinen wird üblicherweise für Rekuperator-Gasturbinen (Verbrennungsluftvorwärmung mit dem Abgas) mit einer elektrischen Leistung unter 300 kWel verwendet. In diesem Leistungsbereich werden die Spaltverluste an der Turbine erheblich, sodass ein Beibehalten der sonst bei Gasturbinen üblichen Druckverhältnisse zwischen Turbinenein- und Auslass von 8–20 bar nicht sinnvoll wäre. Erreichbare elektrische Wirkungsgrade betragen 30 %, womit Gasturbinen einen Nachteil gegenüber Gas- und besonders Zündstrahlmotoren in dem jeweiligen Leistungsbereich aufweisen. Weiterhin einschränkend für eine Anwendung sind die deutlich höheren Investitionskosten.“*

[Garderer et al. 2007]

#### 4.1.4.4 Brennstoffzelle

Die Nutzung einer Brennstoffzelle für die Verwertung des Biogases bietet die Möglichkeit, die durch den Carnot-Prozess limitierte Effizienzsteigerung eines Motor-BHKWs zu verbessern [vgl. Gaderer et al. 2007]. Die Arge Kompost und Biogas erklärt die Wirkungsweise wie folgt:

*„Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Wandler, in dem sich Wasserstoff mit Sauerstoff in einem kontrollierten elektrochemischen Prozess (im Gegensatz zu Verbrennung oder Explosion) verbindet - dabei werden elektrischer Strom und Wärme erzeugt. Das Funktionsprinzip ist bei allen Zelltypen grundsätzlich das selbe. Der elektrische Wirkungsgrad ist sehr gut (bis 70%) und je nach Zelltyp können zusätzlich Temperaturen von bis zu 1.000 °C für eine thermische Nutzung bereitgestellt werden.“*

[arge kompost&biogas Energetische Nutzung]

Diese Information kann mit weiteren Fakten von Garderer et al. ergänzt werden:

*In allen Biogasprojekten mit Brennstoffzellen spielt die Gasaufbereitung bzw. Gasreinigung eine entscheidende Rolle, da alle Typen von Brennstoffzellen hohe Anforderungen an die Gasreinheit stellen. So muss der Wasseranteil im Biogas deutlich abgesenkt werden, um Kondensation in der Brennstoffzelle zu vermeiden. Zudem sind Schwefelwasserstoff als auch Halogen- und Alkalimetallverbindungen nahezu vollständig zu entfernen. Die bei der Mehrzahl der Biogasanlagen eingesetzte mikrobiologische Entschwefelung ist für den Einsatz des Biogases in Brennstoffzellen nicht ausreichend. Die Technologie der Brennstoffzellensysteme befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Daher gibt es nur wenige marktfähige Produkte. Neben vielen Pilot- und Testanlagen, Nischenanwendungen in Raumfahrt, Schifffahrt und Camping, hat bisher nur ein einziges größeres Brennstoffzellensystem (200 kW PAFC) der amerikanischen Firma ONSI (inzwischen UTC) kommerzielle Verbreitung gefunden (weltweit etwa 200 Anlagen).“*

[Garderer et al. 200]

#### 4.1.4.5 Einspeisung ins Erdgasnetz und Nutzung als Treibstoff

Eine alternative Nutzungsform zur direkten Verbrennung des Biogases ist Abtrennung des Methans mit nachfolgender Einspeisung ins Erdgasnetz beziehungsweise die Nutzung des Methans als Treibstoff. Die nachfolgende Information ist ebenfalls von der Arge Kompost und Biogas übernommen:

- 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

„Biogas kann nicht direkt in Erdgasnetze eingespeist werden. Gesetzlich darf man nur in das bestehende Gasnetz einspeisen, wenn auch bestimmte Qualitätsanforderungen erfüllt werden. In Österreich gilt dafür die ÖVGW Richtlinie G31. Diese nennt allerdings nur die Kriterien für die Einspeisung von Erdgas. Um auch verstärkt den Weg der Einspeisung von regenerativen Gasen gerecht zu werden, wurde eine eigene Richtlinie für die Einspeisung von regenerativen Gasen erstellt (ÖVGW G 33). Eingespeist kann das Gas in Gas/Dampfkraftwerken, genutzt werden. Ein großer Vorteil ist der hohe Wirkungsgrad bei diesem kombinierten Prozess. So werden elektrische Wirkungsgrade von bis zu 58 % und eine Abgastemperatur von ca. 500 °C erreicht. Aufgereinigtes Biogas kann auch als Treibstoff genutzt werden. Das Besondere am Erd- und Biogas ist deren „saubere“ Verbrennung. Methangase verbrennen nahezu rückstandsfrei und verursachen deutlich weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen als andere Kraftstoffe. Die Kraftstoffverordnung (BGBl II Nr. 418/1999) gibt vor, welche Anforderungen an die Qualität von Erdgas bzw. aufbereitetem Biogas beim Einsatz als Kraftstoff in Österreich zu erfüllen hat. Darin werden Grenzwerte für die relative Dichte, den Brennwert, den Wobbe-Index und den höchstzulässigen Druck angegeben.“

[ARGE Kompost&Biogas Energetische Nutzung]

Die Vorgaben der Kraftstoffverordnung für die Qualität des Biomethans sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

**Tabelle 11 Vorgaben der Kraftstoffverordnung (BGBl. II Nr. 209/2004)**

Quelle: eigene Darstellung nach Arge Kompost und Biogas

Merkmal	Einheit	Grenzwerte	
		Mindestwert	Höchstwert
Relative Dichte		0,55	0,7
Brennwert	kWh/Nm <sup>3</sup>	8,38	13,11
Wobbe Index	kWh/Nm <sup>3</sup>	12,81	15,72
Staub		technisch frei	
<b>Anhang VII (Kraftstoffverordnung (BGBl. II Nr. 209/2004))</b>			
		<b>Energieinhalt</b>	<b>Dichte</b>
		[kWh/Nm <sup>3</sup> ]	[kg/Nm <sup>3</sup> ]
Biogas		9,52	0,730
Erdgas		9,94	0,730

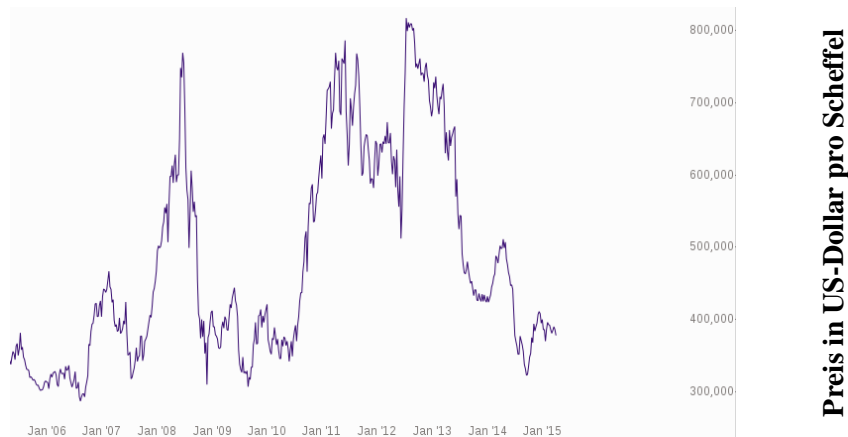
Bei der Aufreinigung von Biogas zu Biomethan zur Einspeisung ins Erdgasnetz oder zur Nutzung als Treibstoff gilt es darüber hinaus noch die Fördersituation zu

#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

berücksichtigen. In Österreich ist dabei die Aufreinigung und Einspeisung gegenüber der Einspeisung von Ökostrom deutlich benachteiligt. Bei der Einspeisung ins Erdgasnetz fallen gegenüber fossilem Erdgas keine Vergünstigungen an. Bei der direkten Nutzung als Treibstoff ohne Einspeisung ins Netz wird lediglich die Erdgasabgabe von 6,6 €cent je m<sup>3</sup> erlassen.

##### 4.1.5 Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen

Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen ist wie jeder Prozess von Kosten und Erlösen abhängig. Aufgrund stark schwankender Rohstoffpreise sind die Kosten für den Betrieb der Anlage oft nur schwer einschätzbar. Exemplarisch ist in Abbildung 17 der Börsenpreis von Mais der letzten 10 Jahre dargestellt



**Abbildung 17 Börsenkurs von Mais in den letzten 10 Jahren**

*Quelle: [www.boerse-go.de/Mais](http://www.boerse-go.de/Mais)*

Neben den Rohstoffkosten setzten sich die Gesteungskosten von Biogas aus den Kostenblöcken Direktkosten, Betriebskosten, Anlagenkosten, Personalkosten und sonstige Kosten zusammen. Direktkosten beinhalten neben den Rohstoffkosten auch die Kosten für die Ausbringung des Gärrestes. Betriebskosten setzten sich aus den Kosten für Wartung und Instandhaltung sowie den Stromzukauf zusammen. Die Anlagenkosten beschreiben die kalkulatorische Abschreibung sowie tatsächlich in diesem Jahr angefallene Zinsen für bestehende Verbindlichkeiten. Personalkosten entstehen durch Anlagenbetreuung, sowie Management und Verwaltung. Der Kostenblock sonstige Kosten besteht vor allem aus Versicherungskosten. [vgl. Eder und Kirchwegger 2011, S.4]

Den größten Anteil an den Gasgestehungskosten haben die Anlagenkosten, sie machen etwa 60 % der Gesamtkosten aus [vgl. Eder und Kirchwegger 2011, S.16]. Diese Kosten

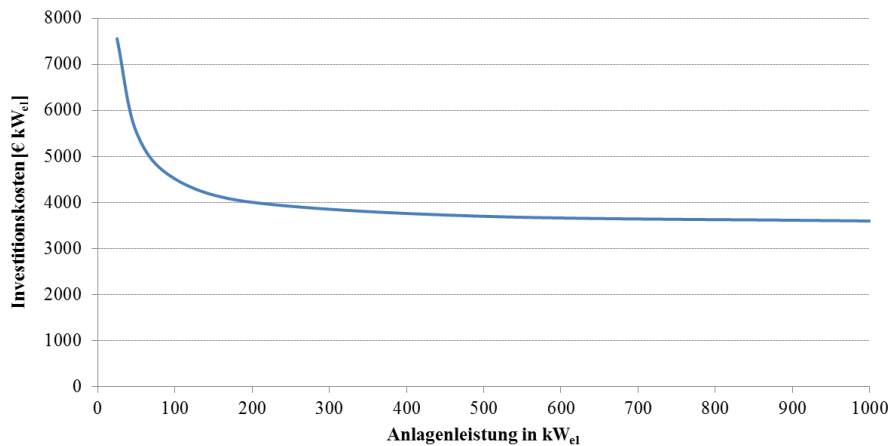
#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

sind vor allem von der Größe der Anlage abhängig [vgl. Walla und Schneeberger 2008 S.554, Eder und Kirchweger 2011, S.16]. Walla hat in seiner Dissertation dabei ermittelt, dass die Kosten der nachfolgenden Gleichung folgen [vgl. Walla 2006, S.10].

$$y = (101.522 + 3.500 \cdot x) / x \quad (7)$$

x = installierte elektrische Leistung in kW<sub>el</sub>

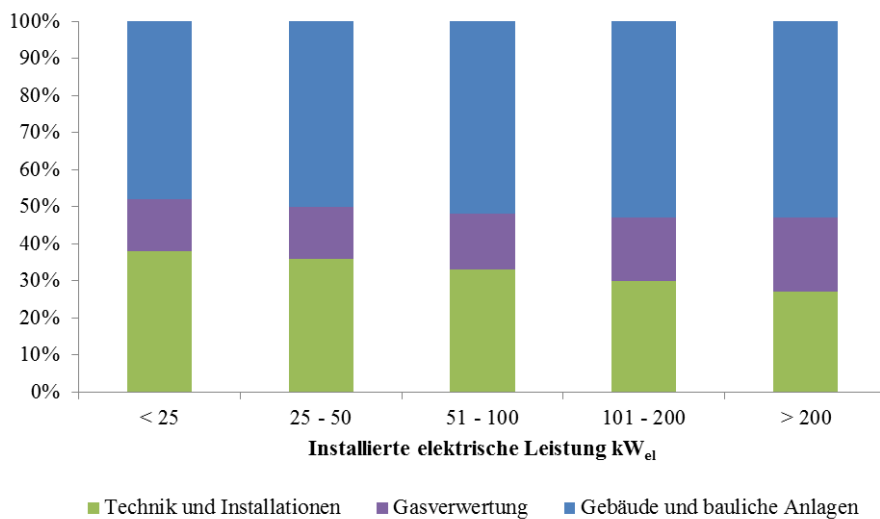
Wie in Abbildung 18 ersichtlich sinken die spezifischen Investitionskosten ab einer Größe von 200 kW<sub>el</sub> deutlich.



**Abbildung 18 Abhängigkeit der Investitionskosten von der inst. elektrischen Leistung**

*Quelle: eigene Darstellung nach Gleichung 7*

Walla [vgl. Walla 2003] hat außerdem versucht die Investitionskosten von Biogasanlagen in die Kategorien Gebäude und bauliche Anlagen, Technik und Installationen sowie Gasverwertung einzuteilen. Er kam dabei zu der in Abbildung 19 dargestellten prozentuellen Verteilung der Kosten in Abhängigkeit der Anlagengröße.



**Abbildung 19 Anteil unterschiedlicher Kategorien an den Gesamtinvestitionskosten in Abhängigkeit der Anlagengröße**

*Quelle: eigene Darstellung nach Walla 2003*

#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

Je kleiner die Anlagen desto höher sind die relativen Kosten für Technik und Installationen. Die Kosten für bauliche Maßnahmen liegen bei allen Anlagengrößen in etwa bei 50 % der Gesamtkosten, wobei die steigenden spezifischen Anlagenkosten je  $\text{m}^3$  Gas bei kleineren Anlagen berücksichtigt werden müssen. Über einer Anlagengröße von 200 kW bleiben die spezifischen Investitionskosten und somit auch die Kostenverteilung gleich.

Aufgrund dieses Skaleneffektes entstand in Europa ein Trend zu immer größeren Anlagen [vgl. Energie-Control-Austria 2014, S.46; Statista 2015; SEBE 2013]. Dabei wird die maximale Größe durch die landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen aber auch durch die Förderpolitik des Landes bestimmt. Walla und Schneeberger haben in ihrer Arbeit für Österreich für den derzeit gängigen Substratmix eine optimale Anlagengröße von 250  $\text{kW}_{\text{el}}$  ermittelt [vgl. Walla und Schneeberger 2008, S.557].

##### **4.1.6 Entwicklung von Biogasanlagen in Österreich und Europa**

Auf die frühe Geschichte der Biogastechnologie soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, es soll lediglich erwähnt werden, dass die Nutzung des durch Gärung entstehenden Gases bereits bis in das späte 19te Jahrhundert zurück reicht. Einen signifikanten Aufschwung der Biogastechnologie konnte man erstmals zur Energiekrise der 1970er Jahre verzeichnen [vgl. arge kompost&biogas Geschichtliche Entwicklung]. Die ersten Anlagen wurden in der Regel von Pionieren im Eigenbau errichtet. Die Einführung von Förderungen durch die Regierung in Europa führte zu einer Umstrukturierung der Branche und der Entstehung eines eigenen Wirtschaftszweiges.



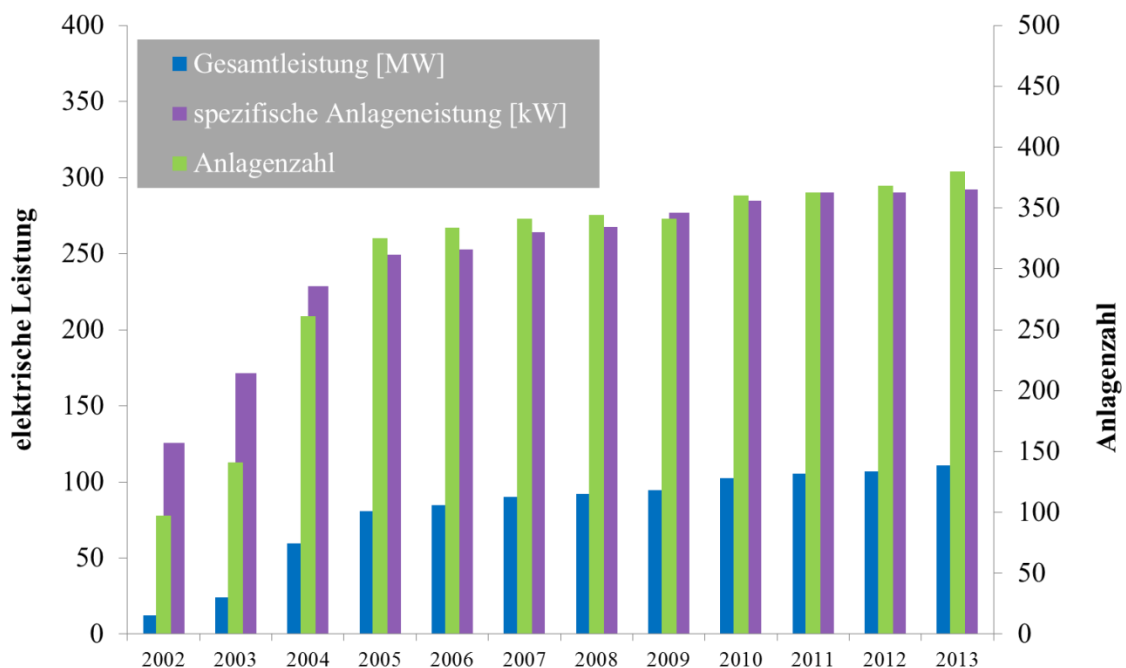
**Abbildung 20 Horizontalfermenter – Selbstbau aus dem Jahr 1992 (links) und high-tech Anlage aus dem Jahr 2009 (rechts)**

*Quelle: Bild links Viktoria Leitner; Bild rechts ebk-reiter)*

#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

In Österreich entstanden in den 1980er Jahren die ersten landwirtschaftlichen Biogasanlagen zur Vergärung landwirtschaftlicher Abfälle und hier vor allem Gülle [vgl. arge kompost&biogas Geschichtliche Entwicklung]. Das technologische Niveau der frühen Anlagen war vergleichsweise gering, was in Abbildung 20 veranschaulicht ist. Die Verbreitung der Technologie erfolgte langsam und im Jahr 2002 waren 97 Anlagen im Betrieb [vgl. Energie-Control Austria 2014].

Erst die Einführung des Ökostromgesetzes im Jahr 2002 führte zu einem signifikanten Anstieg der installierten Leistung in Österreich in den Jahren 2002-2005. Durch das ÖSG wurde allerdings nicht nur die Anlagenzahl sondern auch der genutzte Rohstoff signifikant geändert. Waren im Jahr 2003/2004 tierische Ausscheidungen und organische Abfälle mit 86,5 % die dominierenden Substrate wurden diese im Jahr 2005 von Energiepflanzen mit einem Anteil von 63 % abgelöst [vgl. Resch et al. 2004,S.3; Hopfner-Sixt 2007, Folie 10]. Durch das ÖSG wurde die Entwicklung sogenannter Nawaro-Anlagen (Nachwachsende Rohstoffe) erst möglich. Damals wie auch heute ist Mais, aufgrund seiner Energiedichte und seinem hohem Hektarertrag [vgl. Laurenz 2005], der am häufigsten eingesetzte Biogasrohstoff.



**Abbildung 21 Biogaskapazität in Österreich seit dem Jahr 2002**

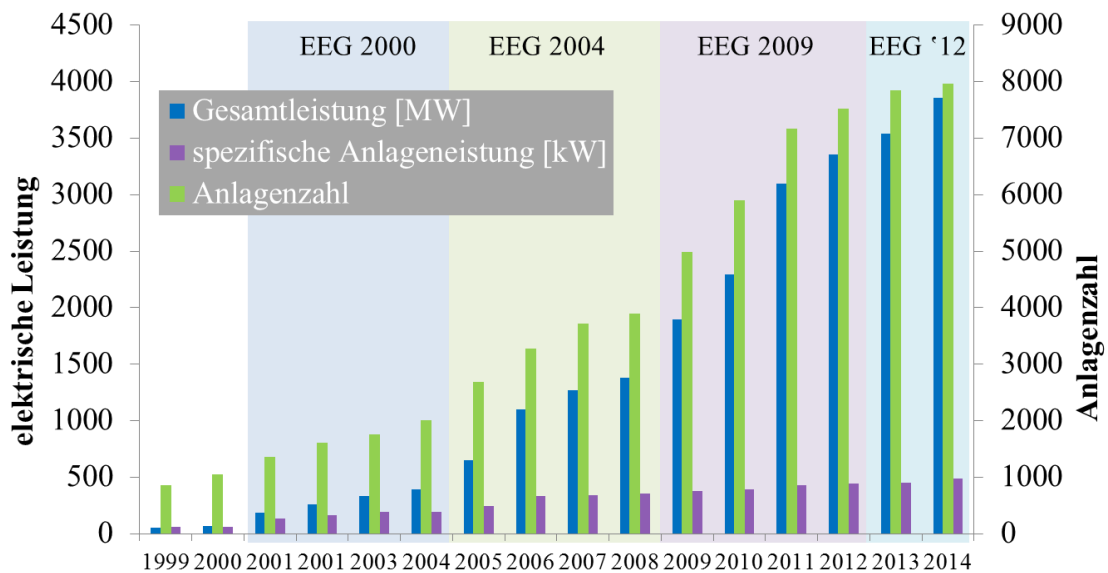
*Quelle: eigene Darstellung nach Energie-Control Austria 2014*



#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

Im Jahr 2005 waren in Österreich 325 Anlagen im Betrieb und Österreich lag hinter Deutschland europaweit an zweiter Stelle. Diese Kapazität konnte jedoch in den nachfolgenden Jahren kaum gesteigert werden und heute sind in Österreich 380 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 111 MW installiert [vgl. Energie-Control Austria 2014, S.46]. Eine Übersicht über die Entwicklung seit dem Jahr 2002 ist in Abbildung 21 zusammengefasst.

Im Gegensatz zu Österreich konnte in anderen Ländern Europas die Biogaskapazität in jüngster Vergangenheit deutlich ausgebaut werden. Vor allem Deutschland verzeichnet seit dem Jahr 1999 einen stetigen Zuwachs der installierten Leistung. Deutlich ist hier die Abhängigkeit der installierten Anlagenkapazität von gesetzlichen Änderungen hinsichtlich der Stromvergütung zu erkennen. Jede Novelle des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) führte zu einem erneuten Anstieg der Anlagenzahl. Diese Abhängigkeit ist in Abbildung 22 dargestellt. Heute ist Deutschland die führende Biogasnation in Europa, nicht nur bei Anlagenzahl und Kapazität sondern auch bei mit dieser Technologie in Verbindung zu bringenden Arbeitsplätzen und aufgebautem technischem Know-How. Das zeigt sich daran, dass acht der zehn größten Biogasanlagenbauer sich in Deutschland befinden [vgl. EurObserv'ER 2014, S.11].



**Abbildung 22 Entwicklung von installierter Leistung [MW], spezifischer Leistung[kW] und Biogasanlagenzahl in Deutschland mit Rücksicht auf EEG-Novellen.**

*Quelle: eigene Darstellung nach Statista 2014<sup>b</sup> und 2015*

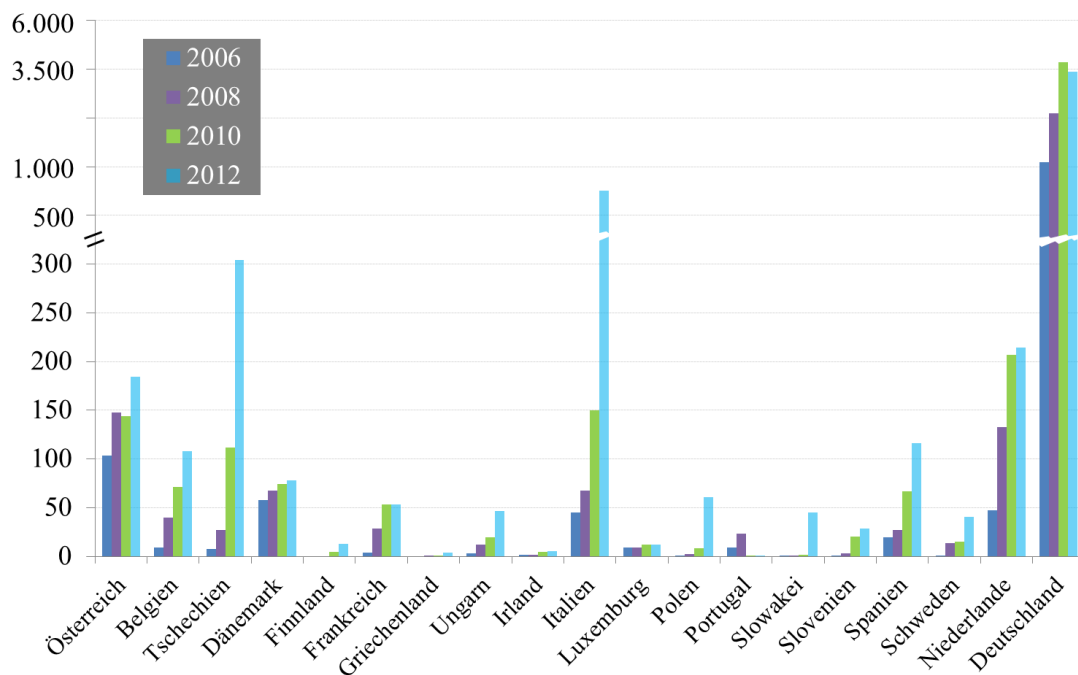
Es gilt nun die zukünftige Entwicklung von Biogas in Deutschland abzuwarten. Im Juni 2014 beschloss die Bundesregierung eine neuerliche Novelle des EEG welche eine deutliche Minderung der Einspeisetarife nach sich zieht. Bereits in den Jahren 2013 und

#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

2014 gab es eine Verringerung des Wachstums deutscher Biogasanlagen vielleicht weil die Einspeisesituation im EEG 2012 für Standardanlagen weniger Vorteile als noch zuvor bot [vgl. Schünemann-Plag 2011].

Neben Deutschland konnten auch noch andere Nationen in den letzten Jahren einen Anstieg der installierten Leistung verzeichnen. Zu den Vorreitern der letzten Jahre zählen vor allem Tschechien und Italien, aber auch Länder wie Polen, Slowakei und Spanien konnten deutliche Zuwächse erreichen. Die Entwicklung der installierten Kapazität von 2006 bis 2012 ausgewählter europäischer Länder ist in Abbildung 23 dargestellt.

Ähnlich wie in Deutschland dürfte der große Zuwachs an Biogaskapazität in Italien auf die finanzielle Unterstützung des Staates zurückzuführen sein. Mit einem all-inclusive Einspeisetarif von 28 €cent je kWh für Anlagen kleiner 1 MW elektrischer Leistung [Gistore Servizi Energetici 2012] bietet Italien die höchste Unterstützung im europaweiten Vergleich (Basis 2010) [vgl. Klein et al. 2010, S.18].



**Abbildung 23 Installierte Biogaskapazität ausgewählter EU-Länder in ktOE in den Jahren 2006-2012**

*Quelle: eigene Darstellung nach EurObserv'ER*

Die Situation in Tschechien ist etwas abweichend zu Deutschland und Italien. Fixe Einspeisetarife waren nur eine der Möglichkeiten der Förderungen, die allerdings ab 2012 nur noch für Anlagen kleiner 100 kW möglich war und mit der Novelle 310/2013

wurden alle Förderungen für Ökostrom gestrichen [vgl. Jirouš 2013, S.25]. Der starke Anstieg an Neuanlagen in den Jahren 2011 und 2012 wird vor allem dieser politischen Entwicklung zugeschrieben. Viele Investoren wollten noch vor Auslauf dieser Regelung die vergleichsweise gute Unterstützung nutzen [vgl. Ramanauskaitė et al. 2012, S.9]. Die gewährten Einspeisetarife waren in der Höhe vergleichbar mit Österreich [vgl. Klein et al. 2010, S.18], trotzdem gab es in Tschechien anders als hierzulande eine signifikante Zunahme der Anlagen. Eine mögliche Erklärung dafür sind die landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen. In Tschechien beträgt die durchschnittliche Fläche je landwirtschaftlichen Betrieb 150 ha, in Deutschland 56 ha und in Österreich nur 19 ha (vergleichbare Daten aus dem Jahr 2010) [vgl. EUROSTAT 2014]. Bei steigender Intensivierung der Landwirtschaft sinken üblicherweise die Kosten für Transport und Bodenbearbeitung, außerdem können Biogasanlagen mit größerer Leistung und niedrigeren Kosten realisiert werden. In Österreich beträgt die durchschnittliche Anlagengröße 292 kW<sub>el</sub> [vgl. Energie-Control-Austria 2014, S.46] in Tschechien 704 kW<sub>el</sub> [vgl. Vobr 2012, Folie 11].

Die Entwicklung von Biogasanlagen im Zusammenhang mit nationalen Förderregimen wurde bisher nur anhand der Stromerzeugung diskutiert. Ein weiterer Markt ist jedoch die Einspeisung ins Erdgasnetz und die Nutzung des Gases als Treibstoff. Derzeit nutzen in Österreich [eigene Berechnungen nach arge kompost&biogas Biomethan; Energie-Control Austria 2014] wie auch in Deutschland [eigene Berechnung nach Statista 2015 und Scheftelowitz et al. 2014<sup>b</sup>, S.52] weniger als 10 % der Anlagen diese alternative Verwertungsform von Biogas. Dies mag mit der deutlichen Benachteiligung der Vermarktung im Vergleich zu Ökostrom erklärbar sein. In Österreich wird die Einspeisung nicht und die vor Ort Nutzung als Treibstoff lediglich mit dem Entfall der Erdgasabgabe gefördert. Außerdem entfällt bei der Nutzung gasförmiger Treibstoffe die Entrichtung der Mineralölsteuer (MÖst) was jedoch für Erdgas und Biomethan gleichermaßen gilt. Ein durch Förderungen entstehender Vorteil von Biogas zu fossilem Erdgas ist also nur gering oder gar nicht gegeben. Der Anteil von Erdgas im Verkehrssektor ist derzeit noch unwesentlich, eine signifikante Beeinflussung der Anzahl an Biogasanlagen durch die Erzeugung von Treibstoff ist derzeit nicht gegeben. Erst wenn die Marktdurchdringung von Erdgasautos steigt, besteht auch für Biogas die Möglichkeit, diesen Sektor zu bedienen. Erst dann scheint es sinnvoll über eine Unterstützung von Biomethan nachzudenken. Hier gilt es dann ähnliche steuerliche

Vorteile von Biogas gegenüber dem fossilen Erdgas zu schaffen, wie dies bei Bioethanol im Vergleich zu Benzin bereits jetzt der Fall ist. Hier bietet der Entfall der MÖst eine ausreichende Bevorteilung der erneuerbaren Alternative im Vergleich zu fossilem Benzin. Da bereits Erdgas als Treibstoff nicht der MÖst unterliegt, gibt es für Biogas aufgrund des Wegfalls der MÖst zwar Vorteile gegenüber fossilem Flüssigtreibstoff allerdings keine Vorteile gegenüber Erdgas.

## **4.2 Bioethanolerzeugung**

### **4.2.1 Einleitung**

Wie bereits im Kapitel 2.3.3.2 erwähnt muss für eine nachhaltige Reduktion von Treibhausgasen vor allem dem Sektor Verkehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Bei der Umstellung auf ein nachhaltiges Energiesystem ist es daher notwendig dieses Segment zu betrachten. Neben der Effizienzsteigerung (Verbrennungsmotoren mit geringerem Treibstoffverbrauch) und der verstärkten Einführung der Elektromobilität, spielt der Einsatz von Biotreibstoffen eine wichtige Rolle. Sie bieten vor allem in der kurz- und mittelfristigen Umstellung Vorteile, da sie mit nur geringen Infrastrukturellen Anpassungen verbreiteten Einsatz finden können [vgl. Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor]. Neben der Verwendung von Pflanzenölen und veresterten Pflanzenölen für Dieselmotoren (Biodiesel) gilt Ethanol bzw. aus Ethanol hergestelltem Ethyl-tert-butylether (ETBE) als der wichtigste Biotreibstoff für den Ottomotor.

### **4.2.2 Bioethanolherstellung**

Die Erzeugung von Bioethanol aus erneuerbaren Rohstoffen erfolgt über alkoholische Gärung von Zucker zu Ethanol. Die Fermentation erfolgt meist durch Hefen, kann aber auch mit geeigneten Bakterien durchgeführt werden. Gärung von Obst und Getreide zu trinkbaren Alkohol ist somit auch eine Form der Bioethanolerzeugung. Der Begriff wurde aber vor allem im Bereich der Ethanolerzeugung als Kraftstoffersatz des fossilen Benzins geprägt. Im englischen hat sich daher vor allem das Wort fuel-ethanol als klare Unterscheidung durchgesetzt. In der Bioethanolerzeugung unterscheidet man je nach Rohstoff Ethanol der ersten und zweiten Generation [vgl. Sims et al. 2008].

#### 4.2.2.1 Erste Generation Bioethanol

Als Ausgangsstoff dienen zucker- oder stärkehaltige Rohstoffe. Die Herstellung erfolgt analog der alkoholischen Gärung zu Trinkalkohol. Während zuckerhaltige Rohstoffe direkt von Mikroorganismen zu Alkohol vergoren werden können müssen Polysaccharide in einem vorgeschalteten Prozess durch Enzyme zu Monosacchariden umgewandelt werden. Die am häufigsten eingesetzten Rohstoffe sind Mais, vor allem in den USA und Zuckerrohr, vor allem in Brasilien. Bioethanol der ersten Generation wird vor allem aufgrund ethischer Gesichtspunkte und der Konkurrenz zum Lebensmittelmarkt kritisiert. Wesentliche Limitierung dieser Technologie ist aber in jedem Fall die begrenzte Verfügbarkeit des Rohstoffes. Feldfrüchte dienen vorrangig der Lebensmittelproduktion und können zu diesem Zweck auch nicht ersetzt werden, für die Energieerzeugung steht somit nur eine sehr begrenzte Menge an Substrat zur Verfügung.

#### 4.2.2.2 Zweite Generation Bioethanol

Als Rohstoffe der zweiten Generation werden organische Reststoffe bezeichnet, die bei der Produktion von Primärfrüchten zur Futter- oder Lebensmittelherstellung anfallen. Sie stehen in keiner Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und haben in den meisten Fällen nur begrenzte alternative Verwertungsformen. Ein Großteil dieser Rohstoffe beinhaltet als Kohlenstoffquelle für die Ethanolproduktion das Biopolymer Cellulose. In vielen Fällen ist dieses Polymer in eine komplex aufgebaute Lignocellulosematrix eingebaut (siehe Kapitel 4.2.3). Für die Bioethanolerzeugung müssen die Kohlenhydrate zu freien Zuckern und in weiter Folge zu Ethanol beziehungsweise umgebaut werden. Dafür muss die Cellulose über Vorbehandlung einem Abbau zugänglich gemacht werden.

In dieser Arbeit wurde die Verwertung von Rohstoffen der zweiten Generation betrachtet. Im speziellen die Verwertung von Stroh, einem Lignocelluloserohstoff. In weiterer Folge wird daher nur auf Bioethanolanlagen dieses Typs eingegangen.

In verschiedenen Teilschritten werden in der Lignocelluloseethanolanlage aus Biomasse Ethanol und verschiedene Nebenprodukte erzeugt. Eine schematische Abbildung der Basis-Prozesskette ist in Abbildung 24 dargestellt. Nachfolgend werden die einzelnen Teilschritte für ein besseres Verständnis der Arbeit etwas genauer beschrieben.

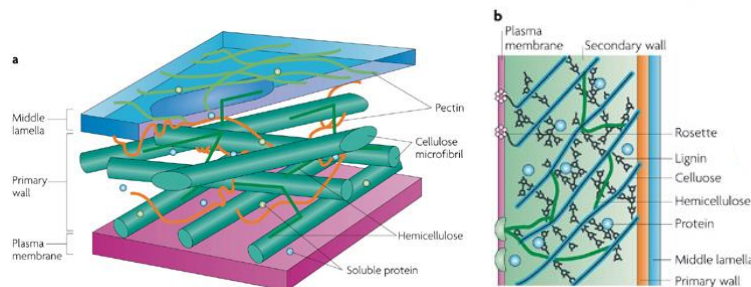
## - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -



**Abbildung 24 Kernprozess der Lignocelluloseethanol Bioraffinerie**  
*Quelle: eigene Darstellung*

### 4.2.3 Die Verwertung von Lignocellulose

Lignocellulosen sind verholzte Pflanzen welche aus den drei Hauptbestandteilen Cellulose, Hemicellulose und Lignin aufgebaut sind. Der Hauptbestandteil dieser Pflanzen ist Cellulose, ein langkettiges unverzweigtes Polymer aus Glucose. Gemeinsam mit Hemicellulose, einer Matrix verschiedener Polysaccharide, bildet Cellulose ein Gerüst, in welches beim Vorgang der Verholzung Lignin eingelagert wird.



**Abbildung 25 Aufbau der Zellmembran von Pflanzen**  
*Quelle: Sticklen 2008*

Cellulose sorgt in der pflanzlichen Zelle für ausreichend Zug- und Biegefestigkeit während Lignin für die Druckfestigkeit verantwortlich ist. Gemeinsam im Verbund schützt dieser komplexe Aufbau durch eine schwere Zugänglichkeit für Enzyme die Pflanze vor Schädlingen und mikrobiellem Abbau [vgl. Türk 2014, S.44]. Der Aufbau dieser Zellmembran ist in Abbildung 25 dargestellt.

Bei der energetischen Nutzung von Stroh wird die durch Photosynthese aus Sonnenenergie gebildete Biomasse in nutzbare Energie wie Wärme, Strom oder Treibstoff umgewandelt. Dabei können je nach Prozess auf alle oder nur auf Teile der gespeicherten Energie zugegriffen werden.

Den größten Energiegehalt der in der Pflanze enthaltenen Biopolymere hat Lignin mit einem Heizwert von 28,8 MJ/kg. Der Heizwert für Lignin liegt deutlich über jenem von Cellulose (17,3 MJ/kg) und Hemicellulose (16,2 MJ/kg). Bei der Verbrennung von Biomasse ist also ein hoher Ligningehalt vorteilhaft, weswegen auch Holz (Ligninanteil von ca. 25 %) bevorzugt als Festbrennstoff eingesetzt wird. [vgl. Piechota 2011, S.24]

Will man aber die Biomasse biotechnologisch verwerten sind hohe Ligninanteile nachteilig. Ein hoher Ligninanteil erschwert die Zugänglichkeit der Enzyme und dadurch die Verstoffwechslung der Kohlenstoffquelle Cellulose. Durch Vorbehandlung wird angestrebt, die kompakte Struktur von Lignocellulosen zu zerstören und dadurch einen Abbau der Polymere möglich zu machen. Die verschiedenen Möglichkeiten der Vorbehandlung werden im nächsten Kapitel beschrieben.

#### 4.2.4 Vorbehandlung von Biomasse für die biotechnologische Verwertung

Die Vorbehandlung des Rohstoffes umfasst die Konditionierung des Rohstoffes um einen Abbau von Polymeren wie Cellulose in Monomere in der nachfolgenden Hydrolyse gewährleisten zu können. Die Komplexität des Verfahrensschrittes ist vom Aufbau der Biomasse abhängig. Aufgrund des oben beschriebenen komplexen Aufbaus von Lignocellulose ist eine Vorbehandlung des Rohstoffes unumgänglich. Man unterscheidet dabei die Vorbehandlungsarten, physikalisch und chemisch, wobei eine physikalische Wirkungsweise mechanisch oder thermisch möglich ist. Auch eine biologische Vorbehandlung ist möglich allerdings konnten damit bis heute noch keine vermarktbareren Verfahren entwickelt werden [vgl. Alvira et al. 2010].

In Tabelle 12 ist eine Zusammenfassung der Wirkungsweise von physikalischen, chemischen und kombinierten Methoden eingefügt.

**Tabelle 12 allgemeine Übersicht über physikalische und chemische Vorbehandlungsmethoden**

*Quelle: eigene Darstellung nach Lindorfer et al. 2010*

Methode	Physikalisch		Chemisch	kombinierte Methoden	
Behandlungsschritte die eine Veränderung der Struktur bewirken	Zerkleinerung Vermahlung	Bestrahlung (Elektrodenstrahl, Mikrowellen)	Temperatur (Steam Explosion, Pyrolyse)	Laugen, Säuren, Gase, Oxidation-, Reduktionsmittel	Alkalischer Aufschluß kombiniert mit Steam Explosion, Vermahlung gefolgt von Laugen bzw. Säurebehandlung
Beschreibung der Veränderung	Erhöhung der spezifischen Oberfläche; Herabsetzung des Polymerisationsgrades; Hydrolyse von Lignocellulose; Partielle Depolymerisation von Lignin		Lignolyse; Herabsetzung des Polymerisationsgrades u. der Kristallinität von Cellulose; Aufquellung bzw. Erhöhung der Porosität	Abbau von Hemicellulose; Lignolyse; Erhöhung der spezifischen Oberfläche und Porengröße	

In Tabelle 13 werden einzelne Technologien sowie deren Nachteile aufgelistet. Die Art der Vorbehandlung ist auch abhängig von der nachfolgenden Verwertung der Biomasse.

- 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

In dieser Arbeit sind vor allem jene Technologien von Interesse, die für eine nachgeschaltete Bioethanolerzeugung und Biogasgewinnung genutzt werden können. Wobei auch hier zu unterscheiden ist, ob beide Technologien getrennt voneinander oder in Kombination betrachtet werden.

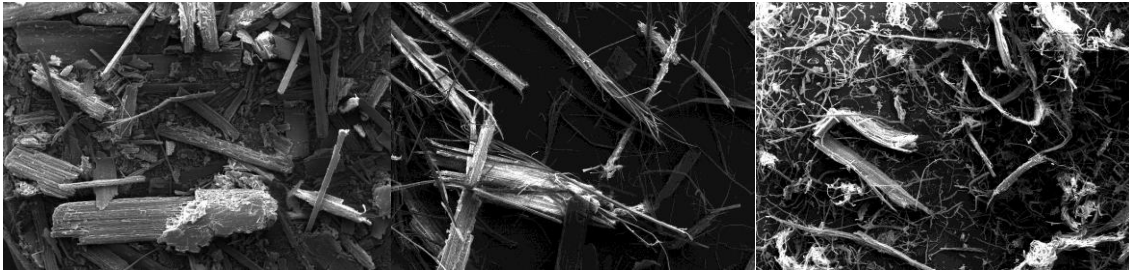
**Tabelle 13 Übersicht über verschiedene Vorbehandlungsmethoden – Wirkungsweise**  
*Quelle: eigene Darstellung nach Hendriks und Zeeman 2009; Alvira et al.2010*

	Mechanisch Chemisch Thermisch	Oberflächen- vergrößerung	Veränderung der Lignocellulose- matrix	Nachteile
Mahlen	M	X	-	Hoher Energiebedarf
Heißwasser	T	X	X	Hoher Wasser und Energiebedarf
Steam- Explosion	M/T	X	X	Zerstörung von Hemicellulose und Bildung von Inhibitoren
AFEX	M/C/T	X	X	Hohe Kosten für Ammonium, wenig geeignet bei hohen Ligningehalten
Organosolv	C/T	X	X	Hohe Lösungsmittelkosten, Rezyklierung der Chemikalien notwendig
Verdünnte Säure	C/T	X	X	Hohe Kosten
CO <sub>2</sub> -Explosion	M/C/T	X	X	

Wenngleich es ausreichend Information über die Wirkungsweise verschiedener Vorbehandlungsmethoden gibt, sind nur unzureichende Ergebnisse über den Vergleich von Vorbehandlungskosten vorhanden. Die Benennung einer optimalen Vorbehandlungsmethode zur Bioethanolherstellung ist nur schwer möglich und für verschiedene Substrate unterschiedlich. Steam-Explosion ist eine gut erforschte und mit Literaturstellen abgesicherte Technologie, daher wurde sie auch in dieser Arbeit verwendet. Steam-Explosion ist außerdem eine Technologie die im Bioethanol- aber auch im Biogasprozess einsetzbar ist. Wie bereits in den Tabellen oben festgehalten ist Steam-Explosion eine physikalische Vorbehandlungsmethode, welche mechanische und thermische Einwirkungen auf das Substrat ausnutzt. Bei diesem Verfahren wird das zu behandelnde feuchte Material mit Sattdampf über direkte und/oder indirekte Beheizung auf die gewünschte Temperatur bis über 200°C gebracht. Nach der Kochung für eine festgelegte Zeitspanne unter Sattdampfbedingungen wird der vorliegende Druck schlagartig entspannt. Durch das expandierende Luft Dampf-Gemisch kommt es zu



einer Explosion der Faser und einer Zerstörung der Lignocellulosematrix. Dabei ist die schlagartige Druckentspannung entscheidend. In Abbildung 26 sind Aufnahmen eines Rasterelektrodenmikroskops (REM) von unbehandeltem, mit Dampf unter Druck gekochtem und mit Steam-Explosion behandeltem Stroh dargestellt. Deutlich erkennbar ist die Veränderung der Faserstruktur und die feinste Auftrennung durch Steam-Explosion Vorbehandlung.



**Abbildung 26 REM-Aufnahmen von Stroh unbehandelt (links) mit Dampf gekocht (mitte; 200°C-20min) und mit Steam-Explosion vorbehandelt (rechts; 200°C-20min)**

*Quelle: eigene Darstellung FH-Wels*

Steam-Explosion Vorbehandlung kann im Batch-Betrieb oder kontinuierlich durchgeführt werden. Die meisten Laborergebnisse und dadurch Literaturdaten wurden im Batch Betrieb ermittelt. In dieser Arbeit wurde die Vorbehandlung ebenfalls diskontinuierlich durchgeführt. Details zur Durchführung befinden sich in Kapitel 5.2.1.

#### **4.2.5 Hydrolyse**

Auf die Vorbehandlung folgt die sogenannte Hydrolyse. Im Zusammenhang mit Lignocelluloseethanolerzeugung bezeichnet sie den Abbau von Cellulose zu Glucose nach Gleichung 8.



Die Umwandlung kann chemisch oder enzymatisch erfolgen [vgl. Palmqvist und Hahn-Hägerdal 2000; Balat 2011, S.866]. Bei der enzymatischen Hydrolyse von Cellulose wird die Reaktion von sogenannten Cellulasen katalysiert. Cellulasen sind ein Enzymkomplex welcher nur in seiner Gesamtheit eine vollständige Umwandlung des Polymers bewerkstelligen kann [vgl. Lynd et al. 2002]. In diesem Komplex gibt es Enzyme die das Cellulosemakromolekül in der Mitte spalten und solche die zwei- oder viergruppige Moleküle vom Ende der Kette abtrennen. Diese kleinen Polymere aus nur noch zwei bis vier Zuckermolekülen werden schließlich von einem dritten Enzym zu Monomeren abgebaut. Die Enzymproduktion ist einer der kostenintensivsten

Verfahrensschritte in der Lignocelluloseethanolerzeugung. Die Erforschung hocheffizienter Enzymkomplexe war zentrales Forschungsthema im Bereich Lignocelluloseethanol in den vergangenen Jahrzehnten [vgl. Margeot et al 2009, Banerjee et al. 2010]. Primäres Interesse war dabei die Geschwindigkeit und Ausbeute der Reaktion deutlich zu steigern [vgl. Margeot et al 2009, S.374]. Zu beachten war vor allem die starke Endproduktthemmung der Enzyme. Je höher die Konzentration von Glucose aber vor allem die Konzentration der Disaccharide, bei Cellulose auch Cellobiose genannt, desto stärker nimmt die Aktivität des Enzymes ab [vgl. Holtzapfle et al. 1990, S.275]. Geringe Substratkonzentrationen führen also zu deutlich höheren Zuckerausbeuten. Die Ökonomie der Produktabtrennung ist allerdings stark von der Ethanolkonzentration in der Flüssigkeit abhängig (vgl. Kapitel 4.2.7) und geringe Substratkonzentrationen führen zu geringen Zucker- und folglich Ethanolkonzentrationen. Ein geringer Substrateinsatz ist also keine Lösung für abnehmende Enzymaktivität und Glucoseausbeute. Heute stehen jedoch Enzyme und Prozesskonzepte zur Verfügung die hohe Ausbeuten bei ökonomisch interessanten Zuckerkonzentrationen versprechen [vgl. Clariant; BetaRenewables]. Die Produkte der Hydrolyse sind eine zuckerreiche Lösung, das Hydrolysat und ein ungelöster Rückstand.

#### **4.2.6 Fermentation**

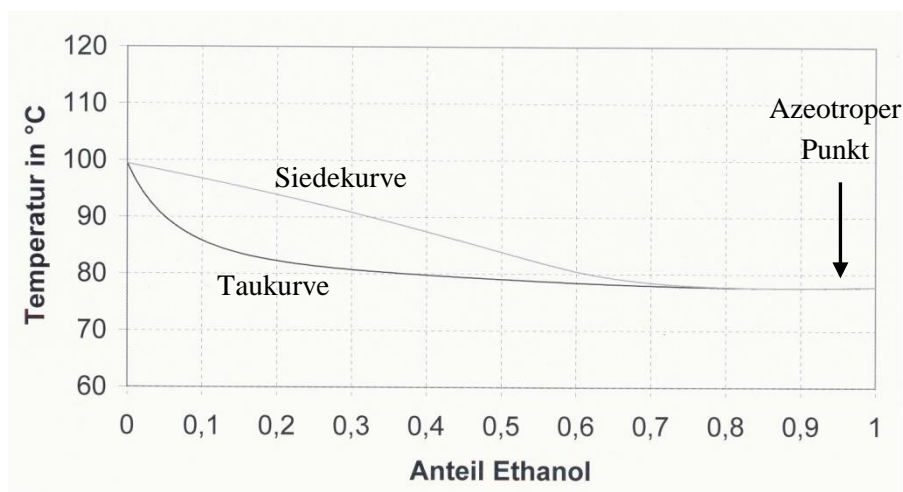
In der Fermentation werden die monomeren Zucker durch Mikroorganismen in Ethanol umgewandelt. Die Abtrennung der festen Restbiomasse vom Hydrolysat kann vor oder nach der Fermentation erfolgen. Bei einer Abtrennung vor der Fermentation ist der Input der Fermentation eine Lösung ohne Feststoffe. Die Mikroorganismen in der Fermentation können dadurch als alleiniger Feststoff nach der Reaktion über Filtration abgetrennt und rezykliert werden. Für die Fermentation von Zuckern zu Ethanol können verschiedene Mikroorganismen eingesetzt werden. Am weitesten verbreitet ist der Einsatz von *Saccharomyces cerevisiae*, welcher bei saurem pH-Wert und hoher Toleranz von Alkohol, Säuren und Zuckerkonzentrationen sehr gute Umwandlungsraten von Zucker zu Ethanol erzielt. Nachteilig für die Optimierung der Bioethanolherstellung ist, dass *Saccharomyces cerevisiae* nur Hexosen fermentieren kann. Die Xylose und Arabinose aus der Hemicellulose im Hydrolysat können ohne den Einsatz anderer Organismen nicht in Alkohol umgewandelt werden. [vgl. Margeot et al. 2009, S.375]

Durch genetische Modifikation ist es allerdings heute möglich, dass Pentosen und Hexosen von nur einem Organismus großtechnisch in Ethanol umgewandelt werden können. [vgl. Clariant Sunliquid®]

Werden die Pentosen nicht zu Ethanol fermentiert stehen sie als Rohstoff für andere Produkte in additiven Prozessen zur Verfügung. Als Möglichkeiten sollen hier Biogasproduktion und Xylitol Herstellung angeführt werden.

#### 4.2.7 Produktabtrennung

Ein zentraler Schritt in der Bioethanolerzeugung ist die Abtrennung des Produktes. Ein einfacher Weg ist die Nutzung des deutlich geringeren Siedepunktes von Ethanol in der Destillation. Dabei ist allerdings zu beachten, dass Wasser mit Ethanol ein Azeotrop bildet. Bei einer Ethanolkonzentration von 96,5 Vol% berühren sich Tau und Siedekurve des Gemisches und eine Abtrennung durch Destillation ist nicht weiter möglich (siehe Abbildung 27). Für die Erzeugung von reinem Ethanol ist also in jedem Fall eine weitere Trenntechnologie notwendig [vgl. Onuki, S.5f].



**Abbildung 27 Siedediagramm vom Gemisch Ethanol-Wasser**

Quelle: modifiziert von [http://public.beuth-](http://public.beuth-hochschule.de/~wseifert/lmr/thermo/BilderThermo/Theorie/SiedediagrammEthanol_Wasser.jpg)

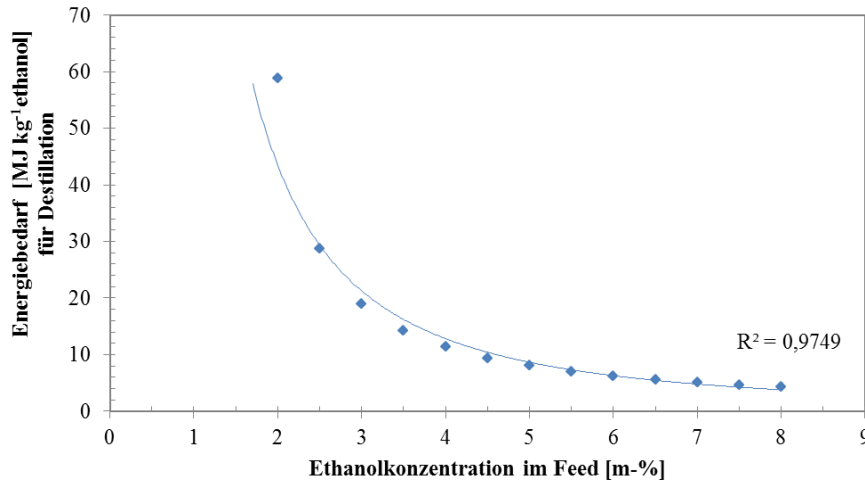
[hochschule.de/~wseifert/lmr/thermo/BilderThermo/Theorie/SiedediagrammEthanol\\_Wasser.jpg](http://public.beuth-hochschule.de/~wseifert/lmr/thermo/BilderThermo/Theorie/SiedediagrammEthanol_Wasser.jpg)

Möglichkeiten hochreinen Ethanol zu gewinnen sind Pervaporation, extractive Destillation mit tertiären Gemischen, Membranprozesse (Molekularsiebe), oder selektive Adsorption [vgl. Huang et al. 2008].

Für die Destillation gilt jedoch auf jeden Fall, dass der Energieeinsatz und damit die Kosten bei sinkender Ethanolkonzentration im Gemisch deutlich zunimmt. Dargestellt als Funktion in Abhängigkeit von der Ethanolkonzentration in der Flüssigkeit ergibt sich basierend auf Wärmeübergangswerten aus dem VDI-Wärmatlas die in Abbildung

28 dargestellte Funktion. Erkennbar ist eine exponentielle Abhängigkeit mit der Gleichung:

$$\text{Energiebedarf} = 147,31 * \text{Ethanolkonzentration [m-\%]}^{-1,761}. \quad (9)$$



**Abbildung 28 Energiebedarf der Destillation in Abhängigkeit der Ethanolkonzentration im Feed.**

*Quelle: eigene Darstellung*

#### 4.2.8 Wirtschaftlichkeit von Lignocelluloseethanolanlagen

Prozesse für die Lignocelluloseethanolerzeugung sind vielfältig und unterscheiden sich vor allem im eingesetzten Rohstoff, in Vorbehandlung und Hydrolyse. Eine allgemeine Aussage über die Wirtschaftlichkeit ist dadurch schwierig. Auch bei Ethanolanlagen sind die Investitionskosten stark von der Größe der Anlage abhängig, welche bei steigender Anlagenkapazität deutlich abnehmen. Bei großen Anlagen steigen allerdings aufgrund steigender Transportkosten die Kosten für Rohstoff und Logistik, dieser Kostenanstieg ist dabei stark von den regionalen Gegebenheiten und der Rohstoffverfügbarkeit abhängig. [vgl. Gnansounou und Dauriat 2010, S.4985].

Die Gesteungskosten von Ethanol und ihr Optimierungspotential lässt sich in drei Kategorien, wie in Tabelle 14 dargestellt, zusammenfassen.

Als Optimierungsbeispiele der letzten Jahre in den Kategorien können hier beispielhaft die on-side Enzymproduktion wie bereits von Steinmüller [vgl. Steinmüller 1991] vorgeschlagen und von Clariant AG [vgl. Clariant] weiterentwickelt oder die simultane Pentosen und Hexosenverwertung (vgl. Kapitel 4.2.6) angeführt werden.

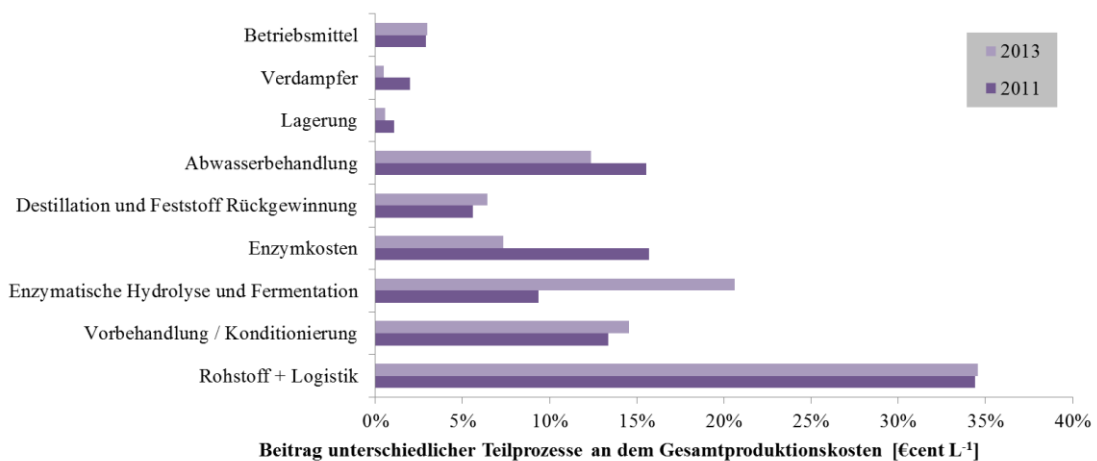
- 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

**Tabelle 14 Einflussparameter auf die Kostenoptimierung bei der Erzeugung von Bioethanol**

*Quelle: eigene Darstellung nach Viikari et al.*

Reduktion der Enzymkosten	Reduktion der Hydrolysekosten	Reduktion der Ethanolgestehungskosten
Optimierung des Aktiven Zentrums	Effektivität der Vorbehandlung	Rohstoffnutzungsgrad
Hohe Aktivität	Neue Enzyme	Gesamtproduktivität
geringe Endprodukthemmung	Hilfsenzyme	Produktkonzentration
Hohe thermische Stabilität	Reduktion der Menge von extern zugeführtem Enzym	Neue Prozesskonzepte
Optimale Bindung an der Cellulose		
Höhere Enzymausbeute		

Einen guten Überblick über die Kostenentwicklung der Celluloseethanolverfermentation bieten die Veröffentlichungen des National Renewable Energy Laboratory (NREL) die ihre Prozesskette laufend durch neue Innovationen ergänzt und die Gestehungskosten dahingehend angepasst haben. Die relativen Anteile an den Produktionskosten wie von NREL angegeben [vgl Humbird et al. 2011, Davis et al. 2013] sind in Abbildung 29 dargestellt.



**Abbildung 29 Beitrag unterschiedlicher Teilprozesse an den Gesamtproduktionskosten**

*Quelle: eigene Darstellung nach Humbird et al. 2011*

An diesen Zahlen beobachtbar ist ein deutlicher Rückgang der Enzymkosten was auf die ständige Weiterentwicklung kommerziell erhältlicher Enzyme zurückzuführen ist. Der

Rückgang der Kosten für die Abwasserbehandlung lässt sich durch die Integration einer Biogasanlage erklären welche auch treibender Faktor für den relativen Kostenanstieg im Kostenblock Hydrolyse und Fermentation ist. Im Jahr 2013 wird in diesem Kostenblock auch die Investition der Biogasanlage berücksichtigt [vgl. Davis et al. 2013].

Hohe Rohstoffkosten aufgrund hoher Transportkosten, wie in beiden Jahren beobachtbar (vgl. Abbildung 29), ist vor allem bei Bioethanolanlagen zu beachten, da aufgrund begrenzter Dezentralität der Anlagen Rohstoffe über weite Strecken transportiert werden müssen. In diesem Kostenblock besteht nur wenig Optimierungspotential.

#### 4.2.8.1 Energieerzeugung in Bioethanolanlagen

Für die Teilprozesse einer Lignocelluloseethanol Bioraffinerie wird ein nicht unwesentlicher Anteil Energie benötigt. Die tatsächlichen Werte hängen von den genauen Prozessbedingungen der Teilschritte ab. Für die Nachhaltigkeit des Prozesses ist anzustreben, dass der Energiebedarf durch Eigenenergieproduktion zur Verfügung gestellt wird. Dafür stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. In jedem Fall kommt es zur Erzeugung von Wärme und Strom durch Kraft-Wärmekopplung. Für die Verbrennung stehen dabei die Rohstoffe, Stroh, Lignin und Biogas zur Verfügung. Biogas nur dann, wenn in das Verfahren eine Biogasanlage integriert wird.

#### 4.2.8.2 Die Biogasanlage als Reststoffverwerter

Die Integration einer Biogasanlage ist wie in der aktuellsten Prozessbeschreibung des NREL ersichtlich für die Reduktion der Abwasserkosten und die Möglichkeit der Energieerzeugung neben der Ligninverbrennung eine interessante Option. Üblicherweise wird die Biogasanlage als Verwerter flüssiger und zum Teil auch fester Reststoffe eingebunden. Je nach Prozessführung kann die Biogasanlage unvergorene Kohlenhydrate (zum Beispiel Pentosen), Überschuss Biomasse aus der Fermentation, Proteine und zu sehr geringen Teilen Lignin verwerten. Die Einbindung einer Biogasanlage in eine Bioethanolanlage wurde sehr detailliert für die Verwertung von Biomasse der ersten Generation untersucht [vgl. Lanzerstorfer und Jäger 2008; Oleskowicz-Popiel et al. 2012]. Auch für Ethanolprozesse zweiter Generation wurden die Integration einer Biogasanlage bereits untersucht [vgl. Taherzadeh und Karimi 2008; Kaparaju et al. 2009; De Paoli et al. 2011; Shafiei et al. 2011; Kemppainen et al. 2012]. Gemeinsam ist diesen Konzepten immer, dass die Biogasanlage in einen

optimierten Ethanolprozess integriert wird. Dabei wird lediglich die Frage beantwortet, welche der anfallenden Reststoffe verwertet werden können und welcher Biogasertrag daraus zu erwarten ist. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist allerdings anzustreben, dass aus einer Tonne Stroh der maximale Energieertrag erzielt wird. In dieser Arbeit wurde daher die Limitierung der Biogasanlage auf Reststoffe nicht berücksichtigt und die Wertigkeit der Produkte Gas und Ethanol gleich gestellt. Es erfolgte eine gemeinsame Optimierung der Prozesse durch eine Prozessnetzwerksynthese (siehe Kapitel 7.2.3).

#### **4.2.9 Entwicklung von Lignocelluloseethanolanlagen in Europa und der Welt**

Die Geschichte von Ethanol als Treibstoff geht zurück bis ins 19. Jahrhundert. Fehlende eigene Ölquellen und die Abhängigkeit von Öl aus Amerika und Russland führten in einigen europäischen Staaten, wie Deutschland oder Frankreich, zur Entwicklung von Treibstoff aus landwirtschaftlichen Produkten. Schon damals war die begrenzte Verfügbarkeit von Rohstoffen für die Produktion eine der größten Sorgen von Entwicklern dieser Technologie. Aus diesem Grund versuchte man die in deutlich größeren Mengen zur Verfügung stehende Cellulose für die Alkoholproduktion zu nutzen, allerdings waren die Ausbeuten gering und die Produktionskosten hoch [vgl. Kovarik 1998].

Auch wenn Alkohol als Treibstoff immer Thema war spielte es neben Benzin nur eine untergeordnete Rolle [vgl. Kovarik 1998]. Erst mit den Ölkrisen der 1970er Jahre fand Alkohol als Treibstoff neues Interesse. Zunehmende Forschungstätigkeit und Produktion von Bioethanol aus Feldfrüchten führte auch bald zu steigendem Interesse der Nutzung von Cellulose. Die aus Lignocellulose produzierte Menge an Ethanol ist jedoch bis heute gering, allerdings haben die Entwicklungen der letzten Jahre und die dadurch erzielten Kosteneinsparungen bessere Bedingungen für eine Kommerzialisierung dieses Produktes geschaffen [vgl. Viikari et al. 2012].

Die größte Unsicherheit vor allem in Europa ist heute mit der schweren Einschätzbarkeit des Marktes verbunden. Die politische Unterstützung beschränkt sich in Sektor Biotreibstoffe auf Investitionsförderungen und die Befreiung von der Mineralölsteuer. Lignocelluloseethanol steht somit nicht nur in Konkurrenz mit Bioethanol der ersten Generation sondern auch mit fossilen Brennstoffen. Für den Kunden ist bei momentanen Treibstoffpreisen (SuperBenzin 95 Oktan 0,995 – 1,05 €; E85 0,95-1,04 nach ÖAMTC 2015) kein Preisvorteil vorhanden. Vorteilhaft gegenüber

CNG-Fahrzeugen ist, dass die Umrüstung eines Benzin-PKW auf Bioethanolbetrieb bis E85 nur mit geringen Kosten verbunden ist. Der Anstieg der Bioethanolproduktion ist auf die Schaffung eines politisch gewünschten Marktes angewiesen. Auch Entwicklungen in den klassischen Ethanolländern Brasilien und Amerika sind nicht auf die bessere Ökonomie von Ethanol im Vergleich zu Benzin zurück zu führen sondern auf das politische Interesse zur Steigerung des Anteils an Ethanol im Verkehrssektor [vgl. Kongress der Vereinigten Staaten von Amerika; Ferraz Dias de Moraes].

In Europa basiert die Schaffung eines Ethanolmarktes auf der EU Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (2009/28/EG) die neben dem 20 % Ziel für erneuerbare Energie ein verbindliches 10 % Ziel für den Anteil erneuerbarer Energie im Verkehrssektor vorsieht. Als Reaktion auf diese gesetzliche Vorgabe sollte in Frankreich und Deutschland noch im selben Jahr die Einführung von E10, einem Benzinkraftstoff mit bis zu 10 % Bioethanol, durchgeführt werden. Die Einführung in Frankreich erfolgte problemlos. Die Realisierung in Deutschland wurde frühzeitig gestoppt, da seitens der Automobilindustrie keine vollständige Garantie für den problemlosen Einsatz in ihren Autos gegeben wurde. Die Einführung erfolgte in Deutschland verspätet, im Jänner 2011. Allerdings wurde die Umstellung seitens der Regierung und der Automobilindustrie schlecht vorbereitet was fehlende Akzeptanz seitens der Autolenker zur Folge hatte [vgl. Die Presse 2011]. Die Einführung von E10 in Deutschland hatte hohes Mediales Interesse zur Folge und in vielen Ländern wie auch Österreich wurde daraufhin die Einführung von E10 gestoppt, zu groß waren die ethischen wie auch technischen Bedenken [vgl. Wettach 2011]. Die technischen Bedenken sind heute beseitigt, ethische Kritik bleibt bestehen.

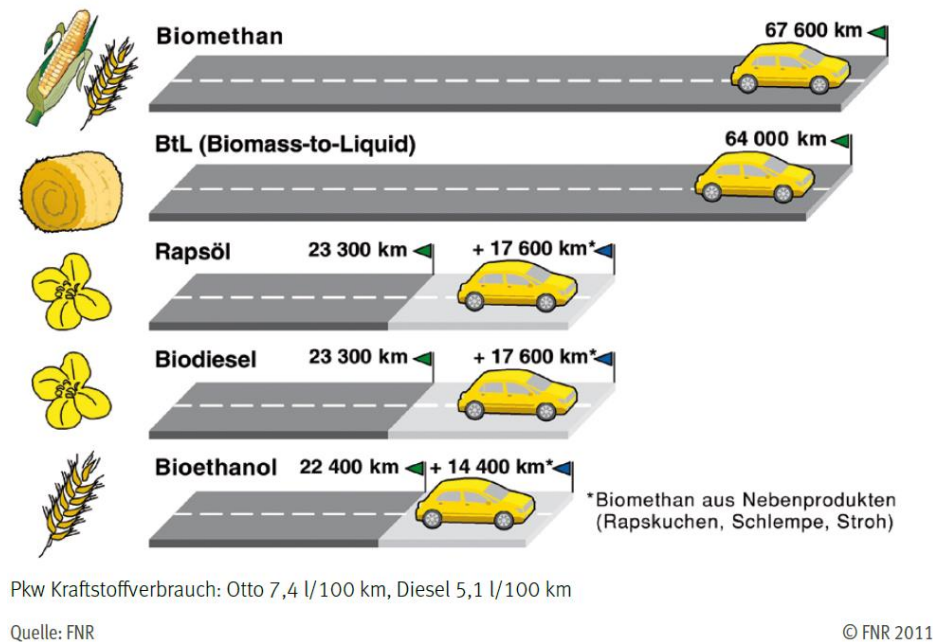
### **4.3 Bioethanol versus Biogas als alternativer Treibstoff**

Im Jahr 2010 betrug der Anteil biogener Kraftstoffe in Österreich 6,58 % des gesamten Treibstoffverbrauches, wobei der Großteil auf die Beimischung biogener Kraftstoffe zu Mineralölprodukten zurückzuführen ist. Im Detail wurden 427.900 t Biodiesel zu 6.062.964 t Diesel und 106.201 t Bioethanol zu 1.820.432 t Benzin beigemischt. Im gesamten wurden 501.663 t Biodiesel, 106.201 t Bioethanol und 17.393 t Pflanzenöl im Verkehrssektor eingesetzt (Beimischung und direkter Einsatz). Biogas wird in Österreich derzeit nur in vernachlässigbaren Mengen für den Transport genutzt. [vgl. Winter 2011, S.14 ff]



#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

Der Vorteil von Bioethanol und Biodiesel als Treibstoff wird vor allem darin gesehen, dass sie ohne große Änderungen am bestehenden System als Alternative zu Erdöl eingesetzt werden können [vgl. Gnansounou 2010, S. 4843]. Betrachtet man jedoch die Kilometerleistungen je verbrauchter Flächeneinheit (siehe Abbildung 30) wird deutlich, dass diese Vorteile kritisch zu prüfen sind.

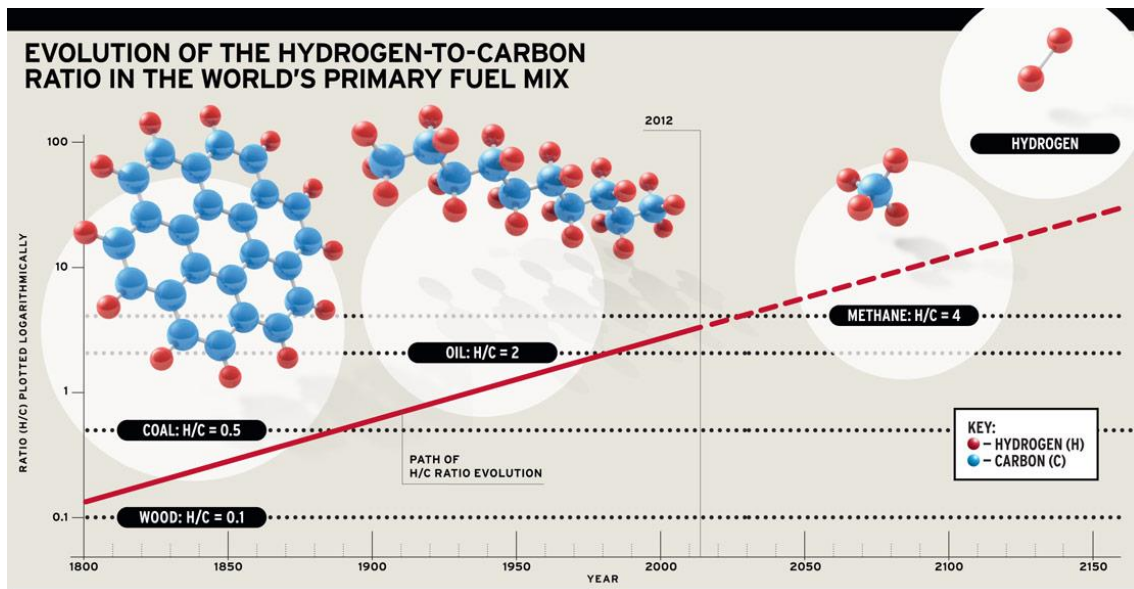


**Abbildung 30 Kilometerleistung verschiedener Biotreibstoffe je Hektar Anbaufläche**  
*Quelle: Fachagentur nachwachsende Rohstoffe 2014*

Ausgehend von vorhandenen Biomassepotentialen (vgl. Kapitel 2.3.1) und unterschiedlichen Nutzungen von Energie (vgl. Kapitel 2.3) kann davon ausgegangen werden, dass nicht der gesamte Energiebedarf im Transportsektor durch Biomasse gedeckt werden kann. Es wird sich also ein Mix unterschiedlicher Technologien etablieren müssen. Als Alternative, vor allem im urbanen Bereich, wird sich vermutlich die Elektromobilität entwickeln [vgl. Van Mierlo und Magetto. 2007] Eine weitere Alternative wäre der Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen, was eine passende Ergänzung der Elektromobilität darstellen könnte [vgl. Offer et al. 2010]. Um diese Arten der Bedarfsdeckung etablieren zu können sind aber hohe Investitionen in neue - Tankinfrastruktur erforderlich. Die amerikanische Environmental Protection Agency (EPA) sieht in diesem Zusammenhang die Möglichkeit dass ein Intensivierung von Erdgasfahrzeugen (Crompressed Natural Gas – CNG) bereits heute eine wichtige Rolle in der Verbreitung von Wasserstoffautos in der Zukunft spielen kann. So können beispielsweise technologische Entwicklungen für Erdgastanks direkt auf Wasserstoff

#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

übertragen werden [vgl. Pyper und ClimateWire 2012]. Zudem ergeben sich für eine zukünftige Umstellung der Mobilität auf Wasserstoff ähnliche Vorteile wie gegenwärtig für flüssige Brennstoffe (Beimischung Bioethanol, Biodiesel zu den fossilen Treibstoffen), da Wasserstoff dem Erdgas beigemischt werden kann [vgl. Kapadani und Kapadani 2013]. Ebenfalls möglich ist eine dezentrale Umwandlung von Methan zu Wasserstoff direkt am Standort der Tankstelle [vgl. Padró und Putsche 1999, Aicher et al. 2004, Nijboer 2010 S. 72], eine langfristige Nutzung von errichteter Infrastruktur scheint somit gewährleistet zu sein. Vor diesem Hintergrund gilt es zu überlegen, ob die Erzeugung gasförmiger Kraftstoffe aus Biomasse nicht zielführender ist, als die Erzeugung von Flüssigbrennstoffen. Wie in Abbildung 31 dargestellt bildet Wasserstoff einen durchaus nachvollziehbarer Entwicklungsschritt auf dem Weg zu einer emissionsreduzierten Gesellschaft.



**Abbildung 31 Die Entwicklung einer Gesellschaft – vom Kohlenstoff zum Wasserstoff**

Quelle: <http://www.caranddriver.com/features/natural-gas-the-next-step-on-the-road-to-hydrogen-tech-dept>

Ein weiterer Vorteil von Biogas gegenüber Bioethanol ist, dass die bekannten vorhanden Ressourcen für Erdgas deutlich größer sind als für Erdöl [vgl. Andrleit et al. 2012, S. 54]. Der Umstieg auf erneuerbare Rohstoffe kann daher langsamer erfolgen.

Da Wasserstoff nicht nur aus Biomasse sondern über den Weg der Wasserelektrolyse aus allen vorhandenen erneuerbaren Energieträgern gewonnen werden kann, scheint die Versorgungssicherheit für Mobilität auch zukünftig gewährleistet zu sein

## **5 Material und Methoden**

### **5.1 Laborversuche zu anaeroben Vergärung**

Laborversuche zu anaeroben Vergärung können in zwei Betriebsweisen unterteilt werden: Batch-Versuche und kontinuierliche Versuche. In dieser Arbeit kamen beide Betriebsarten zum Einsatz.

#### **5.1.1 Batch Versuche nach VDI 4630**

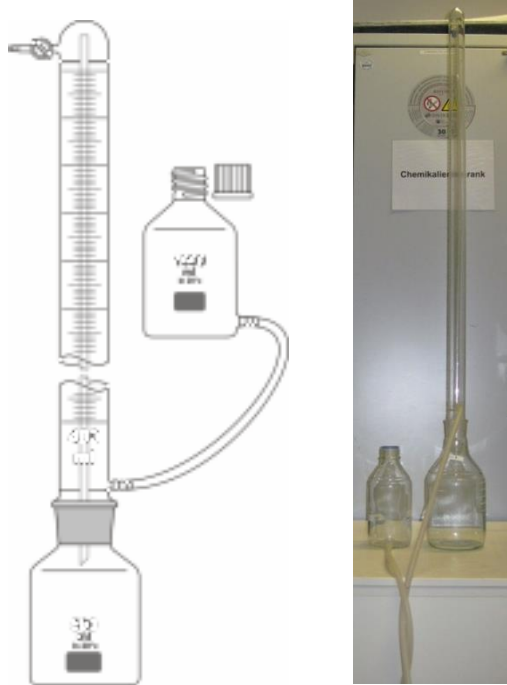
Batch Versuche sind diskontinuierliche Verfahren und dadurch bestimmt, dass das Reaktionsgefäß nur zu Beginn des Versuches mit Substrat beschickt wird. Der genaue Versuchsablauf wird nachfolgend beschrieben.

Alle im Kapitel 7 verwendeten und nicht der Literatur entnommen Biogaspotentiale wurden im Labor nach der VDI Richtlinie 4630 ermittelt. Die Richtlinie VDI 4630 beinhaltet Regeln zur Beurteilung der Vergärbarkeit von organischen Stoffen und der notwendigen Ausrüstung für passende Versuchsanordnungen [vgl. Verein Deutscher Ingenieure]. Für die durchgeführten Versuche wurde die Methode Gasvolumenmessung mittels Eudiometerrohr ausgewählt. Hierbei werden, um die Gasproduktion zu messen, auf Standflaschen skalierte Eudiometerrohre mit Glasschliff angebracht. Die Versuchsapparatur ist in Abbildung 32 dargestellt.

Das Eudiometerrohr ist durch eine Olive und einem Silikonschlauch im unteren Teil mit einem Niveaugefäß verbunden und enthält Sperrflüssigkeit. Diese aus Wasser, Schwefelsäure und Natriumsulfat hergestellte Flüssigkeit [vgl. DIN 38414-8:1985-06 S.3] ist gasdicht, das heißt, das gebildete Biogas kann sich darin nicht lösen. Gebildetes Biogas verdrängt die im Eudiometerrohr befindliche Sperrflüssigkeit aufgrund der kommunizierenden Gefäße und das Volumen des gebildeten Biogases kann an der am Rohr angebrachten Skala abgelesen werden. Um Fehler durch Kompression oder Expansion des Gases zu vermeiden, wird das Flüssigkeitsniveau im Eudiometerrohr und im Ausgleichsgefäß, vor der Bestimmung des gebildeten Biogasvolumens, auf gleiche Höhe gebracht. Durch diese Maßnahme wird gewährleistet, dass das Volumen immer bei Umgebungsdruck bestimmt wird. Das Biogaslabor an der FH Wels verfügt über 40 dieser beschriebenen Batch-Versuchsapparaturen mit 2 L Fermentervolumen. und Eudiometerrohren mit 1000 ml Fassungsvermögen. Die Temperierung der Reaktionsgefäße erfolgte durch Wasserbäder und Tauchthermostaten. Die

#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

Durchmischung des Fermenterinhalt wurde durch tägliche manuelle Manipulation gewährleistet.



**Abbildung 32 Gasvolumenmessung mittels Eudiometerrohr. Versuchsapparatur wie in der Literatur abgebildet (links) und wie im Versuch eingesetzt (rechts).**

*Quelle: [www.neubert-glas.de](http://www.neubert-glas.de) (rechts); eigenes Foto (links)*

##### 5.1.1.1 Material

- Versuchsapparatur für Biogaspotentialtests wie in Abbildung 32 incl. Temperierung
- Trockenschrank
- Muffelofen
- Messzylinder 500 mL und 1 L
- Laborwaage
- Sperrflüssigkeit
- Dräger X-am® 7000
- Inokulum

##### 5.1.1.2 Durchführung

Um ausreichend geringe Gasproduktionen des Inokulum (für diese Arbeit Gärrest einer NAWARO-Anlage) zu gewährleisten wurde es 1 Woche bei 38°C in offenen Kanistern ausgegoren. Parallel wurde die Trockenmasse (TM) und die organische Trockenmasse

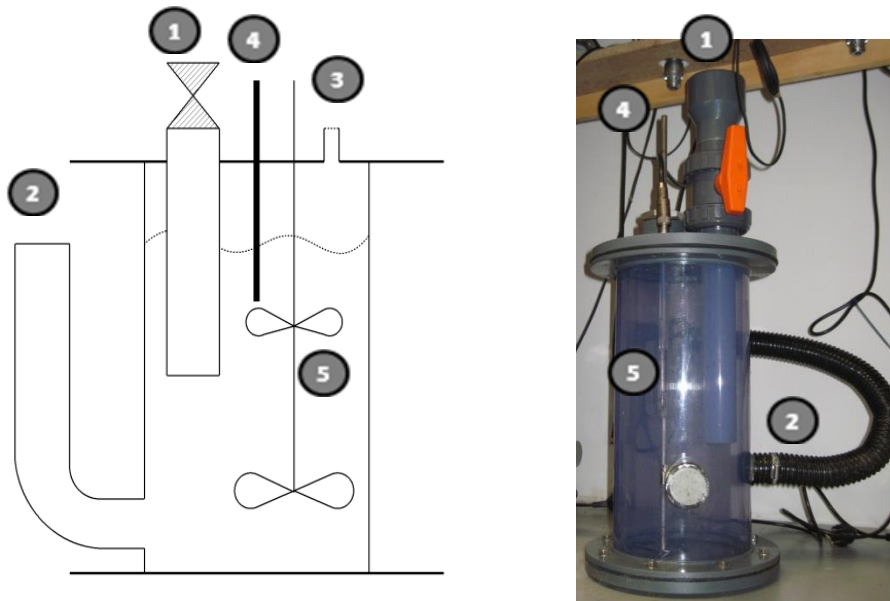
(OTM) bestimmt. Für die Versuche wurde das Inokulum mit Leitungswasser verdünnt um einen organischen Anteil von  $15 - 20 \text{ g}_{\text{OTM}} \text{ L}^{-1}$  zu erhalten. Die Normschliffgefäße wurden mit 1 L verdünntem Inokulum befüllt. Bei der Testung von flüssigen Substraten wurde der Wasseranteil bei der Verdünnung des Inokulums und Befüllung des Glasreaktors berücksichtigt. Bei festen Substraten wurden die TM und die OTM bestimmt. Für den Biogaspotentialtest wurden 3 g TM eingewogen. Die Substrate wurden direkt in den Reaktor eingewogen und die genauen Einwaagen notiert. Sobald alle Reaktoren befüllt waren, wurden die Flaschen vorsichtig geschüttelt um eine Verteilung des Substrates im Inokulum zu erreichen. Anschließend wurden die Flaschen ins Wasserbad gestellt und mit dem Eudiometer verbunden. Auf die Spülung mit  $\text{N}_2$  wurde verzichtet, da dadurch nur die Totzeit nicht aber das Biogasbildungspotential negativ beeinflusst wird (Erkenntnis aus eigenen Versuchen, Ergebnisse sind nicht angegeben). Durch Einstellen des Sperrflüssigkeitsniveaus wurde der Versuch gestartet. Alle Versuche wurden im Dreifachansatz durchgeführt. Bei jedem Versuch wurden Blindwert und Maissilage als Referenzsubstrat mitbestimmt.

### **5.1.2 Kontinuierliche Labor Biogasversuche**

Für die Durchführung von kontinuierlichen Biogasversuchen wurden 8 baugleiche Rührkessel mit einem ungefähren Volumen von 12 Litern gefertigt. Eine schematische Darstellung und ein Foto des Reaktors findet man in Abbildung 33.

Die Reaktoren haben die Maße  $0,2 \times 0,4 \text{ m D} \times \text{H}$  und wurden aus PVC und PP gefertigt. Der Zylindrische Reaktor wurde aus transparenten PVC gefertigt, um den Fermenterinhalt und im Speziellen die Bildung von Schwimm- und Sinkschichten beobachten zu können. Die Entnahmemenge des Gärrest wurde durch abwiegen bestimmt. Der Gärrest wurde unter zu Hilfenahme eines am unteren Ende des Reaktors befindlichen Schlauches entnommen (Nummer 2 Abbildung 33). Die Substratzugabe erfolgte mittels Tauchrohr und Kugelhahn, manuell einmal täglich. Die Reaktoren wurden mittels 2-stufigen exzentrischem Rührer 3 mal täglich für 5min gerührt. Die Rührstufen waren als Propellerrührer (unten) und Ankerrührer (oben) ausgeführt. Redox, pH und Temperaturmessung erfolgte mittels kombinierter Elektrode InPro®3100 (Mettler-Toledo AG). Die Temperierung der Fermenter erfolgte mittels Inkubation im Wärmeraum oder durch an die Außenseite der Fermenterwand angebrachte mit Wasser durchflossene PVC-Schläuche und dem Umlaufthermostat FBC 610 (Fisherbrand).

- 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -



**Abbildung 33 Schematische Darstellung und Foto der kontinuierlichen Labor-Biogasreaktoren**  
(1) Kugelhahn und Tauchrohr für die Substratzugabe (2) PVC Schlauch für die Substratentnahme (3) PVC Schlauch zum Milligascounter (4) pH-, Redox- und Temperatursensor (5) Rührer  
*Quelle: eigene Darstellung*

Für die volumetrische Messung des entstandenen Biogas wurden die Reaktoren mit einem milligascounter® (Dr.-Ing. Ritter Apparatebau GmbH & Co. KG) verbunden. Entstandenes Gas wurde außerdem in Gassäcken gesammelt und die Zusammensetzung des Gases mittels mobilen Gas Analysator X-am® 7000 (Drägerwerk AG & Co. KGaA) bestimmt. Gasproduktion, Temperatur, pH und Redoxwert wurden kontinuierlich mit dem Multikanal Controller MultiCon CMC-99 (SIMEX Sp. z o.o.) aufgezeichnet.

Die Fermenter konnten aufgrund der großen Durchmesser von Substratzugabe und Effluententnahme mit flüssigen und festen Substraten beschickt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Reaktoren ausschließlich mit Rindergülle betrieben.

Die Inbetriebnahme der Fermenter erfolgte mit verdünnter Rindergülle im Batch-Betrieb. Der Batch-Betrieb der Anlage wurde beibehalten bis ein konstanter pH-Wert und eine sinkende Gasproduktion beobachtet werden konnte. Anschließend startete eine tägliche Fütterung mit steigender organischer Belastung des Reaktors, welche nur über die Verweilzeit eingestellt wurde. Maximal erfolgte eine vierfache Zunahme der organischen Belastung pro Woche. Bei allen Reaktoren wurde im quasi-kontinuierlichen Betrieb eine Zielverweilzeit von 33 Tagen und eine organische Belastung von  $1,18 \text{ g}_{\text{OTS}} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  eingestellt.

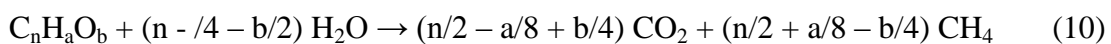
Die Realisierung eines quasi-kontinuierlichen Betriebes erfolgte durch tägliche manuelle Gärrestentnahme und Substratzudosierung. Am Freitag wurde den Reaktoren die dreifache Menge Gärrest entnommen und Substrat zugegeben. Vorversuche haben gezeigt, dass zwischen 7-Tage Fütterung der Fermenter und der Fütterung im Vorraus am Wochenende, bei Rindergülle kein relevanter Unterschied besteht. Vor Entnahme des Gärrestes erfolgte immer eine Rührung des Fermenterinhalt. Zweimal pro Woche wurde vom entnommenen Gärrest TS, OTS, CSB, TC, FOS/TAC und organische Säuren bestimmt.

Wann immer in der Fermentation ein Parameter verändert wurde, wurde eine einmonatige Stabilisierung des Systems eingehalten bevor die Versuchsdaten in der Auswertung berücksichtigt wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich in dieser Zeit ein Steady-State im Reaktor einstellen konnte. Als Steady-State wurde eine maximale Standardabweichung der täglichen Gasproduktion von 10% bei konstanter Fütterung definiert [vgl. Cobb und Hill 1991].

### **5.1.3 Mathematische Ermittlung des Biogasertragstests**

Für die mathematische Ermittlung des Biogasertrages stehen verschiedene statische und dynamische Modelle zur Verfügung. Je komplexer die Modelle umso exakter können sie die Realität der Vorgänge in Biogasanlagen wiedergeben.

Eines der einfachsten statischen Modelle ist das Modell von Buswell und Müller aus dem Jahr 1952 [vgl. Buswell und Müller 1952]. Sie entwickelten eine Gleichung mit der man aus der Elementarzusammensetzung des Inputmaterials die Biogasausbeute rechnerisch ermitteln kann. In dieser Gleichung nicht berücksichtigt sind etwaige Inhibitionseffekte, die das Wachstum der Mikroorganismen und damit das Biogaspotential negativ beeinflussen können. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt die Stoffzusammensetzung des Substrates, so wird die Abbaubarkeit des Kohlenstoffes in Zucker, Stärke und Cellulose gleich bewertet. Die aufgestellte Gleichung lautet:



In dieser Arbeit wurde das Modell von Buswell und Müller für die Gasertragsermittlung von Restzucker in flüssigen Stoffströmen einer Bioethanol Raffinerie genutzt. Die ermittelten Biogaserträge für Hexosen und Pentosen sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

**Tabelle 15 Methanerträge nach Buswell und Müller für Pentosen und Hexosen**  
*Quelle eigene Berechnungen*

	Strukturformel	Methan [L mol <sup>-1</sup> ]	Methan [L kg <sup>-1</sup> ]
Hexosen	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	67,2	373
Pentosen	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	56	373

#### 5.1.4 Mathematische Gasertragsbestimmung nach dem Modell von Hill

Neben der mathematischen Biogasertragsbestimmung nach Buswell und Müller würde für Rindergülle die Anwendbarkeit des mathematischen Modells von Hill geprüft [vgl. Hill 1983]. Das Simulationsmodell von Hill ist speziell für verschiedene Güllearten bei wechselnden Temperaturen und Verweilzeiten validiert. Das Modell zeichnet sich außerdem durch eine unkomplizierte Anwendung aus. Es können so Ergebnisse ohne langwierige Systemkalibrierung generiert werden, allerdings sind die Vorhersagbarkeit einzelner Prozessparameter und die Bestimmung der Auswirkung von Änderungen stark limitiert [vgl. Hill 1983].

Das Modell wurde im Rahmen der Arbeit in Matlab Simulink implementiert und modellierte Ergebnisse mit Versuchsdaten verglichen.

Das Modell stützt sich auf vier Massenbilanzen und zwei mikrobielle Wachstumskurven. Die Charakterisierung des Substrates wird auf die zwei Größen, abbaubares organisches Material (BVS) und leicht flüchtige organische Säuren (VFA), reduziert. Diese Vereinfachung stützt sich auf die Annahme, dass jegliches organische Material vor der Konvertierung zu Methan in organische Säuren umgewandelt werden muss.

Um BVS und VFA für verschiedene Güllearten zu bestimmen sind die nachfolgenden Gleichungen notwendig.

$$\text{BVS} = \text{OTM} \times \text{B}_0 \quad (11)$$

$$\text{VFA} = \text{BVS} \times \text{AF} \quad (12)$$

Die für die Berechnung von BVS notwendige organische Masse (OTM) ist durch Analyse zu bestimmen. Werte für B<sub>0</sub> (Anteil an biologisch abbaubaren Material) und AF (Säureanteil des abbaubaren Materials) werden von Hill für verschiedene Mistarten empfohlen und können für Gleichung 11 und Gleichung 12 übernommen werden. Die von Hill angegebenen Werte sind in Tabelle 16 zusammengefasst.



**Tabelle 16 Empfohlene Werte für B<sub>0</sub> und BVS**

Quelle: eigene Darstellung nach Hill 1983

Mistart	B <sub>0</sub>	AF
	[g <sub>BVS</sub> g <sub>OTM</sub> <sup>-1</sup> ]	[g <sub>VFA</sub> g <sub>BVS</sub> <sup>-1</sup> ]
Schweine	0.90	0.07
Rinder (Gefangenschaft)	0.65	0.05
Rinder (Mist)	0.56	0.05
Milchkuh	0.36	0.05
Geflügel (Mast)	0.70	0.20
Geflügel (Legebetrieb)	0.87	0.20

Sobald das Substrat durch BVS und VFA charakterisiert ist kann der Gasertrag anhand der nachfolgenden 6 Gleichungen bestimmt werden.

$$dS/dt = (S_0 - S)/\theta - \mu * M/Y \quad (13)$$

S<sub>0</sub> = Konzentration von BVS im Zufluss [g<sub>OTM</sub> L<sup>-1</sup>]

S = Konzentration von BVS im Fermenter [g<sub>OTM</sub> L<sup>-1</sup>]

θ = Verweilzeit [Tage]

μ = spezifische Wachstumsrate von Säure bildenden Bakterien [Tag<sup>-1</sup>]

M = Konzentration von Säure bildenden Bakterien [g L<sup>-1</sup>]

Y = Ausbeutekoeffizient von Säure bildenden Bakterien [g g<sub>BVS</sub><sup>-1</sup>]

t = Zeit [Tage]

$$dA_C/dt = (A_{C0} - A_C)/\theta - \mu * M/Y * (1 - Y) - \mu_c * M_c/Y_C \quad (14)$$

A<sub>C0</sub> = Konzentration von VFA im Zulauf [g<sub>VFA</sub> L<sup>-1</sup>]

A<sub>C</sub> = Konzentration von VFA im Fermenter [g<sub>VFA</sub> L<sup>-1</sup>]

μ = spezifische Wachstumsrate von Methan bildenden Bakterien [Tag<sup>-1</sup>]

M<sub>C</sub> = Konzentration an Methan bildenden Bakterien [g L<sup>-1</sup>]

Y<sub>C</sub> = Ausbeutekoeffizient von Methan bildenden Bakterien [g g<sub>VFA</sub><sup>-1</sup>]

- 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

$$dM/dt = (\mu - K_d - 1/\theta) * M \quad (15)$$

$K_d$  = spezifische Sterberate von Säure bildenden Bakterien [ $\text{Tag}^{-1}$ ]

$$dM_c/dt = (\mu_c - K_{dc} - 1/\theta) * M_c \quad (16)$$

$K_{dc}$  = spezifische Sterberate von Methan bildenden Bakterien [ $\text{Tag}^{-1}$ ]

$$\mu = \mu_{\max} [1 / (K_s/S + 1 + AC/K_i)] \quad (17)$$

$\mu_{\max}$  = maximale spezifische Wachstumsrate von Säure bildenden Bakterien [ $\text{Tag}^{-1}$ ]

$K_s$  = Monod Sättigungskonstante [ $\text{g}_{\text{BVS}} \text{L}^{-1}$ ]

$K_i$  = VFA Inhibierungskoeffizient für Säurebildner [ $\text{g}_{\text{VFA}} \text{L}^{-1}$ ]

$$\mu_c = \mu_{\text{cmax}} [1 / (K_{sc}/AC + 1 + AC/K_{ic})] \quad (18)$$

$\mu_{\text{cmax}}$  = maximale spezifische Wachstumsrate von Methan bildenden Bakterien [ $\text{Tag}^{-1}$ ]

$K_{sc}$  = Monod Sättigungskonstante [ $\text{g}_{\text{VFA}} \text{L}^{-1}$ ]

$K_{ic}$  = Inhibierungskoeffizient für Methanogene [ $\text{g}_{\text{VFA}} \text{L}^{-1}$ ]

Die für die Berechnung notwendigen acht kinetischen Parameter sowie die zwei Ausbeutekoeffizienten werden ebenfalls von Hill vorgeschlagen und sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

**Tabelle 17 Simulationskonstanten des mathematischen Modells nach Hill**

Parameter	Wert
$\mu_m$	dt
$\mu_{mc}$	dt
$K_d$	$0,1 * \mu_m$
$K_{dc}$	$0,1 * \mu_{mc}$
$K_s$	9,0
$K_{sc}$	2,0
$K_i$	12,0
$K_{ic}$	6,0
Y	0,1
$Y_c$	0,005

## 5.2 Laborversuche zur Verwertung von Weizenstroh

Um eine lückenlose Bilanzierung einer kombinierten Bioethanol- und Biogasanlage möglich zu machen wurde der gesamte Prozess im Labor nachgestellt. Als Substrat diente Weizenstroh aus dem Bezirk Kirchdorf, Oberösterreich. Das Stroh wurde bis zum Einsatz im Labor in quadratischen Ballen ( $L \times W \times H = 800 \times 500 \times 350$  mm) in einer Garage trocken gelagert. Als ersten Behandlungsschritt im Labor wurde das Stroh mit einem handelsüblichen Gartenhäcksler zerkleinert. Daraus ergab sich eine ungefähre Reduktion der Halmlänge auf zirka 0,5-4 cm. Danach erfolgte Vorbehandlung, Hydrolyse und Fermentation, die Durchführung wird nachfolgend beschrieben.

### 5.2.1 Vorbehandlung

Die Vorbehandlung des Weizenstrohs erfolgte im Rahmen dieser Arbeit in einer diskontinuierlichen Steam-Explosion-Anlage an der Fachhochschule Wels, Österreich. Ein Foto sowie eine Anlagenskizze befinden sich in Abbildung 34 und 35

Kernstück der Anlage ist ein 15 L Druckkessel. Für die Versuche wurde der Druckkessel mit 900 g gehäckseltem Stroh eingeweicht in 900 mL Wasser befüllt. Es erfolgte die Erhitzung auf die gewünschte Vorbehandlungstemperatur über die Zugabe von Sattdampf direkt in den Kessel und in die Mantelheizung. Nach der gewünschten Vorbehandlungsdauer kam es zur Öffnung des am Kesselbodens befindlichen Kugelventils und dadurch zur schlagartigen Druckminderung im Gefäß. Aufgrund dieser plötzlichen Druckänderung wurde das Stroh-Wassergemisch vom Druckkessel über die Rohrleitung in den Auffangbehälter gedrückt. Die dabei entweichende Dampfphase wurde nicht auskondensiert sondern ging verloren.

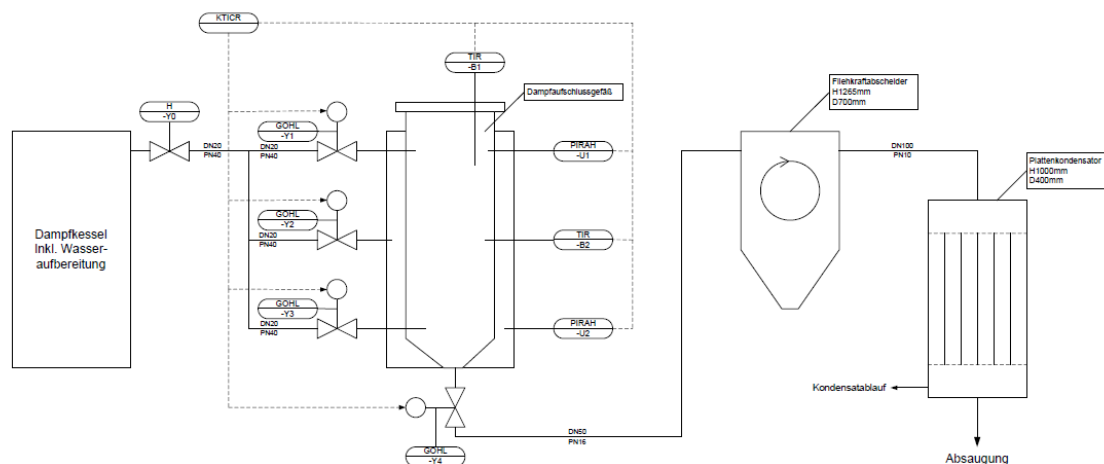
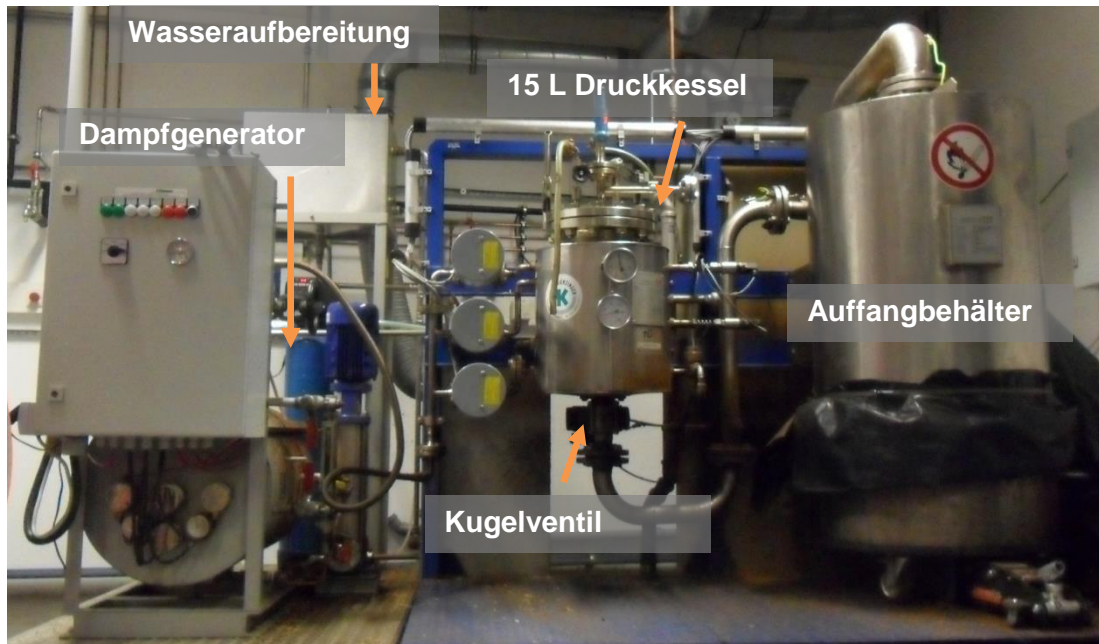


Abbildung 34 Anlagenskizze Batch-Steamplosionanlage der FH OOE Campus Wels  
Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 35** Foto von der Batch-Steamexplosionanlage der FH OOE Campus Wels  
*Quelle: eigene Darstellung*

### 5.2.2 Bestimmung des Massenverlustes während der Vorbehandlung

Die Thermodruckhydrolyse führt bei höheren Temperaturen und längeren Verweilzeiten zu einem Abbau der in der Biomasse vorhandenen Kohlenhydrate.

Der Massenverlust während der Vorbehandlung wurde durch Bilanzierung der Trockenmasse bestimmt. Die Masse des nassen vorbehandelten Strohs ( $FM_{BS}$ ) wurde direkt nach der Vorbehandlung mit einer Plattformwaage bestimmt. Ein Minimum von 1.000 g Stroh wurde im Ofen bei 40°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Der Trockenmassegehalt des vorbehandelten Strohs ( $TS_{BS}$ ) wurde bestimmt und die Gesamttrockenmasse nach der Vorbehandlung ( $TM_{BS}$ ) berechnet (Gleichung 19).

$$TM_{BS} = FM_{BS} \times TS_{BS} \quad (19)$$

Der Wiederfindungsgrad der Trockenmasse  $w_{TM}$  (Gleichung 20) und der Massenverlust  $MV$  (Gleichung 21) wurden basierend auf dem in der Steam-Explosion eingesetzten trockenen Strohs von 818 g berechnet.

$$w_{TM} = TM_{BS} / 818 \text{ g} \quad (20)$$

$$MV = 1 - w_{TM} \quad (21)$$

### 5.2.3 Verzuckerung

Die Gewinnung gelöster Zucker erfolgte im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich durch enzymatische Hydrolyse des vorbehandelten Weizenstrohs. Für die Verzuckerung wurde das kommerziell erhältliche Enzym Accellerase® 1500 der Firma Genencor eingesetzt. Das Stroh wurde vor der Verflüssigung weder gewaschen, noch getrocknet oder sterilisiert. Die genaue Durchführung erfolgte wie hier beschrieben: Nasses Stroh wurde auf Basis des Trockenmassegehaltes in 1000 mL Glasflaschen eingewogen. Im Versuch wurden 50 g Trockenmasse Stroh eingesetzt. Das nasse Stroh wurde mit Citratpuffer ( $c = 0,1 \text{ Mol L}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 5$ ) und 15 ml Enzym ( $47 \text{ FPU ml}^{-1}$ ) bis zum Erreichen einer Gesamtmasse von 500 g gemischt. Daraus resultiert eine Verzuckerung bei 10 m% Trockenmasse Stroh und einer Enzymbeladung von 14,1 FPU je Gramm trockene Biomasse. Die Flaschen wurden per Hand kräftig geschüttelt, sodass eine möglichst homogene Benetzung und Verteilung des Enzyms erreicht werden konnte. Anschließend wurden die Flaschen bei  $50^\circ\text{C}$  in einem Schüttelinkubator bei einer Frequenz von  $150 \text{ min}^{-1}$  für 72 h inkubiert. Falls notwendig wurde der pH-Wert nach 6 und/oder 24 Stunden mittels Natronlauge ( $c = 4 \text{ mol L}^{-1}$ ) eingestellt.

### 5.2.4 Fest/Flüssig Trennung

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Abtrennung der Feststoffe nach der Hydrolyse. Die notwendige Fest/Flüssig Trennung erfolgte mittels Vakuumfiltration, Filterpapier MN615  $4\text{-}12 \text{ }\mu\text{m}$  und Vakkum durch Wasserstrahlpumpe. Durch Waschen mit destilliertem Wasser wurde der feste Rückstand von Restzucker befreit. Dazu wurde der Filtrationskuchen mit dreifacher Menge destilliertem Wasser versetzt und über Nacht bei einer Frequenz von  $100 \text{ min}^{-1}$  bei Raumtemperatur geschüttelt. Die neuerlich notwendige Fest/Flüssig Trennung erfolgte ebenfalls durch Vakuumfiltration. Dieser Waschschrift war notwendig um den Feststoffes getrennt von der hydrolysierten Biomasse charakterisieren zu können. Dies gilt vor allem für ungelöste Kohlenhydrate und den ermittelten Biogasertrag.

### 5.2.5 Fermentation

Die Alkoholfermentation erfolgte anaerob mit kommerziell erhältlicher Bäckerhefe der Firma Ed. Haas Austria GmbH, Traun, Österreich. 100 mL Hydrolysat wurde mit 2 mL  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $c = 150 \text{ g L}^{-1}$ ), 2 mL  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ( $c = 143 \text{ g L}^{-1}$ ), 2 mL  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ( $c = 75 \text{ g L}^{-1}$ ) und 0.44 g  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  gemischt. Der pH Wert wurde mit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  auf pH 4,6

eingestellt. 7 g *Saccharomyces cerevisiae* wurden in 100 mL destilliertem Wasser gelöst und 30 min bei 30°C inkubiert. Anschließend erfolgte die Inokulation des Hydrolysates mit 2 mL der Hefesuspension. Die Fermentation erfolgte im Schüttelschrank bei einer Frequenz von 110 min<sup>-1</sup> bei 30°C für 168 Stunden.

### 5.3 Substratcharakterisierung

Für die verschiedenen durchgeführten Laborversuche kamen unterschiedliche Substrate zum Einsatz. Für die Bilanzierung von Versuchen ist eine Charakterisierung des Einsatzstoffes notwendig. Je nach Substrat und Fragestellung sind unterschiedliche Parameter zu bestimmen. In dieser Arbeit kamen die beiden Rohstoffe, Rindergülle und Weizenstroh zum Einsatz. Die beiden Stoffe wurden durch folgende Parameter charakterisiert.

Rindergülle: Trockenmasse, Organische Trockenmasse, chemischer Sauerstoffbedarf, FOS/TAC

Weizenstroh: Trockenmasse, Aschgehalt, säureunlösliches Lignin, Glucoseanteil, Xyloseanteil, Arabinoseanteil

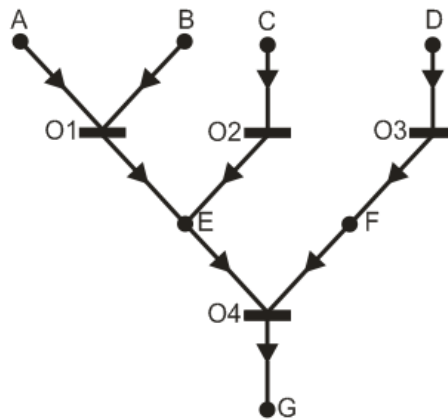
Die genauen Analysemethoden sind in Kapitel 5.6 beschrieben.

### 5.4 Energetische Prozessoptimierung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein relativ unkonventioneller Ansatz der energetischen Prozessoptimierung gewählt. Ausschlaggebend hierfür war, dass nicht ein Einzelprozess optimiert, sondern aus einer Vielzahl möglicher Prozessteilschritte objektiv ein Optimalprozess ermittelt werden sollte. Die Optimierung erfolgte dabei unter Zuhilfenahme des für die ökonomische Prozessbewertung entwickelten Optimierungstools Prozessnetzwerksynthese (PNS) [vgl. Narodoslowsky et al. 2008; Vance et al. 2013].

Am Beginn jedes Optimierungsprozesses mit PNS steht die Entwicklung einer sogenannten Maximalstruktur [vgl. Fiedler et al. 1995 S.1760]. Dabei werden alle im Prozess denkbaren Materialien und Technologien miteinander verknüpft. Nach kombinatorischen Regeln werden aus diesem P-Graph (Verschaltung von Materialien mit ihren möglichen Prozessen) alle real möglichen Lösungen gebildet [vgl. Friedler et al. 1993; Friedler et al. 1995; Friedler et al. 1998, Garcia-Ojeda et al. 2012] und eine Optimalstruktur (oder Lösungsstruktur) ermittelt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde als Optimalprozess eben jener Prozess mit der größten Energieausbeute definiert. Im p-

Graph werden Materialien als Punkte und Prozesseinheiten als horizontale Linien dargestellt. Abbildung 36 zeigt das Beispiel einer Maximalstruktur als P-Graph dargestellt. Die einzelnen Prozesse zur Produktion von Produkt G können je nach Rahmenbedingungen individuell oder simultan durchgeführt werden. Die Optimalstruktur ist dabei von Rohstoff- und Prozesskosten aber auch von der nutzbaren Rohstoffmenge und der notwendigen Produktmenge abhängig.



**Abbildung 36: Darstellung einer Maximalstruktur zur Produktion von Produkt G als P-Graph**  
*Quelle: [http://www.p-graph.com/wiki/index.php/How\\_to\\_define\\_desing\\_alternatives](http://www.p-graph.com/wiki/index.php/How_to_define_desing_alternatives)*

Allen Materialien und Prozessen werden in der Datenerhebung Kosten und Erlöse zugeordnet. Da diese Arbeit nicht auf eine ökonomische sondern eine energetische Prozessoptimierung abzielte wurde nur die gewonnene Energie monetär bewertet. Limitiert wurde der für den Prozess zur Verfügung stehende Rohstoff.

## 5.5 Ökologische Prozessbewertung

Die Ökologische Prozessbewertung wurde in dieser Arbeit als Ökobilanz unter Anwendung des Sustainable Process Index (SPI) durchgeführt.

Der Sustainable Process Index wurde speziell für die Bewertung von Prozessen durch Verfahrenstechniker entwickelt. Mit ihm ist eine Bewertung bereits in frühen Phasen der Prozessentwicklung möglich [vgl. Narodoslowsky und Krotschek 2000; Narodoslowsky und Krotschek 2004]

Die Bewertungseinheit des SPI ist die Fläche. Ausschlaggebend für diese Bewertungsgröße ist die Tatsache, dass langfristig nur die auf die Fläche einwirkende Sonnenenergie nachhaltig genutzt werden kann. Außerdem ist Fläche ein begrenztes Gut welches nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ Einfluss auf unsere Gesellschaft hat. Nur eine „gesunde“ Erde garantiert gute Fruchtbarkeit und dadurch

unser Überleben. Schadstoffe können also nur in limitierter Menge in die Erde eingebracht und Nährstoffe nur begrenzt aus dieser entfernt werden [vgl. Krotschek und Narodoslowsky 1996; Narodoslowsky und Krotschek 2000; Narodoslowsky und Krotschek 2004]. Ähnliches gilt für die Kompartimente Wasser und Luft. Ermittelt werden also Emission in Erde, Wasser und Luft, welche dabei in Fläche umzurechnen sind. Ebenfalls ermittelt und in eine Flächeneinheit abstrahiert werden die für den Prozess notwendigen Ressourcen. Bei dieser Methode werden die Stoff und Energieflüsse der Sachbilanz dabei nach 2 Prinzipien der verbrauchten Fläche zugeordnet:

**Prinzip 1:** *„Anthropogene Massenflüsse dürfen globale Materialzyklen nichtverändern. Der Referenzwert für globale Zyklen (z.B.: globaler Kohlenstoffkreislauf) ist die Rückflussrate zum jeweiligen Langzeitspeicher. Menschliche Aktivitäten müssen sich an diese Flussraten anpassen um eine nachhaltige Wirtschaftsweise zu garantieren.*

**Prinzip 2:** *Anthropogene Massenflüsse dürfen die Qualität lokaler Umweltkompartimente nicht verändern. Der SPI definiert die erlaubte Dissipationsrate für Stoffflüsse in die Natur basierend auf natürlich Qualitäten von Kompartimenten und deren Erneuerungsraten.“* [spionweb.tugraz.at/de/spi]

Die Berechnung des SPI beginnt mit der Ermittlung der vom Prozess verbrauchten Gesamtfläche  $A_{tot}$ . Diese setzt sich aus den Teilflächen Rohstoffproduktion, Energiebereitstellung, Infrastruktur, Arbeitskräfte und Dissipation von Emissionen in Luft, Wasser und Boden zusammen. Dividiert durch die Produktionseinheiten der Anlage erhält man die spezifische verbrauchte Fläche je Produktionseinheit. Der SPI wiederum ist das Verhältnis dieses spezifischen Flächenverbrauches und der je Einwohner zur Verfügung stehenden Fläche in der für den Prozess relevanten Region. Der SPI gibt also an wieviel Fläche, die einem Einwohner bei einer nachhaltigen Lebensweise zur Verfügung steht, durch die Bereitstellung dieses Produktes verbraucht wird [vgl. Krotschek und Narodoslowsky 1996].

Eine ökologische Prozessbewertung wurde in Rahmen dieser Arbeit für einen noch nicht existierenden Prozess angewendet. Die in der Sachbilanz zu ermittelten Stoff und Energieflüsse wurden daher durch Annahmen und auf Grundlage von Literaturwerten festgelegt.



Die Implementierung der Prozesse und Ermittlung des SPI erfolgte mittels online-Tool SPIONWeb (spionweb.tugraz.at). Als Region wurde in dieser Bewertung Österreich festgelegt.

## **5.6 Analytik und sonstige Methoden**

### **5.6.1 Bestimmung von Trockenmasse- und organischem Trockenmassegehalt**

Trockenmasse (TM) und organische Trockenmasse (OTM) wurden nach DIN 38414-2:1985-11 und DIN 38414-3:1985-11 oder mittels thermogravimetrischer Waage bestimmt. Die Feuchtigkeitswaage (Ohaus MB 45) wurde ausschließlich für die Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Stroh, Strohhydrolysat und Hydrolysepresskuchen verwendet. Die Genauigkeit dieser Methode für diese Materialien wurde vorher durch einen Vergleich mit der Standardmethode bestimmt.

Für die Standardmethode wurden bis zur Gewichtskonstanz geglühte Porzellantiegel zur Hälfte mit nasser Probe befüllt. Die Tiegel wurden bei 105°C im Trockenschrank über Nacht und mindestens bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die im Exsikkator abgekühlten trockenen Proben wurden gewogen und anschließend im Muffelofen bei 550°C bis zur Gewichtskonstanz geglüht. Der Trockenmassegehalt und die organische Trockenmasse wurden rechnerisch ermittelt.

### **5.6.2 Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfes**

Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) wurde nach DIN ISO 15705:2003-09 in selbst hergestellten Küvettentests bestimmt. Mit Kaliumhydrogenphthalat wurde eine Standardgerade ermittelt. Unbekannte Proben wurden anhand dieser Standardgerade ausgewertet. Auf eine ausreichende Verdünnung der Proben war aufgrund einer starken Eigenfärbung zu achten.

### **5.6.3 Bestimmung des pH-Wertes**

Der pH-Wert flüssiger Proben wurde mittels pH-Meter Mettler Toledo SevenMulti™ und der Sonde InLab® Expert bestimmt.

### **5.6.4 Bestimmung des FOS/TAC Wertes**

Die Bestimmung flüchtiger organischer Säuren (FOS) sowie totaler anorganischer Carbonate (TAC) erfolgte nach der Nordmann Titrationsmethode unter Zuhilfenahme des Titrators DL50 Graphix (Mettler-Toledo AG) und der pH Elektrode DG 111-SC.

#### - 4. Allgemeine Grundlagen der Biogas- und Bioethanolerzeugung -

Zirka 10 g Probe (unfiltriert und unzentrifugiert) wurden in ein 100 mL Becherglas eingewogen und mit destilliertem Wasser auf eine Gesamtmasse von 50 g verdünnt. Die verdünnte Probe wurde zur Bestimmung des TAC mit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $c = 0.05 \text{ mol L}^{-1}$ ) bis zu einem pH Wert von 5 titriert. Die Titration mit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $c = 0.05 \text{ mol L}^{-1}$ ) bis pH 4,4 erfolgte zur Bestimmung des FOS.

##### **5.6.5 Bestimmung von organischen Säuren und Zuckern**

Die Bestimmung organischer Säuren und Zucker erfolgte mittels High Performance Liquid Chromatography (HPLC). Die Analyse wurde auf dem HPLC-System Agilent Technologies 1200 Series mit einer Varian Metacarb 87 H Säule bei  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  with  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $c = 5 \text{ mmol L}^{-1}$ ) als Eluent und einer Flussrate von  $0.8 \text{ mL min}^{-1}$  durchgeführt. Die Detektion erfolgte mittels UV-Detektor bei 210 nm und RI-Detektor. Mannose, Galactose, Fructose und Xylose konnten in diesem System nicht voneinander getrennt werden. Es erfolgte die gemeinsame Bestimmung dieser Zucker als Sammelfraktion. Diese Sammelfraktion wird in dieser Arbeit als Xylose bezeichnet. Diese Vereinfachung wird als zulässig eingestuft, da Xylose die Hauptfraktion von Hemicellulose ist.

##### **5.6.6 Bestimmung von Kohlenhydraten und Lignin in Biomasse**

###### **5.6.6.1 Material und Reagenzien**

- Kulturröhrchen mit Schraubverschluss und Gummidichtung 12x100 mm
- Filtertiegel Porosität 2 incl. Kieselgur gewichtskonstant gegläht
- Wasserbad
- 100 mL Glasflasche mit Schraubverschluss, autoklavierbar
- Diverse Pipetten
- Vakuumfiltriereinheit
- pH-Meter
- Autosampler Vials mit Gummidichtung
- Autoklav
- Schwefelsäure 72% m/m
- Calciumcarbonat
- VE Wasser (Deionat)
- Zuckerstandards für die Analyse

#### 5.6.6.2 Durchführung

Die Bestimmung von Strukturkohlenhydraten der Biomasse wurde mittels saurer Hydrolyse nach NREL Methode NREL/TP-510-42618 [vgl Sluiter et al. 2011] durchgeführt. Für die Analyse wurden die Proben getrocknet und mittels Kugelmühle gemahlen. 300 mg  $\pm$  10 mg der konditionierten Probe wurden in Kulturröhrchen eingewogen und mit 3 mL  $\pm$  0,1 mL 72 % iger Schwefelsäure benetzt. Durch kräftiges Schütteln wurde eine vollständige Benetzung des Probenmaterials mit Säure gewährleistet. Die Proben wurden 60 min bei 30°C im Wasserbad inkubiert wobei alle 10 min manuell geschüttelt wurde. Nach der Inkubation wurden die Proben durch die Zugabe von 84 mL VE-Wasser auf eine Schwefelsäurekonzentration von 4 % verdünnt. Die Zugabe des Wassers erfolgte während gleichzeitiger Überführung des Probenmaterials von der Epruvette in eine 100 mL Laborglasflasche. Nach der Verdünnung und Überführung wurden die Probenflaschen geschüttelt um eine gleichmäßige Säurekonzentration zu gewährleisten. Anschließend wurden die Proben eine Stunde bei 121°C autoklaviert. Für die Ermittlung des säureunlöslichen Lignins wurden die Proben durch die geglühten Filtertiegel unter Vakuum abfiltriert. Etwa 20 mL des Filtrats wurden für die weitere Bearbeitung und anschließende Analyse der Kohlenhydrate in ein 50 mL Becherglas überführt. Der im Tiegel verbleibende Filterkuchen wurde mehrmals mit heißem VE-Wasser gewaschen und anschließend im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach der Ermittlung des Gewichts der trockenen Probe wurden die Tiegel bei 550°C für 24 h geglüht. Über diese gravimetrische Methode erfolgte die Bestimmung des säureunlöslichen Lignins.

Für die Bestimmung der Kohlenhydrate restlichen wurde das Filtrat mittels Calciumcarbonat auf einen pH-Wert von 5-6 neutralisiert. Anschließend wurden Partikeln in der Probe mittels Zentrifuge für die HPLC-Analyse entfernt. Die Bestimmung der Kohlenhydrate erfolgte mittels HPLC nach der unter Kapitel 5.6.5 beschriebenen Methode.

## **6 Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger**

Aus dem bereits genannten Gründen ist die Biomassenutzung ein wichtiges Puzzlestück für die nachhaltige Entwicklung unserer Gesellschaft. Auch tierische Exkremente, in dieser Arbeit Wirtschaftsdünger genannt, sind Biomasse, welche einer maximalen

Nutzung zugeführt werden sollen. Für tierische Exkreme te derzeit kaum andere Nutzung als die energetische Verwertung und die Nutzung als Dünger bekannt. Auch die Verwertung als Futtermittel ist möglich in Europa allerdings gegenwärtig nicht erlaubt [vgl. Poore et al. 2007; VERORDNUNG (EG) Nr. 956/2008].

Von Lebewesen wird über die Nahrung Energie in Form von Biomasse aufgenommen. Nicht verwertete Energie wird als Exkreme te wieder ausgeschieden. Ohne menschliches Zutun wird diese Biomasse als Teil des Kohlenstoffzyklus durch Mikroorganismen weiter abgebaut. Dabei wird die in der Biomasse gebundene Energie wieder frei und an die Umgebung als Wärme oder Methan abgegeben [vgl. Smith und Smith, S.583]. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist es anzustreben, diese Energie in eine vom Menschen nutzbare Form umzuwandeln. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Verwertung als Dünger daneben weiterhin bestehen bleibt.

Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines Anlagenkonzeptes für die energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger. Dabei wird im Speziellen auf die österreichischen landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen eingegangen. Um die Nachhaltigkeit des Prozesses gewährleisten zu können wurde zu Beginn der Status quo der Energieerzeugung aus tierischen Exkrementen, sowie Chancen und Risiken einer intensiven Nutzung diskutiert. Es wurde darüber hinaus ein Exkurs zur Wirtschaftsdüngernutzung in anderen Ländern vorgenommen und die sich ergebenden Unterschiede zu Österreich diskutiert. Für die Konzeptionierung der Anlage wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen und fehlende Literaturdaten mit eigenen Laborversuchen ergänzt. Abschließend wurde das entworfene System mittels Ökobilanz im Vergleich zur gängigen Praxis bewertet.

## **6.1 Allgemeine Grundlagen**

Je nach Betriebsführung fallen tierische Exkreme te in unterschiedlichen Formen an. Bei der energetischen Verwertung ist diese Unterscheidung wichtig, da für die verschiedenen Kategorien unterschiedliche Prozesse einzusetzen sind.

Tierische Ausscheidungen lassen sich in die Kategorien Flüssig- und Festmist einteilen.

- Festmist besteht vorrangig aus Kot und Einstreu sowie geringen Anteilen an Harn. Die Eigenschaften des Festmistes hängen von seiner Zusammensetzung, Lagerung und Aufbereitung ab. Dabei unterscheidet man zwischen Frischmist,

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Stapelmist, Rottemist, Stallmistkompost, Gärmist und Tiefstallmist [vgl. Galler 2009, S.5]

- Flüssigmist umfasst die Mistarten Jauche und Gülle.
  - Gülle ist das anfallende Gesamtgemisch aus Kot und Harn und Einstreu [vgl. Galler 2009, S.5]. Der Nährstoffgehalt hängt von der Fütterung, der Tierart und der Lagerung ab [vgl. Wendland]. Der Stickstoff in der Gülle wird aufgrund einer während der Lagerung stattfindenden Gärung zu großen Teilen in Ammonium umgewandelt, welches zwar pflanzenverfügbar aber im Boden nicht mobil ist [vgl. Camberato, S.3].
  - Jauche ist der Harnanteil der Exkreme welche nicht von der Einstreu aufgenommen wurde. Oftmals wird in die Jauchegrube auch das Sickerwasser des Festmistes eingeleitet. Bei der Lagerung wird der Harnstoff in der Jauche in Ammoniak umgewandelt.

Festmist hat einen deutlich höheren Trockenmassegehalt und ein deutlich größeres C/N Verhältnis als Gülle. Der Anteil organisch gebundenen Stickstoffes ist in Festmist deutlich höher. Jedoch beeinflusst die Lagerungsdauer des Festmistes die N-Freisetzung maßgeblich. Oftmals werden Teile des Festmistes in der Jauchegrube vor der Ausbringung eingemischt [vgl. Galler 2009, S.13]

Tierische Exkreme werden heute fast ausschließlich als Dünger auf Wiesen und Feldern eingesetzt. Sie können somit unter dem Begriff Wirtschaftsdünger subsumiert werden.

Wirtschaftsdünger ist nach Düngemittelgesetz 1994 wie folgt definiert:

*§1 (2) Zu den Düngemitteln gehören auch Wirtschaftsdünger, das sind tierische Ausscheidungen, Stallmist, Gülle und Jauche sowie Stroh und ähnliche Reststoffe aus der pflanzlichen Produktion, denen keine Nährstoffe zugesetzt wurden und auf welche die Begriffsbestimmung des Abs. 1 zutrifft. Bearbeitete Wirtschaftsdünger sind Wirtschaftsdünger, die durch chemische oder technische Verfahren oder Kompostierung verändert wurden. Das Verdünnen mit Wasser, das Belüften, das Durchmischen sowie das mechanische Zerkleinern gelten nicht als Bearbeitung. Den Wirtschaftsdüngern gleichgestellt sind unbehandelte Rinden, die zur sachgerechten Düngung auf forstlich genutzten Böden bestimmt sind.* “ [§1 Abs(2) DMG 1994]

Die Definition landwirtschaftlicher Reststoffe als Wirtschaftsdünger ermöglicht daher eine Verwertung außerhalb des Abfallwirtschaftsgesetzes (§2 Abs. 3 AWG). In dieser Arbeit sind, bei der Verwendung des Wortes Wirtschaftsdünger in diesem Kapitel ausschließlich tierische Ausscheidungen gemeint.

## 6.2 Status quo der Wirtschaftsdüngerverwertung in Österreich

Um für Österreich eine optimales Konzept zur energetischen Verwertung von Wirtschaftsdünger ausarbeiten zu können müssen die Rahmenbedingungen bekannt sein. Nur wenn ausreichend Information über das Potential, die Rohstoffbeschaffenheit, zu erwartende Kosten, Transportwege, alternative Nutzungsformen und ähnliches vorhanden sind kann eine zielgerichtete Entwicklung erfolgen. Aus diesem Grund wurden zum einen die landwirtschaftliche Struktur der Viehhaltung und zum anderen die derzeitige Praxis der Wirtschaftsdüngerverwertung untersucht.

### 6.2.1 Ermittlung österreichischen landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen

Um den Untersuchungsrahmen geringfügig einzuschränken wurde die Analyse auf Rinder und Schweinebetriebe eingeschränkt. Ermittelt wurde die Anzahl der Tiere je Halter, die anfallende Wirtschaftsdüngermenge sowie regionale Viehdichten.

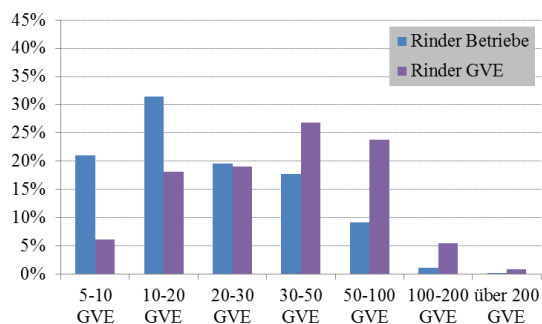
**Tabelle 18 Anzahl der Rinder je Betrieb sortiert nach Betriebsgrößenklassen**  
Quelle: eigene Darstellung nach bmlfuw 2014

	Rinder				Schweine			
	Betriebe		Rinder-GVE		Betriebe		Schweine-GVE	
0-5 GVE	8.490		26.500		18.446		10.646	
5-10 GVE	11.941	21,04%	87.634	6,12%	1.009	13,38%	7.402	2,22%
10-20 GVE	17.820	31,40%	259.294	18,11%	1.305	17,30%	19.159	5,74%
20-30 GVE	11.095	19,55%	272.167	19,01%	973	12,90%	24.090	7,22%
30-50 GVE	10.060	17,72%	383.523	26,78%	1.629	21,60%	63.690	19,09%
50-100 GVE	5.173	9,11%	339.765	23,73%	2.091	27,72%	147.075	44,09%
100-200 GVE	627	1,10%	78.399	5,47%	513	6,80%	64.325	19,28%
über 200 GVE	41	0,07%	11.235	0,78%	23	0,30%	7.858	2,36%
Summe	56.757		1.432.017		7.543		333.599	

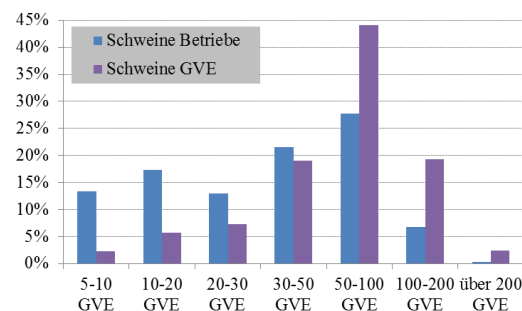
## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Die Anzahl der Tiere je Betrieb wurden dem grünen Bericht der österreichischen Landwirtschaftskammer entnommen [vgl. bmflw 2014]. Die genauen Zahlen sind in Tabelle 18 aufgelistet. Für die Charakterisierung der Betriebsgrößenverteilung wurden Betriebe mit Beständen kleiner fünf GVE in Berechnungen nicht berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass diese Tiere lediglich der Eigenversorgung dienen und für die Charakterisierung des durchschnittlichen österreichischen Viehbauern das Bild verzerren würden. Aus den Zahlen ergibt sich eine durchschnittliche Betriebsgröße bei Rindern von 25,23 GVE und 44,23 GVE bei Schweinen.

Beobachtet man die prozentuelle Verteilung der GVE der letzten Jahre, ist ersichtlich, dass auch in Österreich der Trend zu immer weniger Betrieben mit größeren Bestandszahlen zu beobachten ist. Insgesamt sind die Bestandszahlen leicht rückläufig [vgl. bmflw 2010-2014]. Die Größenverteilung der Betriebe bei Rindern und Schweinen ist in Abbildung 37 und 29 dargestellt.



**Abbildung 37 Vergleich der Verteilung von Betrieben und GVE in Abhängigkeit des Viehbestandes bei Rindern**



**Abbildung 38 Vergleich der Verteilung von Betrieben und GVE in Abhängigkeit des Viehbestandes Schweinen**

Zur Ermittlung der anfallenden Wirtschaftsdüngermenge wurden die Tierkategorien Rind und Schwein noch weiter unterteilt und anfallende Mengen Flüssigmist ermittelt. Für die Berücksichtigung der anfallenden Mistmengen in fester und flüssiger Form wurde auf Daten der Universität für Bodenkultur zurückgegriffen [vgl. Amon et al. 2007].

Aus den erhobenen Daten ergeben sich die in den Tabellen 19 und 20 angegebenen jährlichen Mistmengen je GVE. Bei Rindern fällt, berechnet aus diesen Zahlen, jährliche eine Güllemenge von 9.872.340 m<sup>3</sup> an, was im Durchschnitt eine Güllemenge von 20,7 m<sup>3</sup> je GVE ergibt. Bei Schweinen erhält man eine jährliche Güllemenge von 3.460.568 m<sup>3</sup> und eine durchschnittliche Güllemenge von 11,0 m<sup>3</sup> pro GVE.

**Tabelle 19 Berechnung der anfallenden Flüssigmistmenge je GVE bei Rindern**

*Quelle: eigene Darstellung nach bmfluw 2014*

	Vieh- bestand	GVE- Schlüssel	GVE- Bestand	Anteil Flüssig- mist	jährl. Gülle je Tier [m <sup>3</sup> ]	jährl. Gülle je GVE [m <sup>3</sup> ]
Milchkühe	529.560	1	527.393	39,6%	24	24,0
Kälber	626.970	0,4	249.346	20,0%	4,7	11,8
Stiere und Ochsen 1-2 Jahre	164.240	0,6	97.751	51,7%	11,6	19,3
Jungvieh 1-2 Jahre	79.306	0,6	49.711	33,3%	11,6	19,3
Zuchtkälber	191.002	0,6	110.496	36,8%	11,6	19,3
Stiere und Ochsen >2 Jahre	16.330	1	17.176	29,4%	14,2	14,2
Rinder > 2 Jahre	95.457	1	101.000	37,8%	15,4	15,4
Mutterkühe	255.417	1	277.664	24,4%	22,6	22,6
<i>Sum</i>	<i>1.958.282</i>		<i>1.674.229</i>			

**Tabelle 20 Berechnung der anfallenden Flüssigmistmenge je GVE bei Schweinen**

*Quelle: eigene Darstellung nach bmfluw 2014*

	Vieh- bestand	GVE- Schlüssel	GVE- Bestand	Anteil Flüssig- -mist	jährl. Gülle je Tier [m <sup>3</sup> ]	jährl. Gülle je GVE [m <sup>3</sup> ]
Ferkel bis 20kg	684.606	0,02	13.692	65,5%	0,60	30,0
Jungschweine 20-50kg	785.457	0,15	117.819	87,0%	1,40	9,3
Mastschweine > 50kg	1.171.405	0,15	175.711	89,8%	1,40	9,3
Zuchtsauen	249.850	0,3	74.955	59,4%	5,10	17,0
Zuchteber	4.523	0,3	1.357	25,5%	5,10	17,0
<i>Summe</i>	<i>2.895.841</i>		<i>383.533</i>			

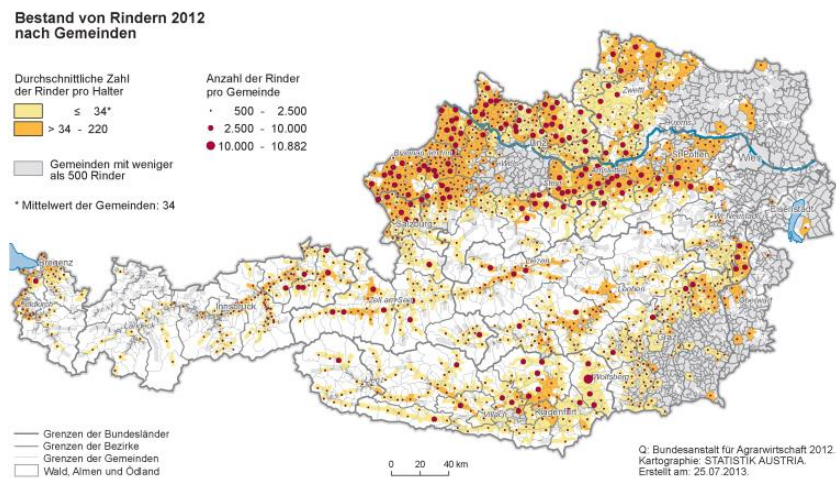
Für Rinder wurde außerdem eine Weideperiode von 6 Monaten mit täglich 10 h seitens der Autorin angenommen. Die durchschnittliche Güllemenge reduziert sich dadurch auf 16.4 m<sup>3</sup> je GVE.

Um in der Verfahrensentwicklung auch notwendige Transportwege und Strategien für eine optimale Verwertung des Gases berücksichtigen zu können wurde außerdem die geografische Verteilung der Viehbetriebe betrachtet. In Abbildung 39 und Abbildung 40 werden die Viehdichten je Gemeinde wie von der Statistik Austria erhoben gezeigt [vgl Statistik Austria 2012<sup>b</sup>]. Zu erkennen sind vor allem in der Schweinehaltung die Ballungszentren in der Südsteiermark sowie in Ober- und Niederösterreich.



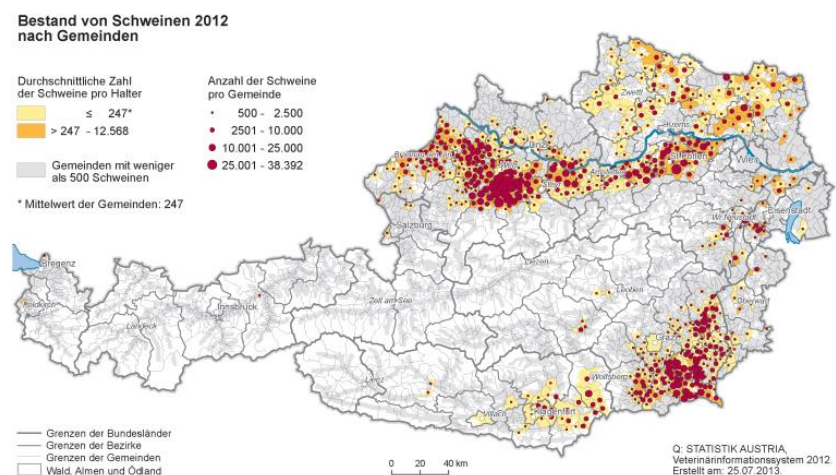
## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Um die minimalen Transportwege für die Vergärung der gesamten Gülle in einer viehrefeichen Region zu ermitteln wurde folgende Überlegungen angestellt:



**Abbildung 39** Statistische Karte des Rinderbestandes nach Gemeinden

Quelle: statistik Austria 2012<sup>b</sup>



**Abbildung 40** Statistische Karte des Schweinebestandes nach Gemeinden

Quelle: statistik Austria 2012<sup>b</sup>

In viehdichten Gemeinden sind zirka 10.400 Rinder (~ 10.400 GVE) und 31.700 Schweine (~ 6.340 GVE) registriert. Bei einem GVE Besatz von 1,5 GVE/ha [vgl. bmlfuw 2013<sup>b</sup>, S.21] in diesen Regionen errechnet sich eine Gemeindefläche von 6.933 ha. Nimmt man nun eine mittlere Bestandszahl von 70 GVE je Halter an, sind auf diesen 6.933 ha 149 Betriebe angesiedelt. Angenommen die gesamte Gülle würde in 3 zentralen Anlagen verwertet werden, sind nach Berechnungen wie in Kapitel 6.6.4.1 beschrieben pro landwirtschaftlichen Betrieb 4,7 km Fahrweg zurück zu legen. Auf den ökonomischen wie auch auf den ökologischen Einfluss des Transports von Gülle wird in den Kapiteln 6.6.4.1 und 6.7.6 näher eingegangen.

### **6.2.2 Stand der Technik beim Wirtschaftsdüngermanagement**

Um Einflüsse hinsichtlich einer Systemänderung bewerten zu können muss der derzeitige Stand der Verarbeitung ermittelt werden. Da tierische Exkreme in Österreich fast ausschließlich als Wirtschaftsdünger verarbeitet werden, wurde die gängige Praxis und der Stand der Technik in diesem Bereich erhoben.

Beim Wirtschaftsdüngermanagement sind zwei wichtige Teilabschnitte zu unterscheiden. Die Lagerung des Düngers und die Ausbringung. Veränderungen in beiden Abschnitten sind maßgeblich für die Düngequalität und die anfallenden Emissionen verantwortlich. Die wichtigsten Emissionen im Wirtschaftsdüngermanagement sind Methan, Lachgas und Ammoniak [vgl. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft 2003]. Vor allem Stickstoffemissionen in Form von Lachgas und Ammoniak bringen nicht nur negative ökologische Auswirkungen mit sich sondern reduzieren außerdem den Düngewert des Mistes. Die Lagerung und Ausbringung mit emissionsarmen Technologien ist anzustreben [vgl. Pöllinger 2011].

Zuerst muss unterschieden werden in welcher Form der Mist am Betrieb anfällt. Aus den Daten in Tabelle 19 und 20 kann entnommen werden, dass ein Großteil der Schweine, nämlich 86 % aber nur ein geringer Teil der Rinder (=34 %) mit Flüssigmistsystem gehalten wird.

Für alle Mistarten gilt, dass Witterungsbedingungen einen großen Einfluss auf die anfallenden Emissionen haben. Geringe Außentemperaturen verringern die Aktivität der Biomasse abbauenden Bakterien und dadurch die Methan- und N-Verluste [vgl. Dustan 2002, S.22; Leick 2003, S.106]. Dies gilt sowohl für die Lagerung wie auch für die Ausbringung. Bei der Ausbringung kann außerdem darauf geachtet werden, dass die Infiltration des Düngers in den Boden erleichtert wird [vgl. Pöllinger 2011, S.10]. Durch Regen werden die Nährstoffe in den Boden gewaschen. Für eine verlustarme Ausbringung ist der optimale Zeitpunkt ein kühler Tag mit leichtem Regen und Windstille [vgl. Pöllinger 2013, Folie 8].

Für die Lagerung und Ausbringung von Festmist sind neben den Witterungsbedingungen nur wenige Einwirkungsmöglichkeiten bekannt. Festmist wird in der Regel als Misthaufen gelagert und mittels Miststreuer auf Feld oder Wiese ausgebracht. Lediglich eine rasche Bodenbearbeitung nach der Ausbringung kann helfen die Emissionen zu reduzieren [vgl. Galler 2009, s.30].

Bei der Lagerung von Flüssigmist kann Emissionen durch die Abdeckung der Grube entgegen gewirkt werden. In Österreich war bereits im Jahr 2007 bei 87 % der Gruben eine feste Abdeckung vorhanden [vgl. Amon et al. 2007, S.56]. Weitere Möglichkeiten zur Emissionsreduktion während der Flüssigmistlagerung sind Abdeckung mit natürlicher oder künstlicher Schwimmschicht, Belüftung, Zusätze und die Vergasung in Biogasanlagen [vgl. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft 2003, S.18; Amon et al. 2006].

Bei der Ausbringung von Flüssigmist sind sowohl unterschiedliche Technologien des Transportes wie auch der Verteilung bekannt. Für den Transport unterscheidet man Gülleverschlauchung und den Transport mit Traktor und Vakuumfass. Auf die verschiedenen Transportsysteme für Gülle wird im nachfolgenden Kapitel 5.2.3 genauer eingegangen. Für die Verteilung sind verschiedene Systeme bekannt die nachfolgend aufgezählt und deren Vor- und Nachteile sowie die ökologischen Auswirkungen kurz beschrieben werden.

- **Breitverteiler**

Als Referenzsystem, aufgrund seiner weiten Verbreitung, gilt die Ausbringung von Flüssigmist mit Breitverteiler. Menden et al. schreiben dazu in ihrem Bericht:

*„Bei diesen Verteilern wird die Gülle mit Hilfe von Pralltellern, Prallköpfen, Schwenkdüsen oder Düsenbalken nach unten abgestrahlt und breitflächig, bei maximal 12 m Arbeitsbreite, auf die Pflanzen beziehungsweise die Bodenoberfläche verteilt. Bei der Breitverteilung ergibt sich unmittelbar beim Verteilungsvorgang eine große Kontaktfläche zwischen dem Flüssigmist und der Umgebungsluft mit der Konsequenz einer relativ hohen NH<sub>3</sub>-Freisetzung. Untersuchungen zeigen, dass direkt beim Verteilvorgang NH<sub>3</sub>-Verluste von durchschnittlich 5 % (UBA 1994) der applizierten Ammoniummenge auftreten können. Durch Wind wird die Verteilgenauigkeit dieses Verteilsystems stark herabgesetzt. Breitverteiler dieser Bauart zeichnen sich durch einen einfachen technischen Aufbau aus. Dieser bedingt gleichfalls deutlich niedrigere Investitionen in die Ausbringtechnik.“* [Döhler et al. 2002, S.67]

- **Schleppschlauch**

Ein System zur sogenannten bodennahen Ausbringung ist Verteilung der Gülle mittels Schleppschlauch. Aus Döhler et al. wurden dazu die nachfolgenden Informationen entnommen:

*„Beim Schleppschlauchverteiler wird der Flüssigmist von einer Pumpe oder einem Kompressor am Verteilfahrzeug mit geringem Druck in eine Verteileinrichtung gefördert und in die einzelnen Ablaufschläuche, die an einem klappbaren Gestänge angebracht sind, in gleichen Mengen dosiert. Typische Schleppschlauchverteiler haben eine Arbeitsbreite von 12-15 m. Die einzelnen Ablaufschläuche sind in der Regel in einem Abstand von 20–40 cm zueinander angeordnet sind. Am Ende des Ablaufes befinden sich keine speziellen Verteileinrichtungen. Der Ablauf wird während des Ausbringvorganges durch den Pflanzenbewuchs (soweit vorhanden) geschleppt. Die Gülle wird auf der Bodenoberfläche in etwa 5–10 cm breiten Streifen ablegt. Bedingt durch die kleinere benetzte Oberfläche führt der Schleppschlauch im Vergleich zur Breitverteilung bei Schweinegülle zu ca. 30 % und bei Rindergülle zu ca. 10 % geringeren NH<sub>3</sub>-Freisetzungen auf unbewachsenem Ackerland bzw. Grünland mit geringem Aufwuchs (Ausbringungstemperatur 15°C). Größere Minderungen von bis zu 30 % bei Rindergülle und 50 % bei Schweinegülle sind mit dieser Technik auf bewachsenem Ackerland und Grünland zu erzielen. Weitergehende Minderungen sind nur auf Ackerland durch die Kombination mit einem geeigneten Einarbeitungsverfahren möglich. Die Verteilgenauigkeit kann durch Windeinflüsse nicht beeinträchtigt werden. Da die Gülle nur auf dem Boden abgelegt wird, eignet sich der Schleppschlauch auch für Standorte mit einem höheren Steinanteil in der Ackerkrume und im Grünland. Es ist keine gesteigerte Zugkraft und Antriebsleistung erforderlich. Für Standorte mit größeren Hangneigungen sind Schleppschlauchverteiler, speziell mit größeren Arbeitsbreiten, nur bedingt geeignet, da die Verteilgenauigkeit negativ beeinflusst wird und die Gestänge nur schwer parallel zum Boden geführt werden können.“*

[Döhler et al. 2002, S.68]

Bei der Verteilung mittels Schleppschlauch sind für die Ausschöpfung des Emissionsminderungspotentials optimale Witterungsbedingungen und/oder eine rasche Einarbeitung in den Boden sicherzustellen. Aufgrund der konzentrierten

Aufbringung in Streifen wird die Infiltration in den Boden wegen einer höheren Schichtdicke im Vergleich zur Breitenverteilung etwas verlangsamt [Pöllinger et al 2011, S.10].

- **Schleppschuh**

Ähnlich dem Schleppschlauch ist die Ausbringung der Gülle mittels Schleppschuh. Döhler et al. charakterisieren dieses Verfahren wie folgt:

*„Beim Schleppschuhverteiler wird Flüssigmist ebenfalls in einzelne an einem Verteilergestänge angebrachte Ablaufschläuche dosiert. Schleppschuhverteiler besitzen eine Arbeitsbreite von 3-12 m. Die einzelnen Ablaufschläuche haben in der Regel einen Abstand von 20–30 cm zueinander. Am Ende jedes Ablaufes befinden sich spezielle Verteileinrichtungen, die in Form einer schuhähnlichen Verstärkung bzw. Schleifkufe ausgeführt sind. Dieser Verteiler wird während des Ausbringvorganges durch den Pflanzenbestand geschleppt. Dabei wird der Pflanzenbewuchs etwas beiseite gedrückt und die Flüssigmistablage erfolgt in den obersten Bodenbereich (0–3 cm), so dass Pflanzenverschmutzungen und Beschädigungen weitgehend verhindert werden. Bei dieser Ausbringung sind die NH<sub>3</sub>-Freisetzungen im Vergleich zur Breitverteilung bei Schweinegülle auf Grün- und Ackerland um ca. 60 % geringer (Ausbringungstemperatur 15°C). Für Rindergülle ist mit Emissionsminderungen von 30 % auf Acker und 40 % auf Grünland zu rechnen. Die Verteilgenauigkeit kann durch Windeinflüsse nicht beeinträchtigt werden. Auf Standorten mit größeren Hangneigungen wird die Verteilgenauigkeit negativ beeinflusst. Die Einarbeitung bedingt einen gesteigerten Zugkraftbedarf gegenüber dem Breitverteiler. Im Vergleich zum Referenzverfahren führen gleiche oder kleinere Arbeitsbreiten aufgrund des höheren technischen Aufwandes und des höheren Kraftbedarfes zu merklichen Minderungen der Ausbringleistung des Verfahrens.“* [Döhler et al. 2002, S.68]

- **Gülleschlitztechnik**

Ein weiteres bodennahes Ausbringsystem für Gülle ist die Gülleschlitztechnik. Die Charakteristika dieses Verfahrens nach Döhler et al. werden nachfolgend beschrieben.

*„Beim Gülleschlitzverteiler wird Flüssigmist wie beim Schleppschlauchverteiler beschrieben in einzelne an einem Verteilergestänge angebrachte*

*Ablaufschläuche dosiert. Typische Gülleschlitzverteiler besitzen eine Arbeitsbreite von 6-9 m, wobei die einzelnen Ablaufschläuche in der Regel in einem Abstand von 20–30 cm zueinander angeordnet sind. Die Applikation erfolgt mit Hilfe einer schuhähnlichen Verstärkung bzw. Schleifkufe, der eine Schneidscheibe oder ein Messer vorweggeführt wird. Diese Werkzeuge schneiden den Pflanzenbestand sowie den Boden mit einer Einarbeitungstiefe von 4-8 cm auf. In diesen Schlitz wird die Gülle abgelegt. Je tiefer die Einarbeitung erfolgt, um so größer ist die NH<sub>3</sub>-Emissionsminderung. Mit der Gülleschlitztechnik sind auf Grünland bei der Ausbringung von Rindergülle Emissionsminderungen von 60 % und bei Schweinegülle von 80 % möglich (Referenz Breitverteiler, Ausbringung bei 15°C). Mit steigender Einarbeitungstiefe erhöht sich der spezifische Zugleistungsbedarf. Bei Grünland können Narbenschädigungen auftreten, z. B. wenn eine zu große Flüssigmistgabe ausgebracht, wenn eine ungünstige Wachstumsperiode gewählt oder mit einem nicht geeigneten Schlitzgerät ausgebracht wird. Auf Standorte mit größeren Hangneigungen wird die Verteilgenauigkeit negativ beeinflusst. Die Schlitztechnik ist nicht für Standorte mit erhöhtem Steinanteil oder für sehr flachgründige Standorte geeignet. Die Technik besitzt einen gesteigerten Zugkraftbedarf gegenüber dem Schleppschuhverteiler. Im Vergleich zum Referenzverfahren führen kleinere Arbeitsbreiten, ein höheres Gewicht und der höhere Kraftbedarf zu deutlichen Minderungen der Ausbringleistung des Verfahrens“ [Döhler et al. 2002, S.68]*

- **Güllegrubber**

Als letztes bodennahes Ausbringverfahren kann der Güllegrubber angeführt werden. Hierbei wird der Arbeitsschritt des Grubbers mit der Ausbringung der Gülle kombiniert. Menden et al. beschreiben dieses Verfahren wie folgt:

*„Beim Güllegrubber wird Flüssigmist wie beim Schleppschlauchverteiler beschrieben in einzelne an einem Grubber angebrachte Ablaufschläuche dosiert. Typische Güllegrubber besitzen eine Arbeitsbreite von 3-6 m, wobei die einzelnen Ablaufschläuche üblicher Weise in einem Abstand von 20 - 40 cm zueinander angeordnet sind. In der Regel wird der Boden mit einem Grubberzinken in einer Tiefe von 5 – 15 cm bearbeitet und in dessen unmittelbarer Verlängerung die Gülle in den Erdstrom während der*

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

*Bearbeitung abgelegt. Daneben werden auch Scheibeneggen verwendet, bei denen der Boden mit Hohlscheiben bearbeitet und die Gülle in gleicher Weise in den Erdstrom abgelegt wird. Diese Technik wird auf unbewachsenem Ackerland und in modifizierter pflanzenreihenangepasster Bauweise in niedrigen Reihenkulturen eingesetzt. Mit diesen Einarbeitungstechniken können größere Stickstoffmengen zur Düngung zur Verfügung gestellt und NH<sub>3</sub>-Emissionsminderungen von bis zu 90 % (Frick und Menzi 1997) erzielt werden. Der Einsatz eines Güllegrubbers beinhaltet die gezielte Applikation von Flüssigmist in den Boden in einer Überfahrt während der Bodenbearbeitung und macht einen weiteren Arbeitsgang mit dem Ziel der Gülleeinarbeitung überflüssig. Der relativ tiefe Eingriff in den Boden erfordert einen gesteigerten Zugkraftbedarf gegenüber dem Schlitzverteiler. Im Vergleich zum Referenzverfahren führen deutlich geringere Arbeitsbreiten, ein höheres Gewicht und der höhere Zugkraftbedarfes zu deutlichen Minderungen der Ausbringleistung des Verfahrens.“* [Döhler et al. 2002, S.69]

In Österreich wurden im Jahr 2009 8,69 % der Gülle in Form einer bodennahen Ausbringtechnik appliziert [vgl. Pöllinger et al 2011, S.21]. Durch ein speziell implementiertes Förderprogramm wird in Österreich versucht den Anteil emissionsverminderter bodennaher Ausbringung weiter zu steigern. Im Rahmen des Österreichischen Programms zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft (ÖPUL) wird eine Maßnahme „Verlustarme Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern und Biogasgülle“ angeboten. Bodennahe Ausbringung wird dabei mit 1 € je m<sup>3</sup> unterstützt [vgl. Pöllinger et al 2011, S.18].

Neben Emissionen in die Luft bei Lagerung und Ausbringung sind für ein gutes Wirtschaftsdüngermanagement auch die ökologischen Auswirkungen auf Boden und Gewässer vor allem durch Nitrat-Auswaschung zu minimieren. In Österreich müssen daher auch Regelungen aus dem Aktionsprogramm Nitrat 2012 berücksichtigt werden. Aus dieser Verordnung ergeben sich folgende wichtige Rahmenbedingungen:

- Seitens des Landwirtes ist eine 6-monatige Lagerung des Wirtschaftsdüngers zu gewährleisten

- Der im §2 festgelegte Verbotszeitraum zur Düngerausbringung ist zu berücksichtigen
- Die Ausbringung auf durchgefrorenen und wassergesättigten Böden ist verboten
- Die Begrenzung der Stickstoffmenge für landwirtschaftliche Flächen ist zu berücksichtigen.

### **6.2.3 Der Transport von flüssigem Wirtschaftsdünger**

Flüssiger Wirtschaftsdünger beinhaltet neben den düngewirksamen Bestandteilen vor allem Wasser. Je nach Art des Wirtschaftsdüngers zwischen 87-99 % [vgl. Landeskontrollverband Brandenburg e.V]. Für den Transport des Gutes „Dünger“ sind aufgrund der geringen Wertstoffkonzentration somit große Volumina notwendig. Der klassische und verbreitetste Transport ist jener mit Traktor und Güllefass [vgl. Ghafoori et al. 2007, S.168]. Aufgrund immer größer werdender Viehbetriebe muss Gülle über immer länger werdende Strecken transportiert werden. Im Bereich des Gülletransportes hat es daher in den letzten Jahren Entwicklungen gegeben um vor allem den Transport über weite Strecken wirtschaftlicher zu machen. In einem ersten Schritt wurde daher das Volumen der Güllefässer deutlich erhöht, um die spezifischen Transportkosten zu minimieren. Die Größe des Fasses ist allerdings durch die für den Straßentransport höchstzulässigen Achslasten und Gesamtgewichte der Transporteinheit aber vor allem durch die maximale Druckbelastung am Feld limitiert. Zu schwere Arbeitsmaschinen führen zu Unterbodenverdichtungen mit schleichenden Ertragseinbußen und anderen Folgeschäden [vgl. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft 2010]. Bei langen Transportstrecken ist daher die Trennung von Straßentransport und Feldausbringung zu empfehlen. Wenn Transport und Ausbringungen mit unterschiedlichen Maschinen durchgeführt wird, ist der Straßentransport nicht mehr auf den Einsatz von Schleppgespannen angewiesen sondern kann auch mittels LKW erfolgen. Vorteilhaft bei LKW sind der deutlich höhere Reifendruck und dadurch verminderte Kraftstoffverbrauch aber auch die höhere maximale Nutzlast [vgl. Reckleben 2014; S.36]. Der entkoppelte Straßentransport kann dann dafür genutzt werden, dass Gülle am Feld mittels Gülleverschlauchung transportiert wird und das Gewicht der Arbeitsmaschine auf ein Minimum reduziert werden kann. Bei der Gülleverschlauchung wird der flüssige Wirtschaftsdünger vom Lagerbehälter über eine Pumpstation zum Feld und der Arbeitsmaschine gepumpt. Der Lagerbehälter kann bei kurzen Strecken die Güllegrube am Hof oder ein Lagerbehälter am Feldrand sein. Die Reduktion des



Gewichtes der Arbeitsmaschine schont dabei nicht nur den Boden sondern verbessert auch die Hangtauglichkeit und die Befahrung bei schwierigen Bodenverhältnissen [vgl. Pöllinger 2011; S.9].

Ein weiteres innovatives Konzept zur Senkung der Transportkosten für Gülle ist der kombinierte Kippauflieger mit integriertem Tank der Firma Wiese. In diesem Auflieger können sowohl Flüssigkeiten wie auch Feststoffe transportieren werden. Es wird dadurch möglich am Hinweg Gülle oder Gärreste und am Rückweg Schüttgut zu transportieren. Leerfahrten werden dadurch auf ein Minimum reduziert. Der Aufbau des Wiese OptiTwin ist in Abbildung 41 dargestellt.



**Abbildung 41 Wiese OptiTwin für dem gleichzeitigen Transport von Schüttgut und Flüssigkeiten. Eine Möglichkeit zur Kostenreduktion bei Gülletransporten.**

*Quelle: <http://www.optitwin.de/>*

### **6.3 Energetische Wirtschaftsdüngerverwertung in Österreich, Europa und der Welt**

Die Nutzung von Mist zur Energieproduktion ist eine bereits seit Jahrtausenden praktizierte Methode [vgl. Mlekuž 2009, S.219]. Die einfachste und älteste, aber auch zeitintensivste Methode zur Energieproduktion ist die Verbrennung des Mistes. Dabei wird der Dung je nach Tierart auf verschiedenste Arten getrocknet und anschließend verbrannt. Die bei der Verbrennung entstehende Wärmeenergie wird dabei zu Heizzwecken aber auch zum Kochen verwendet. Diese Art der Energienutzung wurde bereits in der Jungsteinzeit eingesetzt und findet noch heute in vielen Teilen dieser Erde Anwendung. Vor allem in Regionen wo Brennholz ein „Luxusprodukt“ geworden ist (z.B unweit des Himalaya) ist die Bevölkerung auf Ersatzbrennstoffe wie Dung angewiesen (siehe Abbildung 42) [vgl. Madel 2001]. Die Verbrennung führt allerdings zum vollständigen Abbau der organischen Masse und verhindert die Rückführung wichtiger organischer Nährstoffe in den Boden [vgl. Barfuss et al. 2011, S4f].



**Abbildung 42 Sammeln von Yak-Dung als Brennstoff im Hochland von Tibet**  
*Quelle: Lanfranconi und Schwarz*

Die Biomassefeuerung und somit auch die Dungverbrennung ist eine einfache und mit geringen Kosten verbundene Technologie welche neben dem Nährstoffverlust auch mit anderen negativen Einflüssen verbunden ist. Etwa 3 Milliarden Menschen weltweit sind auf die Energieversorgung durch offenes Feuer angewiesen. Etwa 4,3 Millionen Menschen sterben jährlich durch Erkrankungen die mit einer erhöhten Luftverschmutzung im Haushalt in Verbindung gebracht werden können [vgl. World Health Organization (WHO) 2014]. Die Verbreitung emissionsärmerer Verbrennungsöfen ist eine Möglichkeit diese negativen Folgen zu minimieren [vgl. Adler 2010, S.A128]. Auch die Vergasung anstelle der Verbrennung von Mist ist eine Möglichkeit der emissionsarmen Energiebereitstellung in diesen Regionen.

Auch in Europa findet man vereinzelt Anlagen zur Wirtschaftsdünger Verbrennung, wobei vor allem Pferdemist verarbeitet wird. Der Aufwand für Transport, Trocknung und der Verlust als Wirtschaftsdünger sowie spezielle Anforderungen an den Verbrennungsprozess limitieren allerdings die Verbreitung dieser Technologie [vgl. Edström et al. 2011, S.5f; Bock, S2ff]. In Europa und so auch in Österreich findet hauptsächlich die anaerobe Fermentation für die energetische Wirtschaftsdüngerverwertung Anwendung. Der Anteil an der Gesamtmenge ist jedoch gering. Der größte Anteil wird dabei für Deutschland berichtet wo in etwa 12-20 % der Gesamtmasse in Biogasanlagen verwendet werden [vgl. Luostarinen 2013, S.17]. In

Dänemark wird bis 2020 der Einsatz von 50 % angestrebt. Derzeit werden in Dänemarks Biogasanlagen allerdings nur 7 % der Gesamtmenge verarbeitet [vgl. Luostarinen 2013, S.47]. Auch die spezielle Förderung von Gülleanlagen mit der EEG Novelle 2009 hat in Deutschland nicht zum erhofften Boom an Biogasanlagen mit hohem Gülleanteil geführt [vgl. Scheftelowitz 2014, S.73].

In den Biogasanlagen Europas wird hauptsächlich Flüssigmist verarbeitet. Grund dafür ist das leichtere Handling aber vor allem der fehlende Strohanteil im Flüssigmist. Stroh ist in Biogasanlagen aufgrund seines komplexen Aufbaus nur schwer abbaubar. Im Verlauf dieser Arbeit soll aufgrund dieser Bevorzugung von Flüssigmist nur die Verwertung dieser Mistkategorie untersucht werden.

Im Gegensatz zu Europa werden in Asien große Mengen an Dung vor allem in kleinen dezentralen Anlagen anaerob verwertet. Für viele Menschen ist diese Nutzung die einzige Alternative zu offenem Feuer im Haus. Die Nutzung des Gases beschränkt sich dabei nicht auf die Strom oder Wärmeproduktion sondern ist den Energiebedürfnissen der Regionen angepasst. Das produzierte Gas ist meist die einzige zugängliche Energiequelle und wird zum Kochen, für die Beleuchtung und die Warmwasser- und Wärmebereitstellung genutzt [vgl. Gautam et al. 2009, Arthur et al. 2011]. Es kann bei Betrieb eines Blockheizkraftwerkes auch Strom erzeugt werden, allerdings steigen dadurch die Investitionskosten und die notwendige Infrastruktur. Die Anlagen zeichnen sich durch einfache Bauweise und niedrige Investitionskosten aus [vgl. Ding et al. 2010, S.37].

## **6.4 Motivation und Hindernisse für die anaerobe Fermentation von Wirtschaftsdünger**

An dieser Stelle soll geklärt wovon die Investition in eine Anlage für die energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger abhängt und warum vor allem in Europa nicht der erhoffte Zuwachs an Biogasanlagen mit hohem Wirtschaftsdüngeranteil erreicht werden kann.

### **6.4.1 Das ungenutzte Energiepotential**

Im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung ist das ungenutzte Energiepotential von tierischen Exkrementen sicherlich eines der zentralen Argumente für die Erhöhung des in Biogasanlagen verwerteten Anteils des Mistes.

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Das theoretische Energiepotential von Wirtschaftsdünger in Österreich wird in diversen Studien mit unterschiedlichen Werten angegeben (vgl. Tabelle 21). Die Abweichungen im Potential sind vor allem auf abweichende angenommene Nutzungsgrade zurückzuführen.

**Tabelle 21 Energiepotential von Gülle aus verschiedenen Studien**

	Energiepotential
Zethner und Süßenbacher	6,1 PJ
Streicher et al.	9 PJ
Amon et al.	11,5 PJ
Dissemond et al.	16,2 PJ

Für die Einschätzung des maximalen Potentials basierend auf der gesamten jährlich anfallenden Wirtschaftsdüngermenge kann dieser Nutzungsgrad vernachlässigt werden. Durch systemische Änderungen sollte schließlich angestrebt werden das mögliche dem maximalen Potential anzunähern. Aufgrund der in Kapitel 5.3 angeführten Bevorzugung von Flüssigfermentation wurden die Berechnungen auf das Energiepotential von Flüssigmist beschränkt.

Die jährlich in Österreich anfallende Menge an Flüssigmist wurde bereits in Kapitel 6.2.1 angeführt. Für die Berechnung des theoretischen Energiepotentials wurde die Güllemenge mit dem zu erwartenden Gasertrag multipliziert. In der Literatur findet man auch hier schwankende Angaben, wobei in dieser Arbeit Erträge nach Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) für die Berechnung herangezogen wurden [vgl. KTBL Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas]. Es ist dies ein Methanertrag von 16,7 m<sup>3</sup> pro Tonne Rindergülle und 12,2 m<sup>3</sup> pro Tonne Schweinegülle. Das daraus resultierende Energiepotential (Methan = 36 MJ Nm<sup>-3</sup>) ergibt somit 4,7 PJ für Rindergülle und 1,9 PJ für Schweinegülle und somit maximal 6,6 PJ aus Gülle durch Flüssigfermentation.

Dieser Wert entspricht 89 % des derzeit in Österreich produzierten Biogases<sup>2</sup> und einem Erdgaseinsparpotential (Bruttoenergieverbrauch) von 2,2 % [vgl. Statistik Austria 2013].

<sup>2</sup> Rohenergieproduktion aus Biogas 7,44 PJ

#### **6.4.2 Ökologische Interessen**

Neben der Erzeugung erneuerbarer Energie sind in Europa noch weitere ökologische Anliegen vorhanden, die das Interesse an einer erhöhten Vergärung von Wirtschaftsdünger vorantreiben. So werden durch die anaerobe Vergärung die Geruchsemissionen während der Ausbringung minimiert. Aufgrund des Abbaus organischen Materials wird außerdem die Viskosität reduziert und dadurch die Bodeninfiltration verbessert. Darüber hinaus wird die Verbesserung der Düngqualität aufgrund einer verringerten C/N Verhältnisses berichtet [vgl. Lichti 2012, S.1ff]. Es ist allerdings bei der Ausbringung auf optimale Witterungsbedingungen zu achten, da die höhere Düngewirkung auch höhere Stickstoffverluste zur Folge hat [vgl. Pötsch et al. 2004, S.5]. Ein weiterer Aspekt ist die Minimierung von Treibhausgasemissionen während der Lagerung [vgl. Clemens et al. 2006, S.174].

#### **6.4.3 Soziale Interessen**

Die Realisierung von kleinen Biogasanlagen in Indien und China hat weniger mit ökologischen Vorteilen denn mit sozialen und ökonomischen Interessen der Bevölkerung zu tun. Viele Menschen in diesen Ländern sind nicht an ein zentrales Strom oder Wärmenetz angeschlossen, für sie ist die Biogaserzeugung neben Verbrennung fester Biomasse die einzige Alternative, leistbare Energie zu erhalten. Anlagen in Asien sind nicht für maximale Ausbeute sondern für minimale Kosten und einfachen Betrieb ausgelegt. Sie werden von den Betreibern meist in Eigenarbeit errichtet. Zum Einsatz kommen Exkremete von Tieren und Menschen sowie organische Reststoffe. Der Betrieb erfolgt zu 100 % manuell ohne mechanische Einbauten oder teure Messsysteme. Das entstehende Gas wird zum Kochen, Heizen und für die Beleuchtung eingesetzt. Zum Teil wird daraus mit kleinen Blockheizkraftwerken auch Strom erzeugt. Der Betreiber ist dabei nicht an Renditen oder anderen ökonomischen Kenngrößen interessiert sondern investiert in eine unabhängige Energieversorgung.

Aber auch in Europa können soziale Interessen Treiber für den Ausbau der energetischen Verwertung von Wirtschaftsdünger sein. So ist ein zentrales soziales Interesse der Erhalt von Arbeitsplätzen. Viehbetriebe stehen unter großem ökonomischen Druck, die Wertsteigerung ihrer Produktion durch die Verwertung des Reststoffes Gülle kann dazu beitragen, Arbeitsplätze in diesem Bereich zu sichern.

Auch der Erhalt von regionalen Strukturen kann soziale Triebkraft sein. So war beispielsweise die Bewahrung der landwirtschaftlichen Struktur inklusive dem daraus resultierenden touristischen Wert Hauptgrund für den Bau einer Biogasanlage in der Region Terenten/Pustertal [vgl. Steger 2012]. Durch den Bau der Biogasanlage sollten die Geruchsemissionen der Landwirtschaft deutlich reduziert und die Attraktivität der Tourismusregion erhöht werden.

#### **6.4.4 Ökonomische Interessen**

In Europa kommt der Strom aus Sicht des Konsumenten aus der Steckdose und auch die Versorgung mit Wärme ist im Allgemeinen eine Selbstverständlichkeit. Investitionen im Energiesektor sind in der Regel von ökonomischen Interessen getrieben. Wie bereits im Kapitel 4.1.6 beschrieben ist in Österreich wie auch in Deutschland ein markanter Zusammenhang zwischen Einspeisevergütung und Entwicklung der installierten Gesamtleistung von Biogasanlagen erkennbar. In Deutschland wurde daher versucht den Anteil des anaerob verwerteten Wirtschaftsdüngers durch verbesserte Einspeisetarife zu erhöhen. Die gesetzten Maßnahmen haben allerdings nur zu einem geringen Anstieg der verwerteten Gülle geführt [vgl. Scheftelowitz 2014, S.73].

Wie bereits in Kapitel 4.1.5 angeführt sind die spezifischen Gasgestehungskosten von Biogas stark von der Größe der Anlage abhängig. Im Zusammenhang mit der energetischen Verwertung von Wirtschaftsdünger ist dies von Bedeutung, da dieser einen relativ geringen Energiegehalt aufweist. Würde man beispielsweise eine 500 kW<sub>el</sub> Biogasanlage alleine mit Flüssigmist betreiben wäre die Gülle von 2200 Rinder notwendig. Für Österreich, einem Land mit sehr geringer Viehdichte (durchschnittlich 0,73 GVE pro Hektar), eine nicht zu realisierende Größe. Aber auch in viehdichten Regionen ist die Anwendung limitiert, da aufgrund ökologischer Faktoren die Ausbringung von Wirtschaftsdünger auf einen maximalen Stickstoffgehalt von 170 g je Hektar limitiert ist [vgl. bmlfuw<sup>c</sup>]. Für die Ausbringung des Gärrestes wären demzufolge bei einem angenommenen mittleren N-Gehalt im Dung je Rind [vgl. Pötsch et al. 2008, S.4] 1060 Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche nötig. Für einen erhöhten Anteil an Wirtschaftsdünger ist also die dezentrale Verarbeitung in kleineren Anlagen oder die Vergärung als Co-Substrat notwendig. Bei Co-Vergärung ist zu bedenken, dass die Menge an verfügbarer organischer Masse in näherer Umgebung der Landwirte stark begrenzt ist und die Größe der Anlage durch diese Größe und die entstehenden Transportkosten limitiert ist.

#### **6.4.5 Ökonomische Limitierungen**

Wie in Kapitel 4.1.5 dargestellt steigen die Investitionskosten aber auch die spezifischen Methangestehungskosten mit sinkender Anlagenleistung exponentiell. Dies ist vor allem auf den hohen technologischen Standard europäischer Anlagen zurück zu führen. Aber auch die spezifischen Ausgaben für die Infrastruktur sind bei kleinen Anlagen deutlich höher. Aus diesem Grund wird auch die minimale Bestandsgröße bei der Biogaspotentialerhebung aus Gülle in vielen Fällen beschränkt [vgl. Luostarinen 2013; Zethner und Süßenbacher 2012, S.16; Hiebel et al 2014, S.69]. Geringe Güllemengen und folglich geringe Gasausbeuten lassen sich mit den vorhandenen Technologien nicht wirtschaftlich darstellen. Dies erklärt auch, warum in Österreich der Anteil der verwertbaren Gülle besonders gering ist. Auch der Transport der Gülle vom Landwirt zu einer größeren Biogasanlage ist aufgrund hoher Transportkosten (siehe dazu Kapitel 6.2.3) nur in Regionen mit hohen Viehdichten realisierbar. Das Gesamtpotential ist also auch hier gering.

#### **6.5 Charakterisierung von Kleinanlagen in ruralen Entwicklungsregionen**

Wie bereits oben angeführt wird Dung in ruralen Gebieten in Asien und Afrika vor allem in Kleinanlagen verwertet. Es ist dies neben der Brennholznutzung oft die einzige Möglichkeit der Energieversorgung. Die bedeutendsten Länder sind dabei, China mit 38,51 Millionen Kleinanlagen, gefolgt von Indien mit 3,8 Millionen, Nepal mit 0,2 Millionen, Bangladesch mit 60.000 und Afrika mit ein wenigen tausend Anlagen [vgl. Chen et al. 2010, S.546; Rajendran et al. 2012, S.2913].

Wie auch in Europa werden die meisten Anlagen als Flüssigfermentation betreiben, dabei lassen sich drei Fermentertypen unterscheiden [vgl. Rajendran et al. 2012, S.2914f]. In Abbildung 43 sind verschiedene Ausführungen dieser Anlagenarten dargestellt. Man unterscheidet Reaktor mit fester Kuppel (oben Mitte), Schwimmender Fassreaktor (oben links und unten rechts) und Pfropfenstromfermenter (oben rechts und unten links).



## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -



**Abbildung 43** Verschiedene Typen von Kleinbiogasanlagen in Entwicklungsgebieten

Quelle: <http://icrossedover.blogspot.co.at/>; [new-delhi.all.biz](http://new-delhi.all.biz;);  
[freejustinbieber2011.blogspot.com](http://freejustinbieber2011.blogspot.com); [www.build-a-biogas-plant.com](http://www.build-a-biogas-plant.com); [http://www.wipro-dresden.de/data/Erlar\\_Fassbiogasanlage\\_V01.pdf](http://www.wipro-dresden.de/data/Erlar_Fassbiogasanlage_V01.pdf)

Bei der Auswahl des Reaktors sind für eine langfristige effiziente Biogaserzeugung folgende Kriterien zu beachten [vgl. Erler 2012, Folie 12]:

1. Kosten/Preis
  - Kostengünstige Baumaterialien
  - Einfache Installation / einfacher Aufbau
  - Wenige Werkzeuge notwendig, kein Spezialwerkzeug
  - Einfache Wartung (schnell und kostengünstig)
2. Sicherheitstechnik:
  - Unfälle beim Bau vermeiden
  - einfache, leichte Bedienung auch für Laien um Unfälle beim Betrieb zu vermeiden
3. Optimale Biogaserzeugung
  - optimale Temperatur
  - langfristig gleichbleibendes, großes Gärvolumen
  - gute/richtige Substratwahl



- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Die Reaktoren können aus unterschiedlichem Material hergestellt sein. Die wichtigsten Materialien sowie ihre Vor- und Nachteile sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

**Tabelle 22 gängige Materialien für Biogas Kleinanlagen**  
*Quelle: eigene Darstellung nach Rajendran et al. 2012*

Material	Modifikationen	Vorteile	Nachteile
PVC	Rotschlamm PVC	geringes Gewicht, leicht zu transportieren	Geringe Lebensdauer von Plastik
PE	mit UV Filter	günstiger als PVC	Geringe Lebensdauer von Plastik
Neopren und Gummi	verstärkt mit Nylon	wetterresistent und elastisch	Teuer, nur geringer Überdruck, geringe Lebensdauer
Ziegel und Beton	viele verschiedene	langlebig, geringe Wartungskosten	Ziegel nicht gasdicht bei steigendem Druck, Installation im Boden, schwere Reinigung
Bambus und Holz	Mit Flachs verstärkt, Hilfsmaterial	Lokal verfügbar	Kann leicht brechen
Stahl		gasdicht	Korrosion und hohes Gewicht

Die Investitionskosten für eine Biogasanlage (Größe ca. 1-4 m<sup>3</sup>) inklusive Leitung und Gasofen belaufen sich auf 50-400 € [vgl. Erler 2012, Folie 24]. Aufbau und Betrieb sind allerdings mit erheblichem Aufwand für den Anlagenbetreiber verbunden.

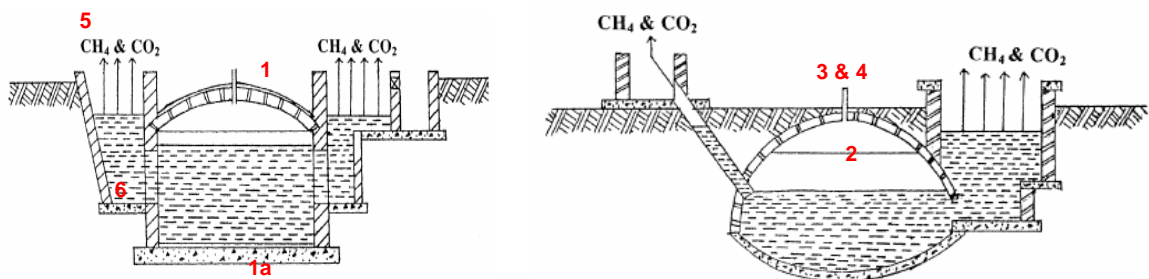
Trotz der niedrigen Investitionskosten sind die zukünftigen Nutzer der Anlage oft auf finanzielle Unterstützung von der Regierung oder anderer Stelle angewiesen. Aber nicht nur ökonomische Faktoren beeinflussen den erfolgreichen Betrieb einer Anlage. Vor allem das fehlende Fachwissen von Betreibern den Bereichen Wartung, Fütterung, und Prozessbedingungen führt in vielen Fällen zur Stilllegung der Anlage [vgl. Ding et al. 2010, S.35; Mondal et al. 2010, S.4631].

Auch die fehlende Akzeptanz der Dorfbewohner aufgrund unzureichender Information kann das Scheitern eines erfolgreichen Betriebes nach sich ziehen [vgl. Mondal et al.

2010, S.4629]. Fluktuierender Biomasseanfall, schwankende Temperaturen und Gasleckage sind weitere Faktoren die einen erfolgreichen Betrieb verhindern können.

In Europa könnten alle diese Faktoren positiv bewertet werden. Es ergeben sich allerdings andere Kriterien, die die erfolgreiche Projektierung einer Haushaltsbiogasanlage verhindern. Dies sind zum einen rechtliche Anforderungen, auf die im nächsten Absatz eingegangen werden, aber auch ein fehlendes Verwertungskonzept das Gas und die fehlende Zeit und Bereitschaft für die intensive Betreuung dieser Anlagen.

Einige der rechtlichen Hinderungsgründe werden anhand zweier Anlagen des Reaktortyps mit fester Kuppel beschrieben. Ausgehend von den asiatischen Kleinanlagen des Types Janata und Deenbandu wurde anhand der Richtlinie für den Bau von Biogasanlagen [vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) 2007] eine Realisierung dieser Anlagen in Österreich geprüft. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Abbildung 44 und den nachfolgendem Text zusammengefasst.



**Abbildung 44 Rechtliche Vorschriften zum Bau einer Biogasanlage in Ö angewendet auf die asiatischen Anlagentypen Janata und Deenbandu.**

*Quelle: eigene Darstellung nach Khoiyangbam et al. 2004*

1. Alle Anlagenteile müssen vollständig flüssigkeits- und chemikalienbeständig sein, Anlagen aus Ziegelsteinen sind nicht genehmigungswürdig. Eine vollständige Versiegelung des Fermenterbodens ist erforderlich (1a).
2. Der Gasraum des Fermenters wird als EX-Zone 1 klassifiziert. Der Anschluss der Gasleitung muss explosionsgeschützt erfolgen. Alle Anlagen müssen über ein Explosionswarnsystem verfügen. Jeder Behälter zur Biogaserzeugung muss mit einem Überdruckventil abgesichert sein.
3. Freiliegende Gasleitungen müssen in Edelstahl ausgeführt sein und über einen Kondensatabscheider verfügen.

4. Biogasanlagen müssen über eine Entschwefelungseinheit verfügen. Jede Anlage muss eine Gasanalytik beinhalten. Eine Gasfackel für die Vermeidung von Methanemissionen ist in jedem Fall vorzusehen.
5. Vorlage- und Mischbehälter müssen über eine Abdeckung verfügen, um Emissionen in die Luft zu minimieren.
6. Die Substratzudosierung muss mindestens einen Meter unterhalb des Flüssigkeitsspiegels erfolgen.

Will man also Kleinanlagen in Österreich errichten und betreiben, gilt es, ein Anlagenkonzept zu entwerfen, welches geringe Investitions- und Betriebskosten hat, aber alle erforderlichen Sicherheitsstandards eines Industriestaates erfüllt.

### **6.6 Biogas aus Wirtschaftsdünger – das Anlagenkonzept**

Fasst man die oben erarbeiteten Eckpunkte der Güllefermentation zusammen, ergibt sich folgende Ausgangssituation:

Aufgrund des energetischen Potentials des jährlich anfallenden Wirtschaftsdüngers und dem Bestreben nach Nachhaltigkeit und der Produktion von erneuerbarer Energie sollte dieser Reststoff nicht ungenutzt bleiben. Der geringe Energiegehalt von Gülle und die daraus resultierenden hohen Transportkosten erfordern alternative Logistikkonzepte oder minimierte Transportwege, um einen profitablen Rohstofftransport gewährleisten zu können. Die im weltweiten aber vor allem im europäischen Vergleich kleinstrukturierte österreichische Landwirtschaft kann in einem ökonomisch rentablen Radius nur begrenzte Mengen Gülle zur Verfügung stellen, was wiederum direkten Einfluss auf die mögliche Größe der Biogasanlage hat. Je kleiner die Anlagen desto höher werden die spezifischen Investitionskosten und in weiterer Folge die Gasgestehungskosten. Biogasanlagen unterliegen dem Skaleneffekt, sodass kleine Anlagen mit den verfügbaren Technologien deutlich höhere spezifische Investitions- und Betriebskosten aufweisen.

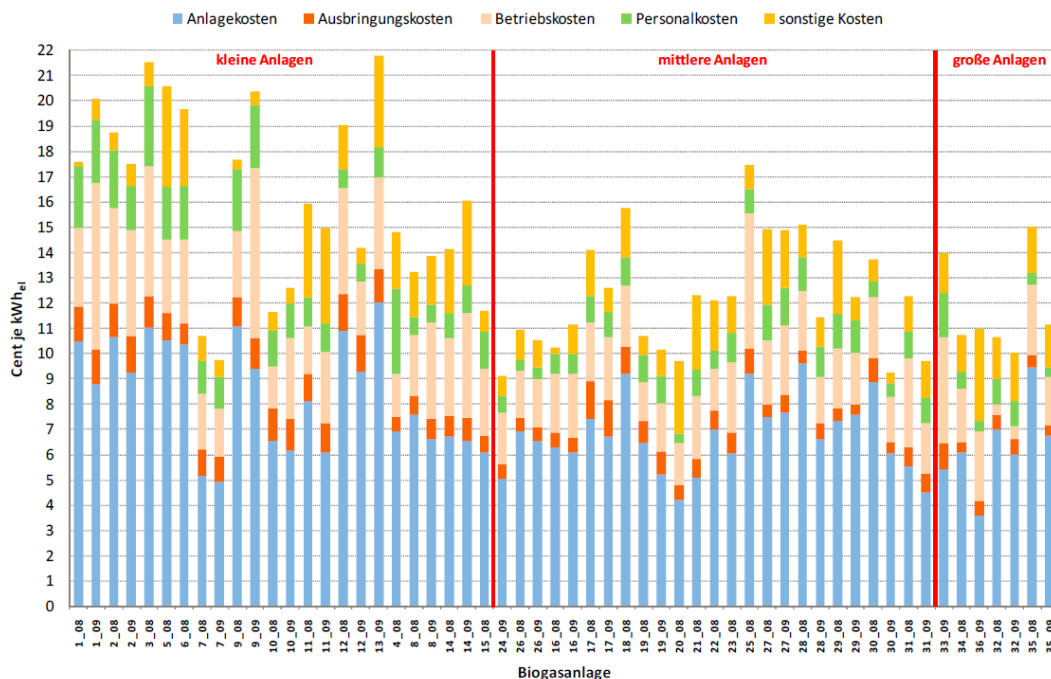
Es stellt sich daher die Frage, ob Kleinanlagen zwangsläufig mit hohen Kosten verbunden sein müssen. Die in Europa vorhandenen und von Walla und Schneeberger [vgl. Walla und Schneeberger 2008] bewerteten Anlagen sind durch einen hohen Automatisierungsgrad ausgezeichnet. Investitionen für Mess-, Steuer und Regeltechnik sind in der Regel nicht von der Anlagengröße abhängig und wirken sich daher bei

kleiner werdenden Anlagen stärker auf die Gesamteinvestitionskosten aus. Ein hoher Technifizierungsgrad ist vor allem dort notwendig, wo aufgrund hoher Rohstoffkosten eine maximale Gasausbeute erzielt werden muss. Bei einem ungenutzten Reststoff wie Wirtschaftsdünger ist allerdings nicht die maximale sondern die kosteneffizienteste Ausbeute zu ermitteln. Es gilt kritisch zu prüfen, welche Regel- und Überwachungsparameter für den Prozess unbedingt notwendig sind.

### 6.6.1 Identifizierung der wichtigsten Investitions- und Betriebskosten von Biogasanlagen

Bei kleinen Anlagen steigen Investitions- wie auch Betriebskosten, lediglich in Bezug auf die Transportkosten können kleine Anlagen deutliche Vorteile erzielen. Auf die einzelnen Kosten von Biogasanlagen wurde bereits in Kapitel 4.1.5 eingegangen. An dieser Stelle soll diskutiert werden, welche Kosten für Kleinanlagen im speziellen vorrangig sind und welche Lösungsstrategien eventuelle für die Reduktion dieser Kosten entwickelt werden können.

Aus Abbildung 45 ist erkennbar, dass vor allem die Investitionskosten bei kleinen Anlagen einen hohen Einfluss auf die spezifischen Gasgestehungskosten haben.



**Abbildung 45: Spezifische Gasgestehungskosten eingeteilt nach Kostenkategorien in Abhängigkeit der Anlagengröße**

Quelle: Eder und Kirchweger 2011, S.15

Der Einfluss der einzelnen Kategorien der Investitionskosten für Kleinanlagen wurde bereits in Kapitel 4.1.5 angeführt und wird in Tabelle 23 noch einmal zusammengefasst.

**Tabelle 23 Anteil verschiedener Kostengruppen auf die Gesamtinvestition von Kleinanlagen**

*Quelle: eigene Darstellung nach Walla 2003*

Anlage < 25 kW <sub>el</sub>	
Gebäude und bauliche Anlagen	48 %
Technik und Installationen	38 %
Gasverwertung	14 %

Die Betriebskosten von Biogasanlagen setzen sich aus den folgenden Parametern zusammen [vgl. Eder und Kirchweger 2011, S.4]:

1. Wartung und Instandhaltung von

- Blockheizkraftwerk
- Rührwerke
- gasführende Bestandteile
- flüssigkeitsführende Bestandteile
- Gebäude und bauliche Anlagen

2. Stromzukauf

Aus den Kostenparametern der Betriebskosten ist eindeutig erkennbar, dass auch die Betriebskosten bei Kleinanlagen deutlich höher sein müssen, da vor allem die Kosten für Wartungen relativ unabhängig von der Größe des Aggregats sind.

Für Kleinanlagen wurden folgende mögliche Maßnahmen zur Reduktion der Kosten entworfen, welche in Rahmen dieser Arbeit genauer untersucht wurden.

- Reduktion der Anlagenkosten durch Nutzung der vorhanden landwirtschaftlichen Infrastruktur
- Reduktion der Betriebskosten durch wartungsarme Rührtechnik
- Maximierung des Ertrages durch optimierte Nettoenergieausbeute und optimale Gasverwertung
- Optimale Gasverwertung

Die einzelnen Punkte werden in den nachfolgenden Kapiteln detaillierter beschrieben.

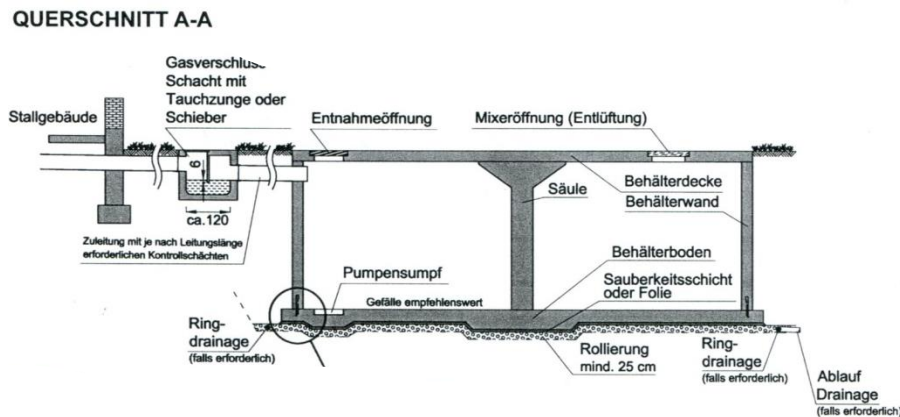
### **6.6.2 Reduktion der Anlagenkosten durch Nutzung vorhanden Infrastruktur**

Eine Möglichkeit zur Reduktion der Investitionskosten von hofintegrierten Biogaskleinanlagen ist die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur. Hier bietet sich vor allem die Gülle- oder Jauchegrube zur Nutzung als Biogasfermenter an.

#### 6.6.2.1 Rechtliche Anforderungen

Bei einem Umbau der Güllegrube sind nachfolgend beschriebene rechtliche Anforderungen zu beachten. Kleinanlagen haben derzeit das gleiche Genehmigungsverfahren wie industrielle Biogasanlagen zu durchlaufen, sodass die Nutzung der Güllegrube als Fermenter ohne Adaptierung nicht genehmigungswürdig ist. Die erste Hürde ist die unzureichende Betonqualität der Güllegrube. Nach ÖKL Merkblatt 83 sind Güllegruben in der Expositionsklasse B3 und B3 C<sub>3</sub>-A frei und Biogasanlagen in Klasse B6 C<sub>3</sub>A-frei + Beschichtung, Auskleidung oder Anstrich auszuführen [vgl. ÖKL Merkblatt 83]. Dieser minderen Betonqualität kann durch geeignete Auskleidung mit Anstrich, Folie oder Stahl gegengewirkt werden. Weiters müssten Vorkehrungen getroffen werden um die Grube als Fermenter und somit als eigenen Brandabschnitt betreiben zu können. Sollte keine bauliche Abtrennung des Brandabschnittes möglich sein, ist bei einem Rauminhalt bis 500 m<sup>3</sup> ein Mindestabstand von 10 m zu umliegenden Gebäuden einzuhalten [vgl. Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 1991]. Zu beachten ist außerdem die Zuteilung von Explosionsschutzzonen bei Biogasanlagen. So ist der Gasraum im Normalbetrieb als Zone 1 (Ausnahme Entschwefelung mit O<sub>2</sub>) klassifiziert und der Gärbehälter als Zone 2 [vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) 2007, S.33]. Dies kann beim Umbau von Güllegrube Relevanz für die Substratdosierung in den Fermenter haben. Nach Sicherheitsregeln für landwirtschaftliche Biogasanlagen ist für die Befüllung für ausreichende Tauchung zu sorgen [vgl. Bundesverband der landw. Berufsgenossenschaften e. V. 2008, S.22]. Die technische Richtlinie für die Beurteilung von Biogasanlagen (Stand der Technik) gibt eine Einmündung der Feststoffdosierung einen Meter unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche vor [vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) 2007, S.34]. In Abbildung 46 ist der Querschnitt eines Tiefbehälters zur Güllelagerung mit massiver Decke dargestellt. Deutlich erkennbar ist

die Zuleitung knapp unter der Entnahmeöffnung. Dies würde beim Umbau zu einem Fermenter nicht den Vorschriften entsprechen.



**Abbildung 46: Querschnitt eines Tiefbehälters mit massiver Decke**

*Quelle: ÖKL Merkblatt Nr.24*

### 6.6.3 Reduktion der Betriebskosten durch wartungsarme Rührtechnik

Der Inhalt von Güllegruben wird zur Homogenisierung des Gutes vor der Feldausbringung gerührt. Hierfür stehen elektrisch betriebene Tauchmotoren, elektrische oder Zapfwellen betriebene Güllemixer oder Kanalrührgeräte zur Verfügung. Der Einsatz dieser Geräte ist in Biogasanlagen nur bedingt möglich. Elektrische Tauchmotoren können eingesetzt werden, sofern diese explosionsgeschützt ausgeführt sind. Für den Betrieb in Biogasanlagen gilt aber zu beachten, dass die Rührwerksintervalle so zu wählen sind, dass es nicht zur Bildung von Schwimm- oder Sinkschichten kommt [vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) 2007, S.60]. Sinkschichten müssen verhindert werden, da diese das vorhandene Fermentervolumen reduzieren und meist nur schwer entfernt werden können. Schwimmschichten, die durch das aufschwimmen meist faseriger Bestandteile entstehen, können an der Oberfläche austrocknen und einen gasundurchlässigen Verbund bilden. Dies hat zum einen Einfluss auf die Prozessstabilität und die Gasausbeute aber auch sicherheitstechnische Relevanz, da es dadurch zur Entstehung von Überdruck im Fermenter kommen kann. Die Beanspruchung der Rührer wird bei Biogasanlagen deshalb im Gegensatz zum Einsatz in Güllegruben deutlich erhöht. Außerdem ist zu beachten, dass bei Gefahr von der Schwimmschichtbildung das Rührwerk an eine Notstromversorgung anzuschließen ist.

Alternativ zur Durchmischung mit Rührern und Motoren werden Mischungskonzepte durch wechselnde Druckverhältnisse oder Umwälzung des Gärgutes eingesetzt. Vorteil

ist das Ausbleiben wartungsintensiver Motoren bei druckgetriebenen Durchmischungskonzepten sowie kein Strombedarf für die Durchmischung beziehungsweise die bessere Zugänglichkeit der Motoren bei Umwälzung des Gärgutes [vgl. Gasser 2012]. Vergleichende Untersuchungen verschiedener Rührsysteme sind in der Literatur kaum vorhanden. Karim et al. [vgl. Karim et al 2005] haben die drei Mischkonzepte Gasrezirkulation, Rührwerk und Schlammrezirkulation sowie ein ungerührtes System mit einander verglichen. Schlammrezirkulation zeigte dabei die besten Ergebnisse. Vergleichende Studien zu Betriebs- und Wartungskosten konnten nicht gefunden werden. Hier können nur die Angaben von Anlagenbauern zitiert werden. Die Firma Sauter hebt dabei neben verminderten Energiekosten bei hohen Feststoffgehalten die Vorteile einer unvollständigen Durchmischung hervor. Bei Durchmischung mittels Schlammrezirkulation wird nur ein Teil des Gärgutes in Bewegung gehalten um die Bildung von Schwimmschichten zu vermeiden. Durch die fehlende Durchmischung des Gärgutes im Fermenter können sich verschiedene Zonen ausbilden die lokal optimale Bedingungen für den Abbau der Biomasse ermöglichen. So wurden nach den Angaben der Firma lokale Optima für Hydrolyse und Methanogenese beobachtet [vgl. Sauter und Sauter 2011].

Druckgetriebene Durchmischungssysteme machen sich die Volumenzunahme der Gasphase durch das gebildete Biogas zu nutze. Durch Blockierung des Gasweges entsteht im Reaktor ein Überdruck. Bei Erreichung eines bestimmten Druckes wird der Gasweg freigegeben und der Druck im Fermenter abgebaut. Durch diese Druckänderung kommt es zu einer Bewegung in der Flüssigphase und dadurch zu einer Durchmischung [vgl. Lee et al. 1995]. Dieser Durchmischungskonzept wird bereits für Güllekleinanlagen im Fermentersystem Bio4Gas eingesetzt [vgl. bio4gas.eu und Schön 2010].

Ausgehend von der vorhandenen Literatur und die Diskussion mit Spezialisten wird die Hypothese aufgestellt, dass für die Adaption von Güllegruben die Durchmischung mittels Schlammrezirkulation aufgrund der geringeren notwendigen Umbauten zu bevorzugen ist. Die Realisierung dieses Mischkonzeptes wurde im Rahmen der Arbeit nicht anhand von Versuchen untersucht.



#### **6.6.4 Maximierung des Ertrages durch optimierte Nettoenergieausbeute und optimale Gasverwertung**

Güllegruben sind ohne die Möglichkeit der Beheizung des Gärgutes ausgeführt. Biogasanlagen werden in der Regel mesophil oder thermophil betrieben. Bei der Umrüstung von Güllegruben zu Biogasanlagen gilt es daher zu prüfen ob die Nachrüstung einer Fermenterheizung in jedem Fall notwendig ist. Aufgrund der gesetzlich vorgeschriebenen Mindestlagerkapazität von sechs Monaten können in Güllegruben relativ lange Verweilzeiten realisiert werden. In Österreich besteht außerdem ein Ausbringverbot von Wirtschaftsdünger im Winterhalbjahr, was lange Gärzeiten bei geringen Außentemperaturen ermöglicht. Die Fermentertemperatur mit maximalen Nettoenergieertrag bei langen Verweilzeiten wurde im Rahmen dieser Arbeit ermittelt und ist in Kapitel 6.7 beschrieben.

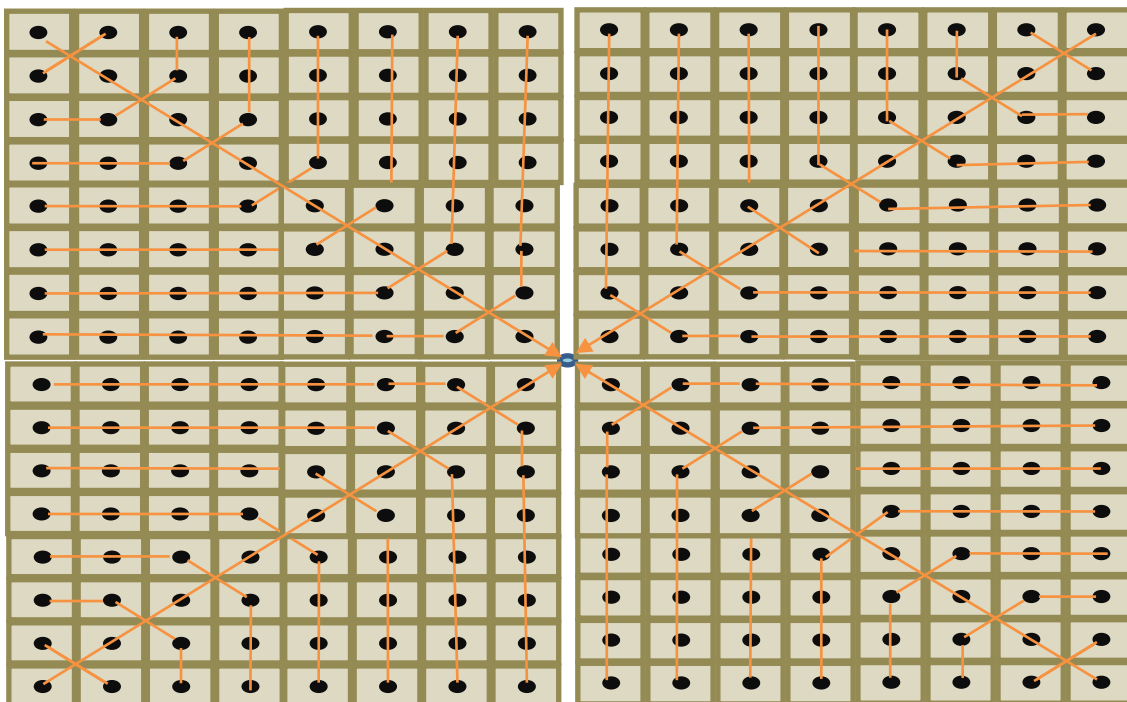
##### 6.6.4.1 Gasverwertung bei hofintegrierter Güllevergärung

Unabhängig der Optimierung der Gasausbeute ist auf hofintegrierten Kleinanlagen aufgrund der begrenzten Güllemenge in jedem Fall mit sehr geringen Gasmengen zu rechnen. Als weitere Herausforderung ergibt sich also die Verwertung des anfallenden Gases. Wie bereits in Kapitel 4 angeführt, wird in Österreich ein Großteil des Gases in Blockheizkraftwerken verbrannt und in Strom umgewandelt. Die Nutzung der Abwärme nimmt dabei bei den bestehenden Anlagen mit sinkender Größe ab [vgl. Eder und Kirchwegger 2011, S.17]. Bei kleinen BHKWs ist außerdem mit deutlich höheren Investitions- und Betriebskosten des Motors zu rechnen. Die Nutzung der Wärme ist nur für Warmwasser- und Heizwärmeerzeugung für den Eigenbedarf denkbar. Ebenfalls zu berücksichtigen ist der sinkende Wirkungsgrad des Motors bei geringer Leistung aber auch im Teillastbetrieb [vgl. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. 2011]. Optimale Verwertungskonzepte für Kleinanlagen in Europa sind derzeit nicht bekannt.

In einer Studie im Rahmen des Regio13 Projektes Biogas+ hat die TU Graz verschiedene Anlagenkonzepte zur Gülleverwertung hinsichtlich der Gasverwertung untersucht. Verglichen wurden dabei Rohstoff- und Gastransport, sowie verschiedene BHKW Größen. Die wichtigsten Daten aus dieser Untersuchung werden nachfolgend angeführt.

Für zwei steirische Regionen wurde eine vollständige Nutzung der anfallenden Rinder- und Schweinegülle angenommen. Dafür wurden die Anzahl der Höfe und die

vorhandene Güllemenge erhoben. Ein untersuchtes Kriterium war der Einfluss der Biogasanlagengröße wobei 4 verschiedene Größen (250 kW<sub>el</sub>, 160 kW<sub>el</sub>, 80 kW<sub>el</sub>, 5 kW<sub>el</sub>) verglichen wurden. Für die Anlagen wurden Investitions- und Betriebskosten sowie Gülletransportkosten erhoben. Als weiteres Kriterium wurde in die Studie die Größe des BHKWs integriert wobei sieben mögliche Größen (19 kW<sub>el</sub>, 30 kW<sub>el</sub>, 45 kW<sub>el</sub>, 150 kW<sub>el</sub>, 300 kW<sub>el</sub>, 1 MW<sub>el</sub>, 3 MW<sub>el</sub>) untersucht wurden. In der Studie wurden alle möglichen Kombinationen von Fermenter und BHKW Größe untersucht. Daraus ergibt sich je nach Szenario ein notwendiger Transport von Gülle und Biogas. Für den Transport des Gases wurden Kosten für die Errichtung einer Biogasleitung erhoben. Für anfallende Transportwege für Gülle oder Gas wurde eine gleichmäßige, sternförmige Verteilung mit quadratischer Grundfläche der Höfe angenommen um die kürzeste Strecke in Bezug auf einen Punkt zu ermitteln. Durch diese Anordnung ist die Transportstrecke jeweils minimal, aber dennoch realistischen Gegebenheiten angepasst. Eine Visualisierung der Berechnung der kürzesten Strecke ist in Abbildung 47 dargestellt.



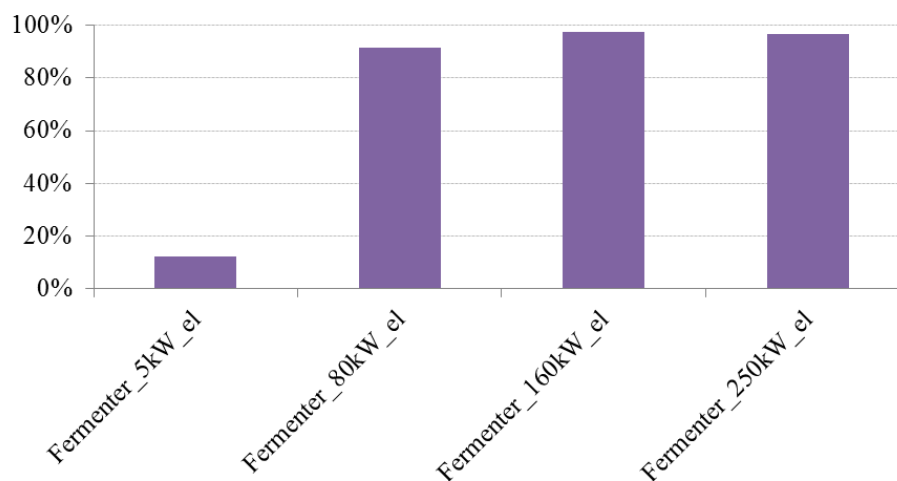
**Abbildung 47: Schema zur Berechnung der kürzesten Strecke um einen Punkt**  
*Quelle: Rosmarie Zieger TU Graz*

Die Kosten für die anaerobe Verwertung von einem Kubikmeter Gülle in Abhängigkeit von Fermenter- und BHKW-Größe wurde für verschiedene Regionen mit unterschiedlichen Betriebsstrukturen ermittelt. Ausgewählte Ergebnisse befinden sich in

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Anhang 1. Zu beobachten ist der Skaleneffekt der Investitionskosten bei Blockheizkraftwerken, eine möglichst zentrale Verwertung ist anzustreben. Die Größenabhängigkeit der Investitionskosten des Fermenters spielt keine Rolle, da die jährlichen Transportkosten die Abschreibung der Investitionskosten um ein vielfaches übersteigen. Die ermittelten Kosten je Kubikmeter Gülle bei Vergärung in Kleinanlagen liegen in etwa bei 40 €. Ein Kubikmeter Gülle entspricht in etwa einem Netto-Methanertrag von 16,7 m<sup>3</sup> Methan (vgl. Kapitel 6.4.1) woraus Gasgestehungskosten von 2,39 € je m<sup>3</sup> Methan oder auch 3,63 € je kg Methan entstehen. Vergleicht man das mit einem Erdgas Arbeitspreis von zirka 35 €cent m<sup>-3</sup> oder einem CNG Preis von 0,919 € kg<sup>-1</sup> erkennt man, dass die Verwertung von Gülle derzeit nicht konkurrenzfähig ist

Trotz höherer Investitionskosten ist die Vergärung in Kleinanlagen bei Gülle zu bevorzugen. Dies resultiert aus den geringeren Transportkosten für Gas gegenüber dem Straßentransport für Gülle. Ausgewählte Ergebnisse zum Anteil der Transportkosten an den Gesamtkosten bei der Verwertung der Gülle in einer Region sind in Abbildung 48 dargestellt.



**Abbildung 48** Anhängigkeit der Transportkosten an den Gesamtkosten bei der Verwertung von der gesamten Gülle in einer Region in einem 300 kW<sub>el</sub> BHKW

*Quelle: eigene Darstellung*

Die gewonnenen Erkenntnisse kann man auch auf andere Gasverwertungstechnologien übertragen. Bei der Verwertung als Treibstoff wäre es in einer viehreichen Region also anzustreben, dass viele Kleinanlagen Gas für eine zentrale Aufbereitungsanlage zur

Verfügung stellen. Lediglich die Investitionskosten der Fermenter sind noch deutlich zu senken.

## **6.7 Ermittlung der optimalen Fermentationstemperatur für die hofintegrierte anaerobe Vergärung von Wirtschaftsdünger – eigene Versuche und Ergebnisse**

Wie in Kapitel 6.6.4 erwähnt ist für die hofintegrierte Biogaserzeugung in jedem Fall die Fermentationstemperatur mit dem größten Nettoenergieertrag zu ermitteln. Eine vorrausgehende Literaturanalyse hat gezeigt, dass die Literaturangaben für eine Temperaturoptimierung zu lückenhaft sind. Daher mussten im Rahmen dieser Arbeit Laborversuche durchgeführt werden, die die Grundlage für die Ermittlung des Temperaturoptimums bilden. In den nachfolgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der Versuche sowie die darauf aufbauende Optimierungsrechnung dargestellt.

### **6.7.1 Literaturanalyse**

Aus der Literatur ist bereits bekannt, dass messbare Methanproduktion bei einer Temperatur von 3-9°C beginnt und mit steigender Temperatur die Biogasausbeute maximiert werden kann [vgl. Cullimore et al. 1985]. Allerdings reduziert der Wärmebedarf der Fermenterheizung den Nettoenergieertrag einer Biogasanlage, es ist daher für jede Anlage die optimale Fermentertemperatur mit dem höchsten Nettoenergieoutput zu bestimmen. Ebenfalls gezeigt wurde, dass längere Verweilzeiten höhere Biogasaubeuten nach sich ziehen. Fermentation bei tiefen Temperaturen, oder auch psychrophile Fermentation, war bereits Inhalt mehrerer Untersuchungen. Einen guten Überblick schaffen die beiden Reviewartikel von Dhaked et al. und Kashyap et al. [vgl. Kashyap et al. 2003; Dhaked et al. 2010]

Aus der Literatur konnten folgende Erkenntnisse übernommen werden (einige Beispiele vorhandener Literatur werden angegeben):

- psychrophile Fermentation ist möglich [vgl. Safley und Westerman 1990; Safley und Westerman 1995; Massé 1995; Lo und Liao 2003; Côté 2005; Massé 2003]
- der Biogasertrag in unbeheizten Anlagen in Asien geht bei gleichbleibender Verweilzeit in der kalten Jahreszeit deutlich zurück [vgl. Kalia und Kanwar 1989; Khoiyangbam et al. 2004; Ferrer et al. 2009]
- steigende Temperatur führt zu einem höheren Biogasertrag [vgl. Chae et al. 2008]

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

- bei psychophilen und mesophilen Bedingungen besteht zwischen Biogasertrag und Verweilzeit ein linearer Zusammenhang [vgl. Boodoo et al. 1977]
- wie sich rasche Änderungen in der Temperatur auf den Biogasertrag von Gülle auswirken [vgl. Massé et al. 2003]
- bei psychophilen Bedingungen können ähnliche Biogaserträge wie bei mesophilen Bedingungen erreicht werden, wenn die Verweilzeit deutlich verlängert wird [vgl. Stevens und Schulte 1979]

Für die Ermittlung der optimalen Fermentertemperatur bei Kleinanlagen fehlten vor allem Daten für sehr lange Verweilzeiten. Vor allem bei mesophilen Bedingungen lagen nur Daten bis 40 Tage Verweilzeit vor. Auch fehlte der direkte Vergleich von mesophiler und psychrophiler Fermentation desselben Substrates. Lediglich Stevens und Schulte [vgl. Stevens und Schulte 1979] haben in ihrer Arbeit Temperaturen zwischen 4 und 25°C mit dem Biogasertrag bei 40°C verglichen. In dieser Arbeit wurde aber nur bei den tiefen Temperaturen die Verweilzeit variiert.

Um diese Lücke in den Literaturergebnissen zu schließen wurden eigene Laborversuche bei variierender Temperatur und Verweilzeit durchgeführt. Die Ermittlung der Temperatur mit dem größten Nettoenergieertrag wurde dadurch möglich.

### **6.7.2 Substratcharakterisierung**

Flüssige Rindergülle wurde periodisch auf einem Milchviehbetrieb in Katsdorf (Oberösterreich) gesammelt. Die am Hof vorhandene Güllelagerung erfolgt in einer offenen Güllegrube. Auf diesem Betrieb gelangt frische Gülle über die Oberfläche anhand einer Schrappentmischung in die Grube. Um der Grube möglichst frische Gülle entnehmen zu können, erfolgte die Entnahme unmittelbar unter der Führschiene des Schrappers. Zu diesem Zwecke wurde ein 10 Liter Eimer an einem Seil mit Hilfe einer Eisenstange zirka einen Meter unter die Flüssigkeitsoberfläche gedrückt und der volle Kübel aus der Grube gezogen. Entnommene Gülle wurde in 15 Liter fassenden verschließbaren Kunststoffeimern gesammelt und umgehend nach Wels ins Labor transportiert. Die Gülle wurde im Kühlschrank bei 4°C gelagert. Aufgrund eines über das Jahr schwankenden Trockenmassegehaltes der Gülle wurde die Gülle für die Versuche auf einen Trockenmassegehalt von 50 g kg<sup>-1</sup> eingestellt. Der Trockenmassegehalt wurde durch Parameter wie Wetter (Verdünnung der Gülle durch Regenwasser) oder Durchmischung der Güllegrube kurz vor Probenentnahme

beeinflusst, auf welche nur bedingt Rücksicht genommen werden konnte. Der organische Anteil der Trockenmasse zeigte jedoch keine jahreszeitlichen Unterschiede und wurde mit 75-80 % bestimmt. Auch der CSB Gehalt und der FOS/TAC Wert der verdünnten Gülle war konstant und wurde mit  $71,7 \text{ g L}^{-1}$  beziehungsweise 0,93 bestimmt.

### **6.7.3 Ermittlung des Biogaspotentials von Rindergülle bei verschiedenen Temperaturen und Verweilzeiten**

Die Ermittlung des Biogaspotentials wurden in den in Kapitel 5.1.2 beschriebene 12 L Laborreaktoren durchgeführt. Zum Anfahren der Anlage wurde das System mit verdünnter Rindergülle im Batch-Betrieb betrieben bis ein konstanter pH-Wert und eine sinkende Gasproduktion beobachtet werden konnte. Anschließend erfolgte eine tägliche Fütterung der Anlagen mit steigender Substratmenge bis eine Verweilzeit von 33 Tagen und eine organische Belastung der Reaktoren von  $1,18 \text{ g}_{\text{OTS}} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  erreicht wurde. Die organische Belastung der Reaktoren wurde anhand folgender Überlegungen bestimmt. Der durchschnittliche Trockenmassegehalt der Gülle wurde mit  $50-100 \text{ g kg}^{-1}$  festgelegt. Die mittlere organische Fraktion der Trockenmasse wurde mit 0,7 bestimmt. Die durchschnittlich anfallende monatliche Güllemenge je GVE Rind ist nach den in Kapitel 6.2.1 angegebenen Zahlen  $1,92 \text{ m}^3$ . Diese Zahlen führen zu einer durchschnittlichen organischen Belastung des Fermenters für hofintegrierte Vergasung als Monofermentation von  $1,06 - 2,12 \text{ g}_{\text{OTM}}$  bei einer Verweilzeit von 33 Tagen.

In den Versuchen wurden folgende Parameter variiert:

- Verweilzeit (bei gleicher Raumbelastung): 33, 66, 99, 129 Tage
- Temperatur: 15, 20, 30, 38 °C

Das System konnte sich nach Änderung eines Versuchsparameters einen Monat stabilisieren bevor die Daten für die Auswertung aufgezeichnet wurden. Gasproduktionsdaten wurden über 25-30 Tage aufgezeichnet.

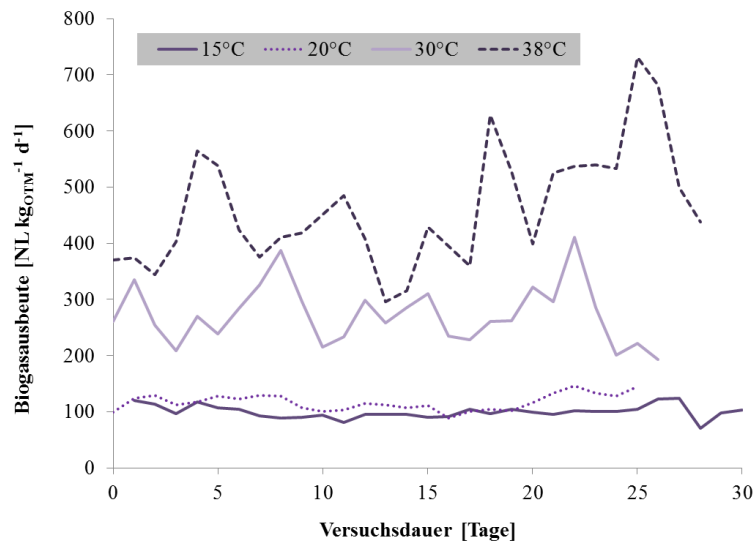
Die in den Versuchen bestimmten Biogaspotentiale sind in Tabelle 24 zusammengefasst. Alle Versuche zeigten einen stabilen anaeroben Abbau, es konnte keine Prozessinhibierung beobachtet werden. Der durchschnittliche Methangehalt im Biogas war in allen Versuchen 54 % ( $\pm 1.6 \%$ ).

**Tabelle 24 Biogasertag von Rindergülle in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit**

Quelle: eigene Darstellung

Temperatur [°C]	Verweilzeit [Tagen]	Raumbelastung [ $\text{g}_{\text{OTM}} \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ]	Biogasertag [ $\text{L kg}_{\text{OTM}}^{-1}$ ]
15	33	1,182	69
15	66	0,591	83
19	33	1,182	131
20	66	0,591	192
20	99	0,394	314
20	132	0,296	359
30	33	1,182	276
30	66	0,591	367
30	99	0,394	463
38	16,7	1,182	342
40	33	1,182	462
38	66	0,591	567

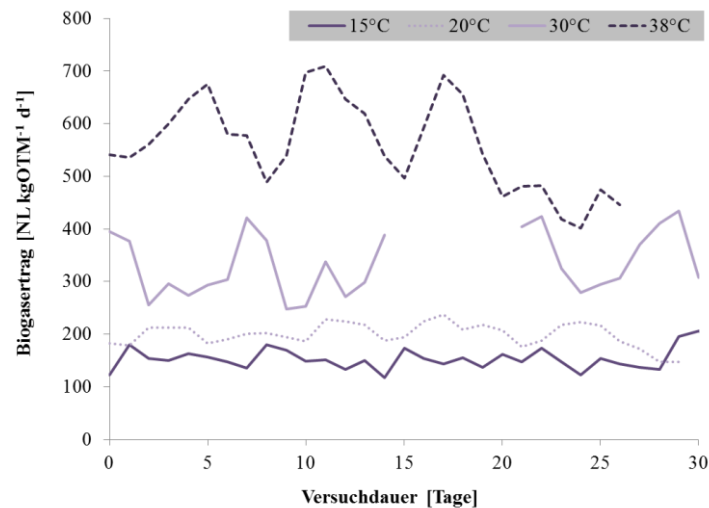
Die tägliche Biogasproduktion in L pro  $\text{kg}_{\text{OTM}}$  ist für 33 und 66 Tage Verweilzeit für Temperaturen zwischen 15 und 38°C in den Abbildungen 39 und 40 dargestellt.



**Abbildung 49 Tägliche Biogasproduktion bei verschiedenen Prozesstemperaturen und einer Verweilzeit von 33 Tagen.**

Quelle: eigene Darstellung

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -



**Abbildung 50 Tägliche Biogasproduktion bei verschiedenen Prozesstemperaturen und einer Verweilzeit von 66 Tagen.**

*Quelle: eigene Darstellung*

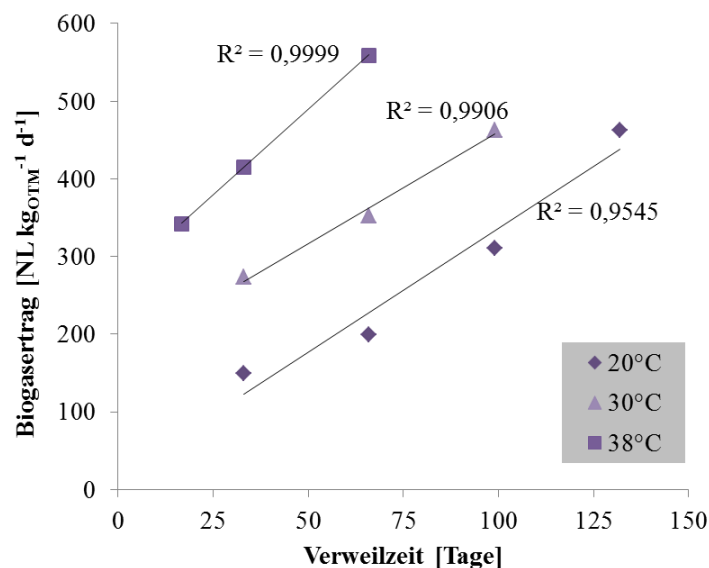
Eine signifikante Steigerung des produzierten Biogases mit steigender Temperatur konnte bei beiden Verweilzeiten beobachtet werden. Der Punkt der maximalen Ausbeute konnte in den Versuchen nicht nachgewiesen werden. Es ist nicht sicher, ob noch längere Verweilzeiten zu noch höheren Ausbeuten führen können. Ein ähnlicher Biogasertrag wie der ermittelte maximale von 567 NL je  $\text{kg}_{\text{OTM}}$  bei einer Verweilzeit von 66 Tagen konnte von Linke und Mähner bei der Monovergärung von Rindergülle ermittelt werden [vgl. Linke und Mähner, S.9]. Von ihnen wird außerdem ein im Batch-Gärtest ermittelter maximaler Biogasertrag von  $610 \text{ NL kg}_{\text{OTM}}^{-1}$  angegeben [vgl. Linke und Mähner, S.9]. Das deutet darauf hin, dass durch weitere Verweilzeitverlängerung nur noch geringe Ausbeutesteigerungen erreicht werden können. Die hohen Ausbeuten im Versuch, im Vergleich zu Werten aus der Literatur [vgl. Schwab und Reinhold] ( $340 \text{ NL je kg}_{\text{OTM}}$ ) können durch die geringe Raumbelastung im Versuch erklärt werden. Linke und Mähner haben in ihren Versuchen einen Biogasertrag von ungefähr  $340 \text{ NL}$  bei einer Raumbelastung von  $3 \text{ g}_{\text{OTM}} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  ermittelt [vgl. Linke und Mähner, S.9].

Für Fermentationstemperaturen von  $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  und  $38^\circ\text{C}$  wurde der Biogasertrag in Abhängigkeit der Verweilzeit ermittelt. Für alle Temperaturen wurde ein annähernd linearer Zusammenhang bestimmt. Stevens und Schulte [vgl. Stevens und Schulte 1979] fanden in ihrer Arbeit einen logarithmischen Zusammenhang wohingegen Boodoo et al. [vgl. Boodoo et al. 1977] ebenfalls einen linearen Zusammenhang bestimmten. Auch Safley und Wasterman [vgl. Safley und Wasterman 1994] bestätigen eine lineare



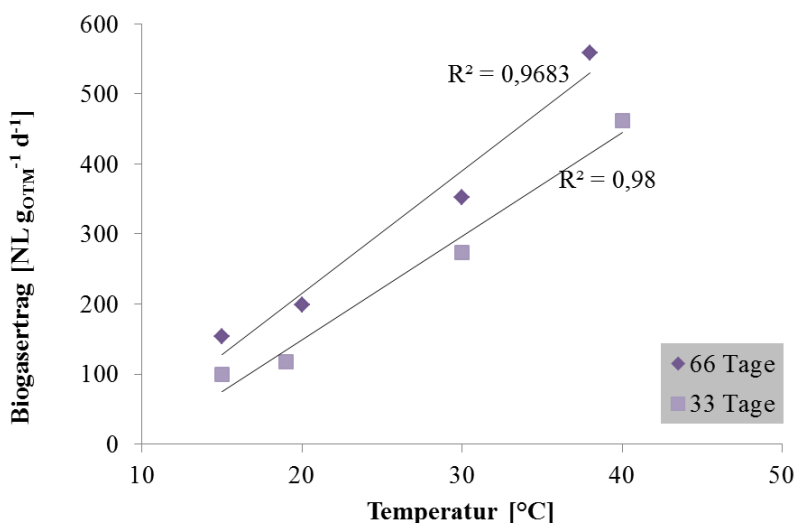
- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Abhängigkeit bei Temperaturen zwischen 10 und 23°C und berichten bei doppelter organischer Raumbelastung vergleichbare Biogaserträge für mesophile Prozessbedingungen. Die eigenen Versuchsergebnisse sind in Abbildung 51 dargestellt.



**Abbildung 51 Biogasertrag in Abhängigkeit der Verweilzeit**  
Quelle: eigene Darstellung

Die Abhängigkeit des Biogasertrages von der Temperatur bei gleichbleibender Verweilzeit wurde ebenfalls mit einer linearen Funktion bestimmt. Die Erträge folgen dabei den Gleichungen  $y = 15.003 x - 147.28$  bei 33 Tagen und  $y = 20.926 x - 229.59$  bei 66 Tagen Verweilzeit, wobei für  $x$  die Temperatur in °C einzusetzen ist. Dieser Zusammenhang wird durch die Ergebnisse von Safley und Wasterman [vgl. Safley und Wasterman 1994, S.169f]. bestätigt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 52 dargestellt.



**Abbildung 52 Biogasertrag in Abhängigkeit der Temperatur**  
Quelle: eigene Darstellung

#### 6.7.4 Ermittlung der durchschnittlichen Fermentertemperatur

In Österreich schwanken die Außentemperaturen über das Jahr signifikant. Um die notwendige Energie für die Fermenterheizung berechnen zu können, ist es notwendig die Temperatur im Reaktor im Verlauf des Jahres zu kennen. Für die Ermittlung dieser Größe wurde die Temperatur in einer Güllegrube ermittelt. Gewählt wurde eine im Boden versenkte Güllegrube mit Betondecke, um möglichst realitätsnahe Bedingungen zu simulieren. Die Güllegrube befand sich auf einem Schweinemastbetrieb in Neukirchen bei Lambach, Oberösterreich. Die Grube war nicht isoliert. Die Temperatur wurde mittels Datenlogger ELV WTDL 1 an drei verschiedenen Stellen (in Bodennähe, auf mittlerer Höhe, und etwa 50 cm unter dem Flüssigkeitshöchststand) aufgezeichnet. Temperaturdaten wurden alle 3 Minuten aufgezeichnet. Die Messung wurde über 6 Monate durchgeführt (November und Dezember; März bis Juli), es konnte dadurch eine hohe Variabilität an Außentemperaturen beobachtet werden. Die gemessenen Grubentemperaturen wurden mit den Außentemperaturen gemessen an der Messstelle der BOKU-Wien verglichen [vgl. BOKU 2013].

Die erhaltenen Messdaten im Vergleich zu der Außentemperatur sind in Abbildung 53 dargestellt.

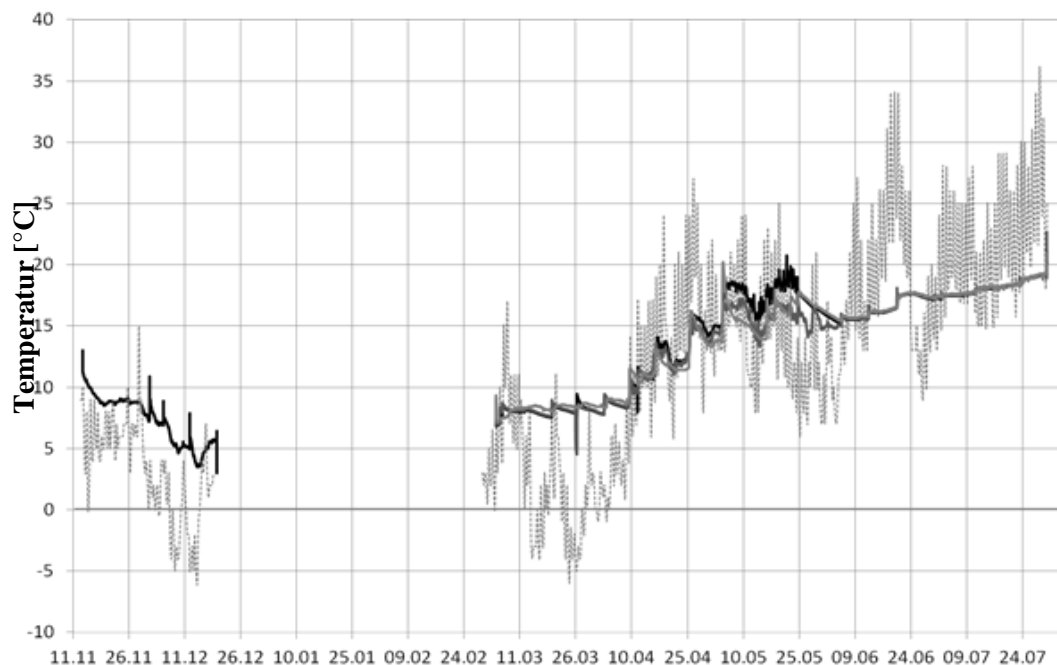


Abbildung 53 Vergleich der Außentemperatur (gepunktete Linie) mit der Fermentertemperatur gemessen an drei Stellen

Quelle: eigene Darstellung

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Im Winter fallen die Temperaturen in der Grube nicht unter 5-8 °C selbst wenn Außentemperaturen bis -5°C gemessen wurden. Zwischen 10-20 °C folgt die Grubentemperatur im Wesentlichen der Außentemperatur. Wenn die Außentemperatur im Sommer noch weiter ansteigt, kann eine Isolationsfunktion des Bodens beobachtet werden. Die Grubentemperaturen steigen nur noch gering und nicht über 20°C hinaus. Es konnten keine signifikanten Unterschiede der Temperaturen in der Grube an den drei Messstellen beobachtet werden.

**6.7.5 Ermittlung der optimalen Fermentertemperatur**

Die Ermittlung der optimalen Fermentertemperatur wurde anhand der ermittelten Labordaten und den Funktionen aus Abbildung 51 und Abbildung 52 durchgeführt. Die Daten wurden mit geometrischen Daten von Kleinbiogasanlagen und Wärmebedarfsrechnungen kombiniert, um eine optimale Fermentertemperatur mit maximaler Nettogasausbeute zu berechnen. Dabei wurde eine tägliche Güllemenge von einem Kubikmeter, mit einem OTM Gehalt von 50 kg m<sup>-3</sup> als Inputgröße festgelegt. Die Optimierung wurde bei konstanter Außentemperatur durchgeführt.

**Tabelle 25 Wichtige Inputgrößen für die Temperaturoptimierung**

*Quelle: eigene Darstellung*

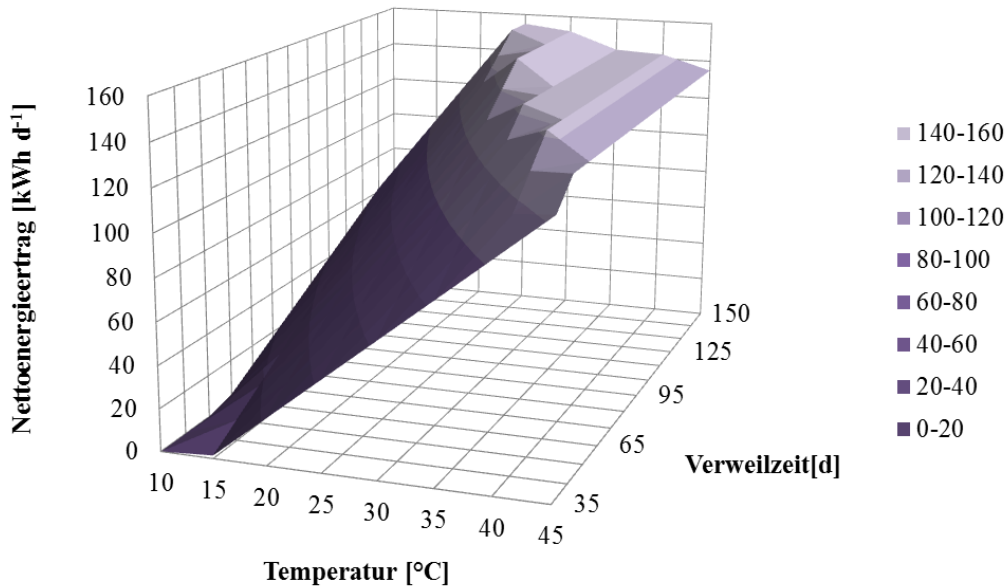
	Eingangsgröße
Substratinput Gülle	1 m <sup>3</sup> pro Tag
OTM der Gülle	50 kg pro m <sup>3</sup>
Temperatur Boden und Gülle (Sommer)	20 °C
Temperatur Boden und Gülle (Winter)	5 °C
k-Wert isolierter Fermenter	0,243 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
C <sub>p</sub> -Wert Gülle	3,951 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Grubendimension	H:D = 1:2
Biogasertrag	laut Zusammenhang Verweilzeit und Temperatur aus eigenen Laborversuchen

Es wurden winterliche (Boden- und Gülletemperatur 5°C) und sommerliche (Boden- und Gülletemperatur 20°C) Bedingungen untersucht. Als Randbedingung wurde ein maximal möglicher Biogasertrag von 570 NL kg<sup>-1</sup><sub>OTM</sub> festgelegt. Wärmeverluste wurden über den Boden und den Mantel des Fermenters berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass der Fermenter isoliert ausgeführt wird. Die Fermentergröße ändert

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

sich je nach notwendiger Verweilzeit. Das Verhältnis Durchmesser zu Höhe wurde mit 2:1 festgelegt. Alle wichtigen Inputgrößen der Berechnung sind in Tabelle 25 zusammengefasst.

Die Ergebnisse bei winterlichen Bedingungen sind in Tabelle 26 und Abbildung 54 dargestellt.



**Abbildung 54 Ergebnisse der Temperaturoptimierung bei winterlichen Bedingungen**  
*Quelle: eigene Darstellung*

**Tabelle 26 Nettoenergieertrag in kWh pro Tag**  
*Quelle: eigene Darstellung*

	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
35	1	22	42	62	83	103	123	
45	10	31	52	73	95	116	137	
55	18	40	62	85	107	129	137	
65	3	26	49	73	96	119	142	137
75	10	35	59	83	107	131	142	137
85	18	43	68	93	118	143	142	137
95	25	51	77	103	130	143	142	137
105	32	60	87	114	141	143	142	137
115	40	68	96	124	152	143	142	137
125	47	76	105	134	152	143	142	137
135	55	85	115	145	152	143	142	137
145	62	93	124	155	152	143	142	137
150	66	97	129	155	152	143	142	137

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Die maximale Energieausbeute konnte bei einer Temperatur von 25°C und einer Verweilzeit von 145 Tagen erreicht werden. Berücksichtigt man die angestrebte Nutzung der vorhandenen Infrastruktur ist maximal eine Verweilzeit von 92 Tagen erreichbar<sup>3</sup>. Das Temperaturoptimum verschiebt sich dadurch nach oben und liegt bei 35-40°C.

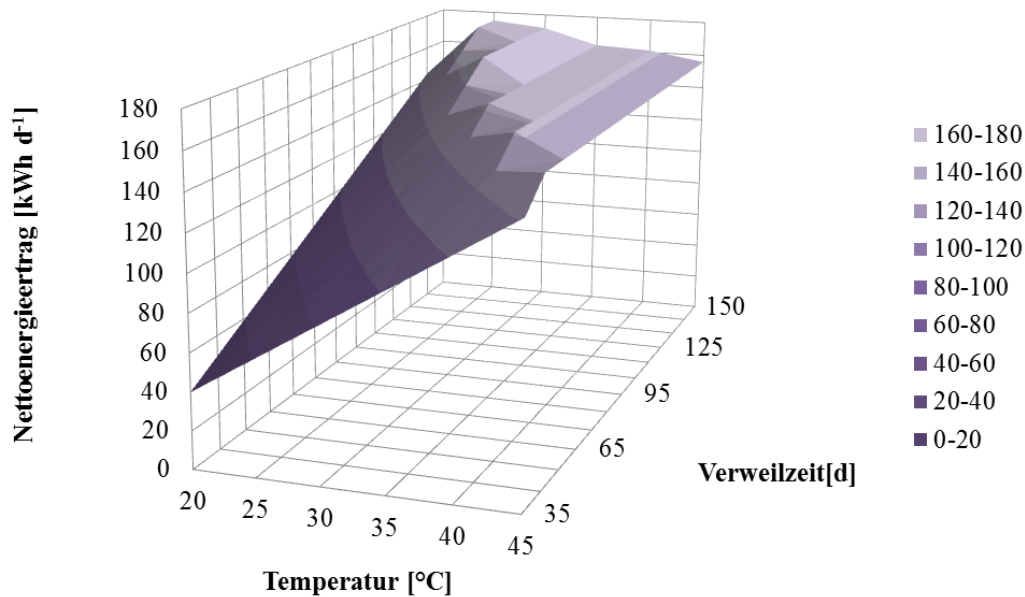
Die Ergebnisse bei sommerlichen Temperaturen führen zum gleichen Ergebnis. Lediglich die Nettoenergieausbeuten sind aufgrund geringerer Wärmeverluste und einem geringeren Wärmebedarf zum Aufheizen der Gülle erhöht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 27 und Abbildung 55 dargestellt.

**Tabelle 27 Nettoenergieertrag in kWh pro Tag**

*Quelle: eigene Darstellung*

	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
35	40	60	81	101	121	142
45	50	71	92	113	135	156
55	59	81	103	126	148	156
65	68	92	115	138	161	156
75	78	102	126	150	161	156
85	87	112	138	163	161	156
95	97	123	149	163	161	156
105	106	133	160	163	161	156
115	116	144	172	163	161	156
125	125	154	172	163	161	156
135	134	164	172	163	161	156
145	144	175	172	163	161	156
150	149	175	172	163	161	156

<sup>3</sup> ergibt sich aus Lagerkapazität 6 Monate und einer mittleren Verweilzeit von 3 Monaten (=92 Tage) bei sofortiger Ausbringung im Frühjahr



**Abbildung 55 Ergebnisse der Temperaturoptimierung bei sommerlichen Bedingungen**

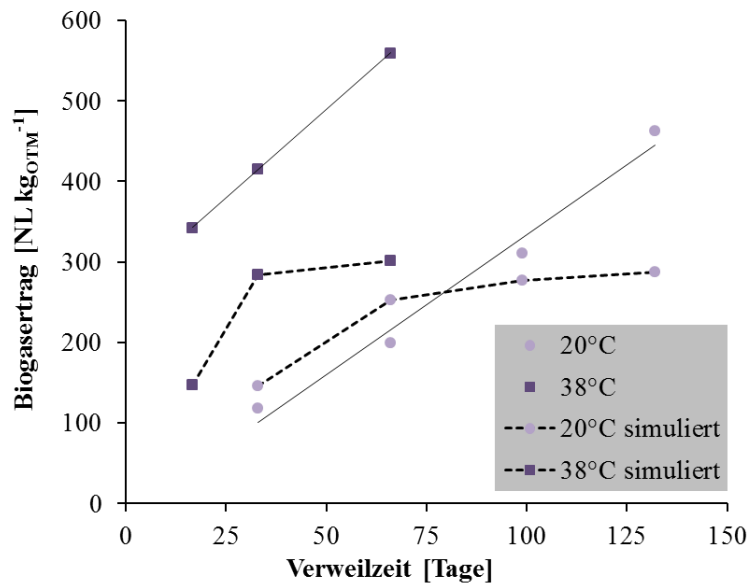
*Quelle: eigene Darstellung*

Es konnte gezeigt werden, dass auch bei langen Verweilzeiten mesophile Bedingungen klar im Vorteil sind. Die Mehrerträge der besseren Abbaubarkeit übersteigen den Wärmebedarf für das Aufheizen der Gülle und die Wärmeverluste deutlich. Die Nettoenergieausbeute erreicht bei etwa 30°C ihr Maximum. Höhere Temperaturen bringen keinen Vorteil. Lediglich bei verkürzter Verweilzeit sind noch höhere Temperaturen zu bevorzugen. Alle Aussagen aus der Literatur konnten bestätigt werden. Durch die eigenen Laborversuche konnten diese Erfahrungen verknüpft werden und eine Temperaturoptimierung der Fermentation war möglich. Ein Verzicht auf Fermenterheizung kann nicht empfohlen werden.

#### **6.7.6 Erweiterung des Systems durch Simulation**

Die Laborversuche wurden ausschließlich mit Rindergülle durchgeführt. Die Ergebnisse für andere Güllearten sollten durch Simulation ermittelt werden. Zum Einsatz kam das unter Punkt 5.1.4 beschriebene mathematische Modell von Hill. Simulationen stützen sich immer auf Annahmen hinsichtlich einiger in den Modellen notwendigen Konstanten, welche über den Vergleich mit realen Messergebnissen kalibriert werden. In Abbildung 56 sind die Simulationsergebnisse und die Ergebnisse aus den Laborversuchen dargestellt.

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -



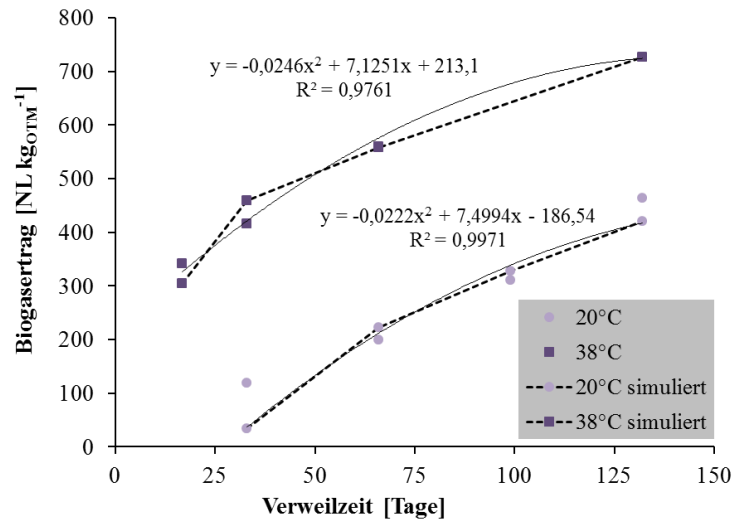
**Abbildung 56 Vergleich von Simulationsergebnissen nach Hill und Laborergebnissen**  
*Quelle: eigene Darstellung*

Es ist deutlich zu erkennen, dass es zwischen den Werten keine gute Übereinstimmung gibt. Besonders auffällig ist die maximale Biogasausbeute von nur 300 NL kg<sub>OTM</sub><sup>-1</sup>, in der Simulation, welche in keinem Fall dem im Versuch ermittelten Wert entspricht. Durch die Prüfung der im Modell notwendigen Konstanten und deren Einfluss auf die maximale Biogasausbeute konnte die Konstante  $B_0$  (siehe Gleichung 22) als mögliche Verantwortliche für die große Abweichungen identifiziert werden.  $B_0$  bezeichnet die maximale Abbaubarkeit organischer Masse wenn die Verweilzeit gegen Unendlich geht.  $B_0$  besitzt im Modell einen konstanten Wert. Für Rindergülle wird ein Abbaugrad von 0,36 angegeben. Diese Annahme scheint für lange Verweilzeiten bei höheren Temperaturen unrealistisch. Es wurde versucht diese Konstante durch eine Funktion in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur zu ersetzen. Aufgrund der vorhandenen Labordaten konnte die nachfolgende Gleichung ermittelt werden:

$$B_0 = 0.0026 DT + 0.047 \cdot \exp(0.0598 \cdot T) \quad (22)$$

Für Rindergülle ergeben sich dabei die in Abbildung 57 dargestellten empirischen Ergebnisse der Simulation, im Vergleich zu den realen Messdaten. Die Abhängigkeit von  $B_0$  von Zeit und Temperatur ergibt eine polynomische Funktion welche im beobachteten Zeitraum nahezu linear erscheint. Diese Funktion wurde empirisch ermittelt für bessere Genauigkeit des Systems müssten die Laborergebnisse noch um weitere Daten ergänzt werden. Vor allem die Randbedingungen der Funktion sind noch festzulegen (maximaler Biogasertrag). Außerdem muss das Modell von Hill auch für

andere Güllearten modifiziert werden, um für eine Systemerweiterung genutzt werden zu können.



**Abbildung 57 Vergleich von Simulationsergebnissen nach Hill und Laborergebnissen nach Anpassung des Wertes  $B_0$  als Funktion von Zeit und Temperatur**  
*Quelle: eigene Darstellung*

## 6.8 Ökologische Bewertung hofintegrierter Güllevergärung

Das aufgrund von infrastrukturellen und ökonomischen Gegebenheiten entworfene Anlagenkonzept sollte im Rahmen dieser Arbeit auch ökologisch bewertet werden. Diese Bewertung erfolgte unter Zuhilfenahme der Berechnung eines ökologischen Fußabdruckes nach der Methode des Sustainable Process Index mit dem online Tool der TU Graz SPIONWeb. Die Durchführung der Analyse sowie die erhaltenen Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

### 6.8.1 Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen

In der durchgeführten Analyse sind zwei Ziele zu unterscheiden:

- Ermittlung des ökologischen Mehrwertes durch anaerobe Güllevergärung
- Vergleich des ökologischen Einflusses von Güllevergärung in zentralen Großanlagen versus hofbasierten Kleinanlagen

Um diese Fragen beantworten zu können, wurde der Untersuchungsrahmen wie folgt festgelegt:

Als funktionelle Einheit der Bewertung wurde der österreichische Durchschnittslandwirt wie unter 6.2.1 beschrieben festgelegt, wobei der Einfluss der Betriebsgröße im Rahmen der Sensitivitätsanalyse diskutiert wurde.



## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Die ökologische Bewertung erfolgte für die beiden Systeme Rinderhaltung und Schweinehaltung.

Als zeitlicher und örtlicher Bezugspunkt wurden das Jahr 2014 und Österreich festgelegt.

4 Arten der Güllelagerung und Verwertung wurden miteinander verglichen.

System 1: Lagerung der Gülle in einer offenen Güllegrube, Ausbringung der Rohgülle mittels Schleppschlauch.

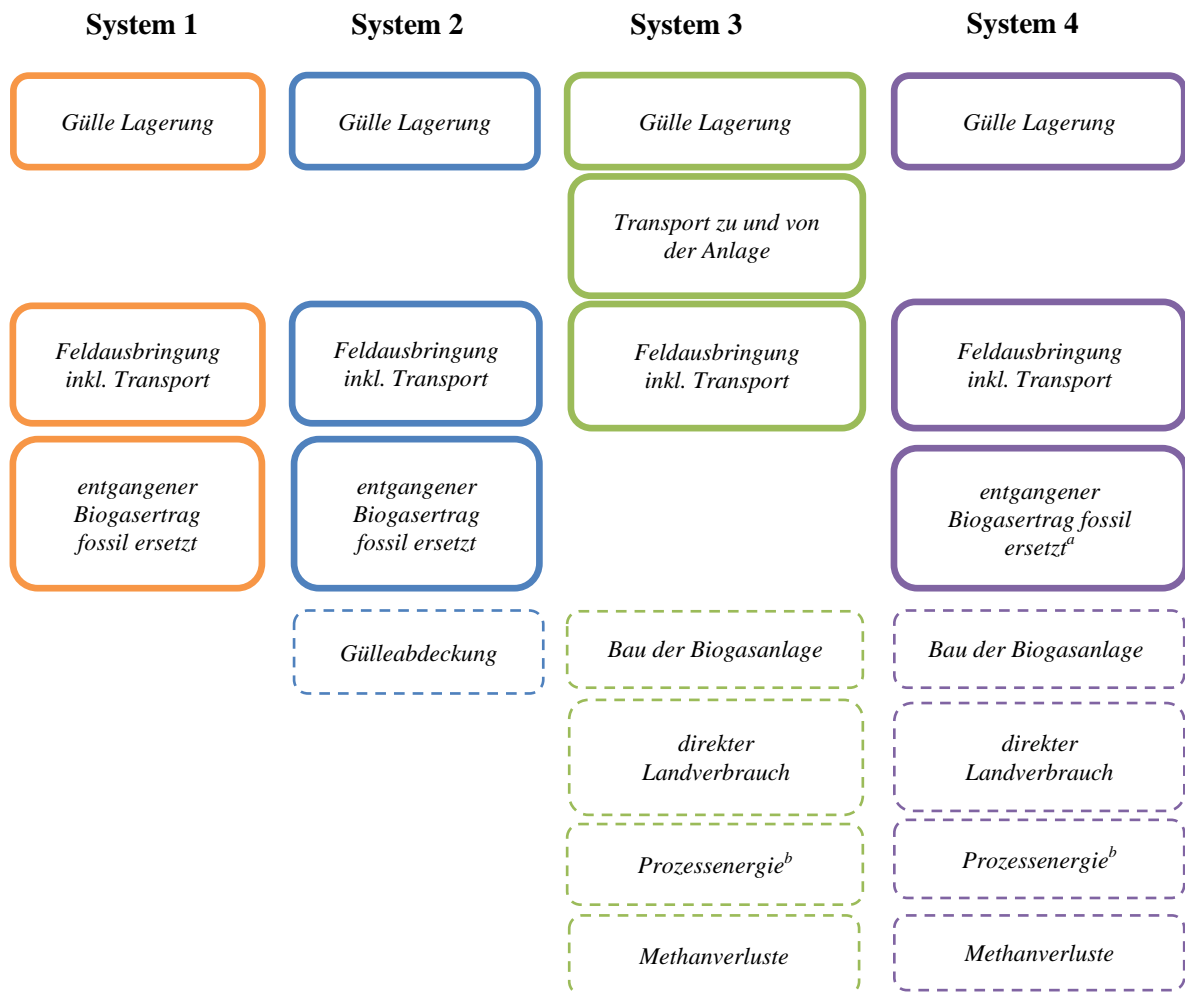
System 2: Abdeckung der vorhandenen Güllegrube mit einer Betondecke um die Lageremissionen zu minimieren, Ausbringung der Gülle mittels Schleppschlauch.

System 3: Vergärung der Rohgülle in einer zentralen Biogasanlage mit ca. 70 kW<sub>el</sub> Leistung und abgedecktem Endlager, Transport der Gülle zur Anlage mittels LKW, Ausbringung der Gülle mit Schleppschlauch.

System 4: Vergärung der Rohgülle in einer hofbasierten Kleinanlage mit kombiniertem Fermenter und Endlager, Ausbringung der Gülle mittels Schleppschlauch.

Die Produktion der Gülle und somit die Emissionen der Tierhaltung wurden in der Analyse nicht berücksichtigt, der Eintritt der Gülle in die Güllegrube wurde als Ausgangspunkt der Bewertung definiert. In allen Systemen wurde ein einheitlicher Methaneinsatz angenommen. Nicht produziertes Biomethan wurde durch Erdgas ersetzt. Eine Verwertung des Gases wurde nicht berücksichtigt. Auswirkungen auf den Düngereinsatz am Betrieb durch Fermentation wurden aufgrund widersprüchlicher Daten in der Literatur nicht berücksichtigt.

Für alle Prozesse wurden die Lagerung, der Transport und die Feldausbringung der Gülle bewertet. Es wurden dabei direkte im Prozess entstehende Emissionen aber auch indirekte Emissionen von notwendigen Vorprozessen berücksichtigt. Notwendige infrastrukturelle Veränderungen und dadurch entstehende Emissionen wurden über einen Zeitraum von 20 Jahren abgeschrieben. Erzeugtes Biogas in System 3 und 4 wurde in System 1 und 2 durch die äquivalente Menge Erdgas ersetzt. Ebenso wurde eine geringere Biogasausbeute in der Kleinanlage berücksichtigt und die fehlende Menge durch Erdgas ausgeglichen. Eine Übersicht über die bewerteten Systeme befindet sich in Abbildung 58.



a....zu berücksichtigen wegen geringerer Nettoenergieausbeute als System 3

b...nur Strom Wärmebedarf wird als Reduktion des Biogasertrages (Nettoertrag) berücksichtigt

**Abbildung 58 Systemgrenzen der untersuchten Prozesse zur Gülleverwertung**  
Quelle: eigene Darstellung

### 6.8.2 Sachbilanz

Daten für direkt anfallende Emissionen und Ressourcenverbräuche wurden durch Literaturrecherche bestimmt und werden nachfolgend an passender Stelle angeführt. Alle für den Prozess notwendigen Teilprozesse wurden der ecoinvent Datenbank v2.0 entnommen. In der vorliegenden Arbeit wird für diese Prozesse lediglich der Name des verwendeten ecoinvent Datensatzes angeführt. Details können in Jungbluth et al. [vgl. Jungbluth et al. 2007] nachgelesen werden. Falls Änderungen an den Datensätzen vorgenommen wurden wird speziell darauf verwiesen.

Wichtige Grundlage für die Sachbilanz des Prozesses war die im Kapitel 6.2.1 beschriebene jährlich anfallende Güllemenge sowie die Bestandsgröße eines Durchschnittslandwirtes der beiden Systeme Rinder- und Schweinehaltung. Diese Größen

sind hier nochmals angeführt, 25 GVE Rinder mit 16,4 m<sup>3</sup> Gülle pro GVE und Jahr und 44 GVE Schweine mit 11,0 m<sup>3</sup> Gülle pro GVE und Jahr.

#### 6.8.2.1 Emissionen für bauliche Maßnahmen

Basierend auf diesen Daten wurden die Dimensionen der Güllegrube bestimmt. Dabei wurde das in Österreich gesetzlich vorgeschriebene Mindestfassungsvermögen für 6 Monate Lagerzeit berücksichtigt. Diese gesetzlichen Vorgaben ergeben sich aus dem Gülleausbringungsverbot in der Winterperiode. Das Verhältnis Durchmesser zu Höhe wurde mit 2:1 festgelegt. Daraus ergibt sich ein Grubenvolumen bei Rinderhaltung von 205 m<sup>3</sup> und bei Schweinehaltung von 243 m<sup>3</sup>. Für eine vereinfachte Berechnung wurde für beide Haltungsformen ein durchschnittliches Grubenvolumen von 250 m<sup>3</sup> angenommen.

Die Errichtung der Güllegrube (die Nutzung vorhandener Infrastruktur in System 4 wird nicht berücksichtigt) war außerhalb der festgelegten Systemgrenzen, da sich diese ökologischen Kosten für die untersuchten Szenarien nicht unterscheiden würden. Emissionen aus den für die einzelnen Systeme notwendigen und im Folgenden beschriebenen infrastrukturellen Veränderungen wurden berücksichtigt.

**System 2** Errichtung einer Betondecke, Dicke der Betondecke 35 cm. Folgende Emissionsquellen wurden in der Berechnung berücksichtigt. 20 m<sup>3</sup> Beton und 1.880 kg Stahl, sowie 1.740 tkm LKW-Transport und die Deponierung von 46 Tonnen Inertmaterial.

**System 3:** Errichtung einer Biogasanlage nach den Daten von ecoinvent Data v 2.0 agricultural biogas plant. Errichtung eines Fermenters mit 1000 m<sup>3</sup> und eines Endlagers mit 2000 m<sup>3</sup>. Es ergibt sich eine Betonmenge von 429 m<sup>3</sup>. Alle Emissionen der agricultural biogas plant wurden entsprechend der benötigten Betonmenge berechnet. Es wurde angenommen, dass die Gülle von 25 Landwirten für den Betrieb der Anlage notwendig wäre. Die Emissionen der Errichtung wurden in der Analyse daher nur mit einem fünfundzwanzigstel berücksichtigt.

**System 4:** Errichtung einer Biogaskleinanlage mit einem 250 m<sup>3</sup> Fermenter ohne Endlager. Die errechnete Betonmenge beträgt 67 m<sup>3</sup>. Auch hier wurde für die Berechnung der Prozess agricultural biogas plant der ecoinvent Datenbank als Basis festgelegt. Gleich wie in System 3 wurden alle Emissionen entsprechend der benötigten Betonmenge skaliert.

Für alle Emissionen aus der Errichtung von Infrastruktur wurde eine Abschreibung über 20 Jahre festgelegt.

#### 6.8.2.2 Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Gülle

Nächster Schritt im Lebenszyklus der Gülleverwertung ist die Güllelagerung. Emissionen für System 1, die offene Güllegrube wurden nach experimentellen Daten von Amon bestimmt [vgl. Amon 2002]. Die Implementierung einer festen Grubenabdeckung reduziert nach Angaben in der Literatur die Ammoniak und Methanemissionen (MFC) um 90 % [vgl. Dämmgen 2009, S.73 und S.151]. Vereinfacht wurde daher angenommen, dass alle Lageremissionen aus System 1 im System 2 um 90 % reduziert werden. Emissionen für System 3 und 4 wurden auch basierend auf den Untersuchungen von Amon festgelegt, wobei die dort angegebenen Emissionen wegen der geschlossenen Gruben um 90% reduziert wurden. Des Weiteren wurden, ebenfalls nach Amon [vgl. Amon 2002], der Einfluss der Temperatur auf die Emissionen berücksichtigt und unterschiedliche Wert für Sommer und Winter bestimmt.

Alle Lageremissionen sind in Tabelle 28 zusammengefasst.

**Tabelle 28 Emissionen von Rohgülle bei Lagerung und Ausbringung**

*Quelle: eigene Darstellung nach Amon B.*

Rohgülle unvergoren		Rind			Schwein		
		CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O
Lagerung [g m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ]	Winter <sup>1</sup>	0.75	0.015	0.07	2.79	1.07	0.22
	Sommer <sup>2</sup>	57.54	0.58	0.49	15.2	0.49	0.35
Ausbringung [g m <sup>-3</sup> ]	gelagert <sup>3</sup>	1.25	185.75	3.75	3.025	154.75	37.5
	frisch <sup>3</sup>	34.05	301.75	16.45	6.13	421	155

Weitere direkte Emissionen der Gülle entstehen bei der Feldausbringung. Während der Ausbringung auftretende Emissionen sind stark von Umwelteinflüssen wie Wind, Temperatur und Regen aber auch von der gewählten Ausbringtechnik beeinflusst. In Anlehnung auf den gewählten Versuchsaufbau von Amon wurde eine Ausbringung mittels Schleppschlauch angenommen. Außerdem wurde die ausgebrachte Gülle in 2 Kategorien unterteilt. Gelagerte und ungelagerte Gülle. Frische Gülle ist viskoser als gelagerte Gülle, zeigt daher verlangsamte Bodeninfiltration und gesteigerte Emissionen nach der Ausbringung. In der Winterperiode anfallende Gülle wurde als gelagert und

jene im Sommer als frisch klassifiziert. Methan, Ammoniak und Lachgasemissionen wurden nach Angaben von Amon [vgl. Amon 2002] bestimmt.

Alle Feldausbringungsemissionen sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

**Tabelle 29 Emissionen von vergorener Gülle bei Lagerung und Ausbringung**

*Quelle: eigene Darstellung nach Amon B.*

Gülle vergoren		Rind			Schwein		
		CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O
Lagerung [g m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ]	Winter <sup>1</sup>		0.279	0.07	1.82	0.72	0.26
	Sommer <sup>2</sup>		0.15	0.51	14.42	0.88	0.28
Ausbringung [g m <sup>-3</sup> ]	gelagert <sup>3</sup>		220	2.65	5.4	184.75	55
	frisch <sup>3</sup>		431.5	12.08	2.55	278.5	55

#### 6.8.2.3 Transportemissionen

Weitere zu berücksichtigende Prozessschritte im Güllemanagement sind der Transport der Gülle zum Feld, der Maschineneinsatz bei der Ausbringung und für System 3 der Transport zur Biogasanlage.

Die Hof-Feld Distanz wurde mit 2 km angenommen [vgl. Fazeni und Steinmüller 2011]. Die Entfernung von der Gemeinschaftsanlage in System 3 wurde mit 6 km festgelegt. Der Einfluss des Transportweges wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Aufgrund des Fehlens eines weiteren Lagertanks für vergorene Gülle am Hof musste die Entfernung zwischen Betrieb und Biogasanlage zweimal (Transport zu und Abholung von der Anlage) berücksichtigt werden. Der Gülletransport wurde mittels ecoinvent Datensatz transport tractor ans trailor modelliert. Im vorhandenen Datensatz wurde die Anhänger Produktion durch eine Gülletank Produktion (slurry tank production aus ecoinvent Data v2.0) ersetzt.

Für die Modellierung der Ausbringung der Gülle wurde auf den ecoinvent Datensatz slurry spreading by vacuum tanker zurückgegriffen, wobei unter diesem Begriff nur die Emissionen des Maschineneinsatzes betrachtet werden. Es wurde angenommen, dass die Ausbringung mittels Güllefass und Schleppschlauch erfolgt.

#### 6.8.2.4 Biogaspotentiale und Prozessenergie

Für System 3 und System 4 wurden Biogaserträge und die notwendige Prozessenergie ermittelt. Spezifische Biogaserträge sowie Methangehalte für Rinder- und Schweinegülle wurden von Schwab und Reinhold [vgl. Schwab und Reinhold, S.5]

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

übernommen. Trockenmassegehalte und der Anteil organischer Trockenmasse wurden durch Vergleich von Literaturwerten mit eigenen Laborergebnissen festgelegt.

Für die Bestimmung der notwendigen Prozessenergie wurden Literaturwerte wie in Tabelle 30 zusammengefasst ermittelt.

**Tabelle 30 Ermittlung des Strom und Wärmebedarfs von Biogasanlagen**

*Quelle: eigene Darstellung*

	Nennkapazität [m <sup>3</sup> Biogas / Jahr]	Strombedarf	Wärmebedarf	Quelle
ecoinvent Gülleanlage	65 100	2.49 %	29.20 %	a
ecoinvent Co-Substrat	104 000	2.59 %	24.61 %	a
Synenergy	~ 1 000 000	4.88 %	14.66 %	b
Bozzo et al. Kleinanlage	47 569	1.65 %	20.80 %	c
Bozzo et al. mittelgroße Anlage	860 313	3.58 %	15.79 %	c

*a... Jungbluth et al. ecoinvent report No.17*

*b... persönliche Auskunft von N. Niemetz, Daten aus Projekt Synenergy*

*c... Bozzo et al.*

Daten von Bozzo et al. repräsentieren aufgezeichnete Daten von existierenden Anlagen. Aufgrund der Realitätsnähe wurden diese Werte für die Bewertung herangezogen. Die Bereitstellung des Stroms erfolgte über das öffentliche Netz und in der Bewertung mittels Österreichischem Strommix. Die Wärme wurde mittels Reduktion des Nettoenergieertrages berücksichtigt.

### 6.8.3 Wirkungsabschätzung

Wie bereits erwähnt wurde für die vergleichende Bewertung der Auswirkungen der untersuchten Prozesse der Sustainable Process Index als Bewertungsgröße gewählt. Neben der Ermittlung des SPI werden im SPIONWeb als Ergebnis auch das Global Warming Potential (GWP) sowie die Kohlendioxidemission angegeben. Die vergleichende Bewertung der 4 betrachteten Systeme erfolgte anhand dieser drei Größen.

### 6.8.4 Auswertung und Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung sind in Tabelle 31 zusammengefasst (Details der Prozesse befinden sich im Anhang 4). Sie zeigen eine deutliche Verringerung des ökologischen Einflusses bei Biogaserzeugung in System 3 und System 4. Eine Gülleabdeckung wie in System 2 zeigt einen verringerten Fußabdruck und ein minimiertes GWP aber erhöhte direkte CO<sub>2</sub>-Emission. Dies resultiert aus den

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Emissionen aus dem Bau der Abdeckung. Zu beachten ist allerdings, dass es sich hier nicht um CO<sub>2</sub> Äquivalente sondern um stofflich emittiertes Kohlendioxid handelt und Lachgas oder Methanemissionen nicht berücksichtigt werden. Dieser Größe ist also nur am Rande Beachtung zu schenken. Die deutliche Minderung der Emissionen während der Lagerung ist im deutlich reduzierten GWP erkennbar.

**Tabelle 31 Ergebnisse der ökologischen Bewertung mit SPionWeb**

*Quelle: eigene Darstellung*

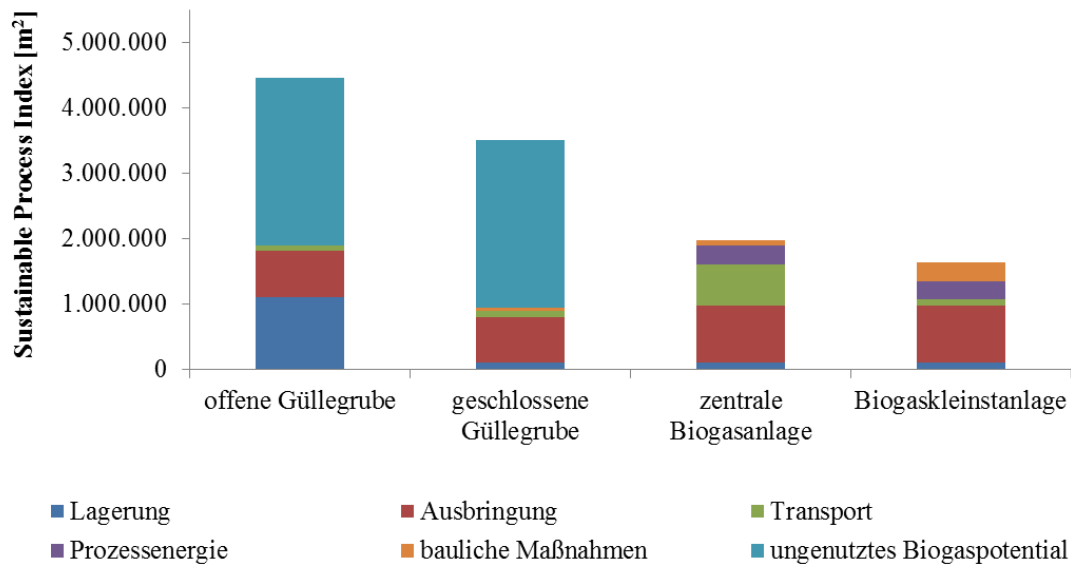
		SPI [m <sup>2</sup> ]	GWP [kg]	CO <sub>2</sub> [kg]	
System 1	offene Güllegrube	Rind	4.456.621	87.883	19.755
		Schwein	5.411.510	45.684	18.627
System 2	geschlossene Güllegrube	Rind	3.509.006	30.802	20.087
		Schwein	4.857.103	37.623	18.958
System 3	zentrale Biogasanlage	Rind	1.972.169	14.385	5.992
		Schwein	2.713.367	24.772	6.861
System 4	Kleinstbiogasanlage	Rind	1.646.896	9.938	4.674
		Schwein	2.339.021	19.499	5.234

Für eine bessere Bewertbarkeit der Ergebnisse wurden der Flächenverbrauch der Teilprozesse der bewerteten Systeme in den Abbildung 59 und 49 grafisch dargestellt.

Für Rindergülle können die Ergebnisse wie folgt interpretiert werden. Eine geschlossene Güllegrube zeigt aufgrund verminderter Emissionen während der Lagerung einen um 22 % verringerten SPI. Die zusätzlichen Emissionen die sich aus dem Bau der Abdeckung ergeben sind verschwindend gering und können fast vernachlässigt werden. Die Vergärung in Biogasanlagen zeigt vor allem aufgrund der Erzeugung erneuerbarer Energie ein deutlich verbessertes Ergebnis. Erkennbar ist aber auch die Erhöhung der Emissionen bei der Ausbringung, aufgrund eines erhöhten Ammoniumgehaltes in der Biogasgülle und den nicht vernachlässigbaren Einfluss der Prozessenergie und der baulichen Maßnahmen. Allerdings sind die Einsparungen aufgrund der Biomethanherzeugung so groß, dass diese Zusatzemissionen in Kauf genommen werden können. Einen ebenfalls signifikanten Einfluss hat die ökologische Auswirkung des Transportes bei der Vergärung in einer Gemeinschaftsanlage. Der Transport macht in diesem System 26 % des Gesamtfußabdruckes aus. Die Reduktion des Fußabdruckes bei Biogaserzeugung im Vergleich zu einer offenen Güllegrube beträgt bei zentraler Vergärung 52 % und bei Vergärung am Hof 63 %. Aus ökologischer Sicht ist eine Vergärung in Kleinanlagen zu bevorzugen. Hier gilt es auch

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

noch zu beachten, dass bei Nutzung der vorhandenen Infrastruktur Emissionen aus baulichen Maßnahmen bei diesen Kleinanlagen noch deutlich reduziert werden können (oranger Balken in Abbildung 59), da die Güllegrube bereits vorhanden ist. Es entsteht dadurch eine Reduktion der Gesamtemission von 18 %, sodass das Einsparungspotential gegenüber einer offenen Güllegrube auf 70 % maximiert werden kann.



**Abbildung 59 SPI für den Systemvergleich bei Rindergülle – Darstellung der Anteile der Teilprozesse**

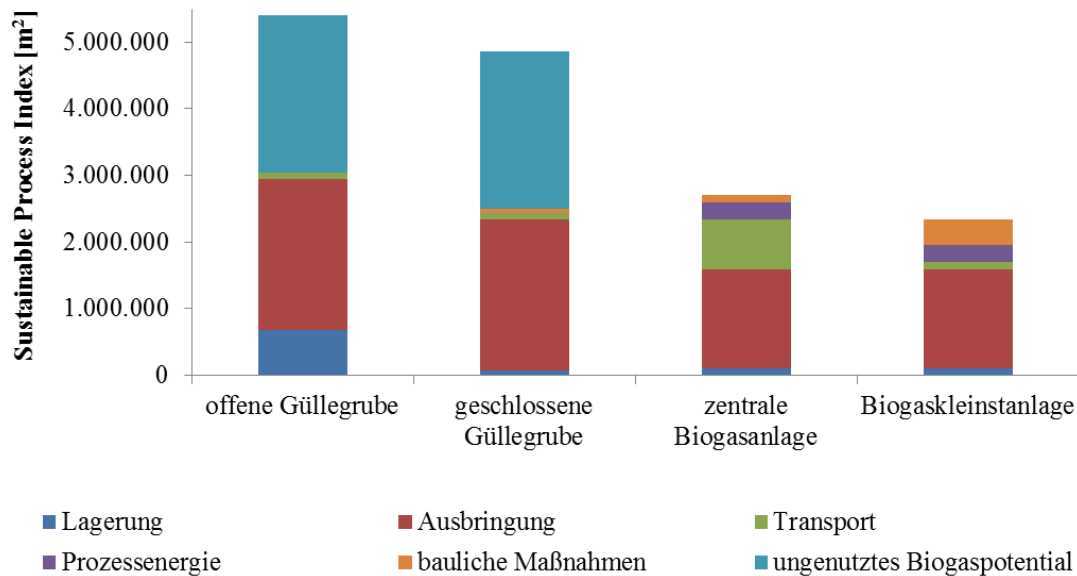
*Quelle: eigene Darstellung*

Für Schweinegülle zeigen sich erwartungsgemäß ähnliche Ergebnisse. Hier beträgt die Reduktion des ökologischen Einflusses durch Abdeckung der Güllegrube allerdings nur 8 %, da die Ausbringungsemissionen einen stärkeren Einfluss auf den SPI haben als bei Rindergülle. Die Ausbringungsemissionen können durch eine Abdeckung nicht positiv beeinflusst werden. Allerdings zeigt sich im Gegensatz zu Rindergülle bei Schweinegülle eine Verminderung der Emissionen bei Ausbringung durch Vergärung. Im Unterschied zu Rindergülle ist bei Schweinegülle nicht Ammonium sondern  $N_2O$  bei der Ausbringung die Emission mit dem bedeutendstem Einfluss. Kohlenstoff hat eine wichtige Auswirkung auf die mikrobielle  $N_2O$  Bildung. Durch Vergärung wird der Kohlenstoffgehalt in der Gülle reduziert, was die Verringerung der Emissionen durch anaerobe Fermentation erklären könnte. Der Einfluss von erzeugtem Biomethan, baulichen Maßnahmen, Prozessenergie und Transport ist mit Rindergülle vergleichbar. Die Reduktion des Fußabdruckes durch Biogaserzeugung beträgt bei Schweinegülle für Gemeinschaftsanlagen 47 % und für Kleinanlagen 56 %. Auch hier ist die Vergärung in Kleinanlagen das System mit dem geringsten ökologischen Einfluss.



## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Würde man auch hier die Emissionen für den Bau der Kleinanlage dem System entnehmen, reduziert sich der SPI um 17 % und das höchstmögliche Einsparungspotential gegenüber einer offenen Güllegrube beträgt 64 %.



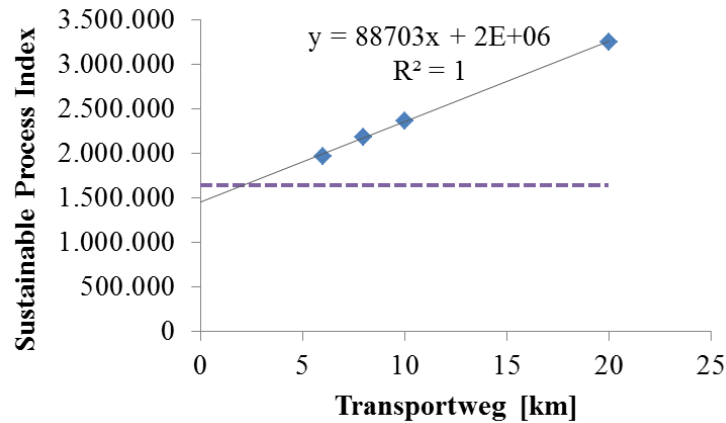
**Abbildung 60 SPI für den Systemvergleich bei Schweinegülle – Darstellung der Anteile der Teilprozesse**

*Quelle: eigene Darstellung*

In den Ergebnissen zeigt sich, dass der Transport zur Gemeinschaftsanlage einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtemissionen hat und etwa 30 % des Fußabdruckes ausmacht. Aus diesem Grund wurde in einer Sensitivitätsanalyse diese Distanz variiert und der Einfluss dieses Parameters ermittelt. Es zeigte sich ein linearer Zusammenhang des SPI mit der Transportdistanz.

In Abbildung 61 befindet sich die Visualisierung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bei der Verwertung von Rindergülle. In violett ist die verbrauchte Fläche der Kleinanlage dargestellt. Man erkennt, dass die Distanz einen signifikanten Einfluss hat und daher Ab-Hof Vergärung anzustreben ist.

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -



**Abbildung 61 Einfluss der Transportdistanz zur Gemeinschaftsanlage auf den SPI**

*Quelle: eigene Darstellung*

Die für die Berechnung ermittelten Parameter mit der größten Unsicherheit sind Emissionen bei der Lagerung und bei der Feldausbringung. Besonders das Reduktionspotential einer Abdeckung oder die Verminderung der Emissionen durch geeignete Ausbringtechnik ist schwer zu bestimmen. So gibt es zwar Daten zu Emissionen bei natürlicher Krustenbildung oder Abdeckung durch eine Strohschicht [vgl. Amon 2002], Emissionsmessungen für eine feste Abdeckung konnten nicht gefunden werden. In dieser Arbeit wurden alle Emissionsfaktoren durch Abdeckung um 90 % reduziert. Änderungen in den Werten würden zwar den Fußabdruck ändern nicht jedoch die Interpretation der Ergebnisse. Die Unsicherheiten bei der Feldausbringung sind noch deutlich höher, da auch der Einfluss dieser Emissionen auf den Fußabdruck signifikanter ist. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Vorteile durch nachhaltige Energieerzeugung immer die Nachteile durch mögliche Steigerungen bei der Feldausbringung überwiegen werden.

### **6.9 Nachhaltige Güllevergärung – Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick**

Flüssigmist stellt in Österreich ein nicht unwesentliches Biomassepotential dar. Die Verwertung in Biogasanlagen bietet aufgrund der Beschaffenheit des Rohstoffes eine optimale Verwertungsmöglichkeit. Die momentane Nutzung als Wirtschaftsdünger wäre durch die anaerobe Fermentation nicht negativ beeinflusst. In Feldstudien sind sogar positive Eigenschaften der vergorenen Gülle erkennbar. Die Vergärung von Gülle ermöglicht die Erzeugung erneuerbarer Energie und liefert einen wichtigen Beitrag in der Umstellung zu einem nachhaltigen Energiesystem. Die geringe Energiedichte des Substrates erfordert allerdings neue Konzepte in Transport und Anlagentechnik. Eine

Vergärung am Hof würde diese Transportkosten eliminieren birgt jedoch andere Risiken. Hofintegrierte Biogasanlagen ohne Co-Vergärung sind in ihrer Kapazität beschränkt. Biogasgestehungskosten sind allerdings stark von der Größe der Anlage abhängig. Auch die Nutzung des entstehenden Gases ist bei diesen Kleinanlagen eine Herausforderung. Hier wird in jedem Fall empfohlen ein regionales Konzept zu entwerfen, da gezeigt werden konnte, dass die dezentrale Vergasung mit zentraler Nutzung in jedem Fall zu bevorzugen ist. Die Nutzung vorhandener Infrastruktur kann helfen, die Investitionskosten der Anlage zu senken. Bestehende Güllegruben können durch kleine Umbaumaßnahmen als Fermenter genutzt werden. Dabei ist auf sicherheitstechnische Vorschriften zu achten. Auf eine Fermenterheizung kann aus ökonomischer Sicht nicht verzichtet werden, Die Verluste im Gasertrag sind bei psychrophiler Fermentation zu groß. Einsparungspotential wurde vor allem in der Automatisierung der Anlage identifiziert. Bei der Monofermentation von Gülle kann mit sehr stabilem Abbau gerechnet werden. In diesem Zusammenhang sind vor allem Verhandlungen mit Behörden aufzunehmen, da vieles an Messtechnik durch Genehmigungsaufgaben vorgeschrieben wird. Die politische Unterstützung ist vor allem aufgrund der ökologischen Vorteile von Güllevergärung anzuraten. Besonders in der Schweinehaltung können Emissionen deutlich gesenkt werden. Der größte ökologische Vorteil ist allerdings in der Erzeugung erneuerbarer Energie zu sehen und nicht in der Emissionsreduktion bei Lagerung und/oder Ausbringung.

Um weitere Einsparungspotentiale aber auch Probleme in der Umsetzung identifizieren zu können, wäre die Realisierung einer Demoanlage notwendig. Hier könnten im Realbetrieb die Konsequenzen einer reduzierten Technik überprüft werden. Auch können anhand der Daten verlässliche betriebswirtschaftliche Berechnungen angestellt werden.

## **7 Energetische Verwertung fester agrarischer Abfälle**

Feste agrarische Abfälle sind in Österreich aber auch in anderen Ländern ein mengenmäßig bedeutender Reststoffbiomassestrom [vgl. Europäische Umweltkommission 2006, S.49]. Es sind dabei alle nicht als Primärprodukte genutzten Ernterückstände gemeint. Ein Teil dieser Biomasse wird für die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit benötigt und als Wirtschaftsdünger eingesetzt. Für weitere Teile

sind alternative Nutzungsformen, wie die Nutzung als Einstreu, vorhanden. Ein Teilstrom stünde für die energetische Verwertung zur Verfügung. Einer der bedeutendsten Ernterückstände in Österreich ist Getreide- und Maisstroh (vgl. Tabelle 32). Die Untersuchung wurde daher auf diesen Rohstoff und hier im speziellen Weizenstroh beschränkt. In der vorliegenden Arbeit wurde für Österreich zu Beginn das Biomassepotential erhoben, welches für eine energetische Verwertung zur Verfügung steht. Dabei wurde besonders auf die Nachhaltigkeit des Systems geachtet. Ausgehend von diesem Potential wurden die zur Verfügung stehenden Technologien zur Energieerzeugung aus Stroh diskutiert. Da besonders für die Stromproduktion viele alternative Energiequellen zur Verfügung stehen wurden in dieser Arbeit Technologien zur Treibstoffherstellung favorisiert. Da das nachhaltige Strohpotential ein beschränktes ist, war jene Technologie zu identifizieren, die je Tonne den größten Energieoutput generiert. Zu diesem Zwecke wurde die optimale Verschaltung einer Bioethanol- mit einer Biogasanlage untersucht. Dabei wurde der Ansatz einer ergebnisoffenen Prozessnetzwerksynthese gewählt. Ohne jegliche ökonomische Einschränkungen wurde die Verschaltung mit dem höchsten Energieoutput ermittelt. Die für die Optimierung notwendigen Daten wurden der Literatur entnommen und bei Bedarf mit eigenen Versuchsergebnissen ergänzt.

## **7.1 Allgemeine Grundlagen**

Etwa 60 % der in Österreich landwirtschaftlich genutzten Ackerfläche wird für den Getreideanbau genutzt [vgl. bmlfuw 2014]. Die jährlichen Körner- und Strohmenge sind in Tabelle 32 zusammengefasst. Die Stroherträge wurden über das Korn/Stroh Verhältnis rechnerisch ermittelt. Es handelt sich dabei um das theoretische Strohpotential.

Mais- und Weizenstroh sind mit 41 % und 30 % des gesamten Strohpotentials die bedeutendsten Massenströme. Verwertungsmöglichkeiten werden daher in verschiedensten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vor allem für diese Stroharten untersucht. Für Weizenstroh ist die Nutzung als Einstreu und Düngemittel derzeit die bedeutendste Verwertungsform. Verfeuerung und stoffliche Nutzung in Form von zum Beispiel Dämmmaterial finden nur für vernachlässigbar geringe Mengen Anwendung [vgl. Neugschwandtner et al. 2010; Kretschmer et al 2012 S.19ff].

**Tabelle 32 Korn- und Stroherträge aus dem Jahr 2013**  
*Quelle: eigene Darstellung nach bmlfuw 2014 und LfL 2013*

	Ernte 2013 [t]	Korn/Stroh Verhältnis	Strohertrag [t]
Körnermais	1.639.019	1	1.639.019
Weichweizen	1.512.246	0,8	1.209.797
Wintergerste	453.223	0,7	317.256
Sommerfuttergerste	280.827	0,8	224.662
Roggen	234.689	0,9	211.220
Triticale	224.141	0,9	201.727
Hafer	86.936	1,1	95.630
Hartweizen	63.136	0,8	50.509
Dinkel	22.325	0,8	17.860

Für Maisstroh sind kaum etablierten Nutzungsformen bekannt. die Verwertung beschränkt sich derzeit fast ausschließlich auf die Einarbeitung in die Ackerfläche [vgl. Neugschwandtner et al. 2010]. Ein Grund hierfür sind zum einen technischen Restriktionen bei der Ernte von Maisstroh, aber vor allem der oft hohe Feuchtegehalt des Rohstoffes [vgl. Kaltschmitt et al. 2009, S.153]. Die Brauchbarmachung von Maisstroh ist eine erst junge Entwicklung und bedarf für eine flächendeckende Verbreitung noch mehrerer Erfahrungswerte [vgl. Weiser et al. 2014, S.750]. In der vorliegenden Arbeit wurde die Untersuchung auf Getreidestroh und hier aufgrund seines Potentials auf Weizenstroh eingeschränkt. In weiterer Folge wird bei der Verwendung des Wortes Stroh, ausschließlich Weizenstroh gemeint.

Die Verfeuerung von Stroh ist zwar vor allem aufgrund des geringen Wassergehaltes möglich und denkbar allerdings ergeben sich aufgrund eines hohen Aschegehaltes und eines erniedrigten Ascheschmelzpunktes einige nachteilige Eigenschaften im Vergleich zu Holz [vgl. Obernberger 2000, S.9ff]. Außerdem geht, ähnlich wie bei der Verbrennung von tierischen Exkrementen, bei der Verbrennung die organische Düngewirkung des Strohs verloren. Alternativ wurden und werden daher vor allem biotechnologische Verwertungsverfahren untersucht die neben einer energetischen auch eine stoffliche Nutzung des Rohstoffes erreichen sollen. Aufgrund des komplexen Aufbaus von Stroh sind beim Einsatz biotechnologischer Verfahren allerdings Vorbehandlungsschritte der Biomasse notwendig, um die gespeicherte Energie

zugänglich zu machen. Genauere Informationen sind in Kapitel 4.2.3 und 4.2.4 nachzulesen. Bei der biotechnologischen Verwertung wird in der Regel nur der leicht abbaubare Kohlenstoff verbraucht, die schwer abbaubare Organik steht demnach nach der Energiegewinnung noch immer als organischer Dünger zur Verfügung [vgl. Oleskowicz-Popiel 2012, S.441]. Dies ist vor allem bei Berechnungen des Strohpotentials von Bedeutung, weil dadurch die am Feld verbleibende Menge minimiert werden kann.

### **7.1.1 Das nachhaltige Strohpotential**

Das Strohpotential kann als theoretisches, technisches und nachhaltiges Potential ermittelt werden. Das theoretische Strohpotential entspricht jenem aus Tabelle 32 und ergibt sich aus dem Ertrag der Hauptfrucht durch einen Umrechnungsfaktor. Dies ist ein theoretischer Wert und würde bei der Berechnung von Biomassepotentialen die zur Verfügung stehende Menge deutlich überbewerten. Eine bessere Aussage kann anhand des technischen Strohpotentials getroffen werden. Hier werden Stoppel-, Drusch- und Bergeverluste die bei der Einbringung des Strohs entstehen berücksichtigt. Durch die Einbindung dieser Verluste reduziert sich das theoretische Potential um zirka 40 %, wobei die tatsächlichen Verluste stark von den Erntebedingungen abhängen und zirka 40 % betragen können [vgl. Weiser 2014]. Wird darüber hinaus auch noch berücksichtigt, wie viel Stroh in einer Region für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit am Feld belassen werden muss, erhält man als Ergebnis das sogenannte nachhaltige Strohpotential [vgl. Lindorfer et al. 2014]. Dieser Anteil ist regional sehr unterschiedlich. Strohpotentiale können daher nicht global oder national ermittelt werden, sondern müssen auf regionaler Ebene betrachtet werden [vgl. Zeller et al. 2012; Lindorfer et al. 2014]. Als Möglichkeit zur Bewertung des als Wirtschaftsdünger notwendigen Strohpotentials ergibt sich die Berechnung einer Humusbilanz nach VDLFUA. Lindorfer et al. [vgl. Lindorfer et al. 2014] haben dies in ihrer Arbeit für die Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt und nutzbare Strohpotentiale von 7-80 % der gesamten Strohmenge ermittelt. Im DBFZ-Report Nr.13 [vgl. Zeller et al. 2012] wurde diese Bilanzierung noch weiter bis auf Landkreisebene verfeinert. Dabei konnte gezeigt werden, dass bereits bei Entfernungen von weniger als 100 Kilometer deutliche Unterschiede in den Humussalden und dem Strohaufwuchs und daraus resultierend dem nutzbaren Strohpotential bestehen. Da in dieser Arbeit keine regionale Einschränkung durchgeführt wurde und die Ermittlung des nachhaltigen

Strohpotentials für Österreich im Gesamten als wenig sinnvoll erachtet wird, werden keine genaue Zahl für das nachhaltige Strohpotential angegeben. An dieser Stelle sei lediglich darauf hingewiesen, dass die Verluste, die bei der Ermittlung des technischen vom theoretischen Potential abgezogen werden, auf jeden Fall bei der Ermittlung des nachhaltigen Strohpotentials zu berücksichtigen sind, da es sich hier um Biomasse handelt die am Feld verbleibt und als organischer Dünger zur Verfügung steht.

Für Weizenstroh müssen neben der Düngewirkung außerdem alternative Nutzungsformen wie die Nutzung als Einstreumaterial berücksichtigt werden. So gibt es in Österreich Regionen, in denen aufgrund des hohen Bedarfs an Einstreu kein Stroh für eine andere Verwertung zur Verfügung steht [vgl. Moser 2012, S.24]. Moser gibt in seiner Arbeit einen Strohbedarf als Einstreu von 40,6 % des gesamten theoretischen Strohpotentials an [vgl. Moser 2012, S.22]. Da neben Stroh auch andere Materialien als Einstreu immer mehr an Bedeutung gewinnen, ist anzunehmen, dass dieser Anteil zukünftig eher rückläufig ist und in den Berechnungen eher über- denn unterbewertet wird [vgl. Knoll 2013].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass aufgrund verschiedener alternativer Interessen das nutzbare nachhaltige Strohpotential in jeden Fall nur ein Bruchteil des theoretischen Potentials sein kann. Für die Nutzung ist daher in jedem Fall ein maximaler Nutzungsgrad des Energie- und/oder Wertstoffgehalts im Stroh anzustreben. Neue Technologien sind daher nicht nur für sich, sondern vor allem im Vergleich zu alternativen Nutzungsformen zu bewerten. In dieser Arbeit wurde daher ein integrativer Ansatz gewählt der im speziellen die kombinierte Optimierung einer Strohbioraffinerie mit einer Biogasanlage ermöglichen sollte.

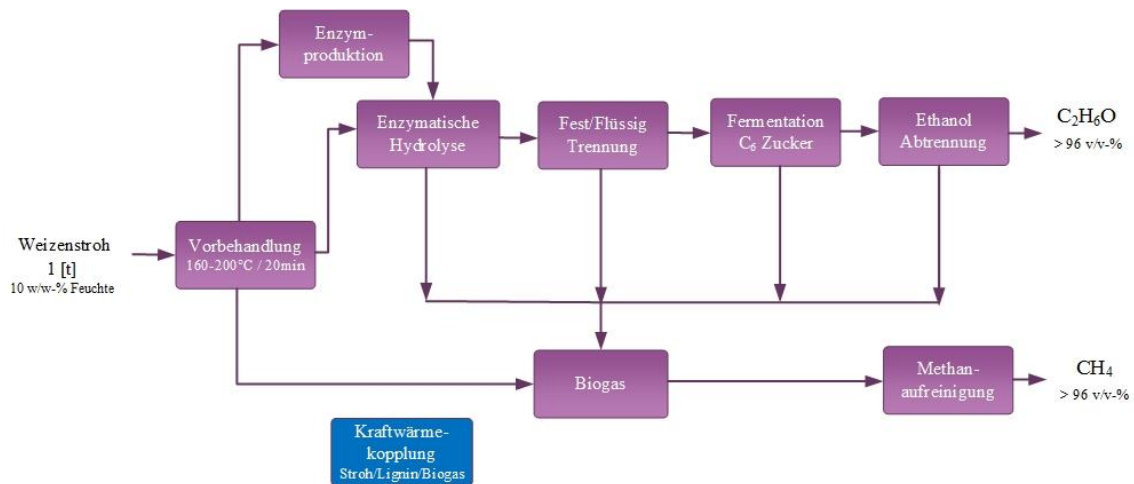
## **7.2 Energetische Optimierung einer kombinierten Bioethanol und Biogasanlage**

Wie oben beschrieben, sollte im Rahmen dieser Arbeit die Integration einer Biogasanlage in eine Bioethanolanlage neu durchgedacht werden. Ziel war dabei die Ethanolanlage nicht isoliert zu optimieren und die Biogasanlage zur Abfallverwertung in dieses optimierte System zu integrieren, sondern eine integrierte Optimierung beider Prozesse durchzuführen. In der Arbeit wurde für die prozessintegrative Optimierung die Prozessnetzwerksynthese genutzt. Als Optimierungsparameter wurde die Differenz Energieoutput minus Energieinput, also der Nettoenergieertrag herangezogen. Um

möglichst lückenlose Daten für den Prozess zu Verfügung zu haben und fehlende Literaturdaten nicht nur mit Annahmen versehen zu müssen, wurde sowohl der Bioethanolprozess als auch der Biogasprozess im Labor nachgestellt. Durch dieses Vorgehen wurde es möglich, auch komplexe Fragestellungen, wie die optimale Verwertung von Pentosen, beantworten zu können.

### 7.2.1 Eckdaten des untersuchten Bioethanolprozesses

Der untersuchte Bioethanolprozess entspricht im Wesentlichen jenem des sunliquid® Prozesses der Firma Clariant [vgl. Clariant]. Das in Abbildung 24 gezeigte Verfahrensfliessbild kann für den Prozess folgendermaßen konkretisiert werden und ist in Abbildung 62 dargestellt.



**Abbildung 62 Verfahrensfliessbild der untersuchten integrierten Bioethanol und Biogasanlage**

*Quelle: eigene Darstellung*

Als Rohstoff für den Gesamtprozess ist Weizenstroh festgelegt. Die Vorbehandlung wird mittels Steam-Explosion vorgenommen. Die Hydrolyse wird enzymatisch durchgeführt. Dem sunliquid® Verfahren der Firma Clariant [vgl. Clariant] folgend wird im Gegensatz zu den Laborversuchen festgelegt, dass die notwendigen Enzyme direkt auf der Anlage produziert werden. Nach der Hydrolyse erfolgt im Prozess eine Fest/Flüssigtrennung des Substrates. Die Fermentation wird mit *Saccharomyces cerevisiae* durchgeführt. Die Abtrennung des Ethanols erfolgt über Destillation. Eine Auftrennung über das Azeotrop wird nicht untersucht. Die Substratproduktion und Logistik ist nicht in den Optimierungsprozess integriert. Die Energiebereitstellung erfolgt in jedem Fall durch eigene Energieproduktion, wobei als Rohstoffe Stroh, Ligninrückstand oder Biogas verwendet wird. Die integrierte Biogasanlage wird als



- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Flüssigfermentation ausgeführt und kann mit allen Teilströmen des Ethanolprozesses beschickt werden. Eine genaue Auflistung der Prozessbedingungen aller Teilprozesse zeigt Tabelle 33.

**Tabelle 33 Prozessbedingungen des Modelles**

*Quelle: eigene Darstellung*

Prozesse	Charakteristik	
<b><i>Steam-Explosion</i></b>		
Temperatur	[°C]	170-200
Haltezeit	[min]	20
Massenverlust	[m/m-%]	0-18
Dampfbedarf	[g kg <sup>-1</sup> ]	Thermodynamisches Minimum
<b><i>Enzym Produktion</i></b>		
Temperatur	[°C]	30
Enzymausbeute	[FPU g <sub>C6</sub> <sup>-1</sup> ]	175
Strombedarf	[kJ FPU <sup>-1</sup> ]	0.029
<b><i>Enzymatische Hydrolyse</i></b>		
Temperatur	[°C]	50
Reaktionszeit	[Tage]	3.5
Enzymbeladung	[FPU g <sub>C6</sub> <sup>-1</sup> ]	15
TM-Beladung	[g kg <sup>-1</sup> ]	200
Strombedarf	[kJ kg <sup>-1</sup> <sub>TM</sub> ]	72.0
<b><i>Fest/Flüssig Trennung</i></b>		
Abtrenngrad	[m/m-% ]	100
Strombedarf	[kJ L <sup>-1</sup> ]	4.68
<b><i>Ethanol Fermentation</i></b>		
Temperatur	°C	30
Reaktionszeit	h	1.5
Glucose → Ethanol	g g <sup>-1</sup>	0.48
<b><i>Destillation</i></b>		
	MJ kg <sup>-1</sup> <sub>EtOH</sub>	147.31 x <sup>-1.761</sup>
<b><i>Biogas Fermentation</i></b>		
Temperatur	[°C]	38
Strombedarf	[MJ m <sup>-3</sup> <sub>CH4</sub> ]	0.93
Wärmebedarf	[MJ m <sup>-3</sup> <sub>CH4</sub> ]	8.86
<b><i>Biogas Aufreinigung</i></b>		
Strombedarf	[MJ m <sup>-3</sup> <sub>CH4</sub> ]	0.72
<b><i>Kraftwärmekopplung</i></b>		
Wärmewirkungsgrad	[%]	50
Stromwirkungsgrad	[%]	40

### 7.2.2 Datenerhebung im Labor

Die Vorbehandlung des Substrates erfolgte mittels Steam-Explosion bei Temperaturen zwischen 160°C und 200°C und einer Vorbehandlungsdauer von 20 min. Die Behandlung des Substrates kann neben Temperatur und Dauer auch durch die Größe des Severity-Factors (S) definiert werden. Dieser Faktor beschreibt die Intensität der Vorbehandlung in Abhängigkeit von Temperatur und Verweilzeit. Der Faktor wurde für die Vorbehandlung mittels Dampf entwickelt [vgl. Mousdale 2010, S.55ff]. Effekte durch die schlagartige Druckentspannung bei der Steam-Explosion Vorbehandlung werden nicht berücksichtigt. Die Berechnung des Severity-Faktors erfolgt nach Gleichung 23.

$$S = \text{Log}_{10} \int_0^t \exp\left(\frac{T(t) - 100}{14.75}\right) \cdot dt \quad (23)$$

Bei kleinen Reaktorgrößen und einer raschen Erreichung der gewünschten Vorbehandlungstemperatur vereinfacht sich die Gleichung folgendermaßen.

$$S = \text{Log}_{10} \left[ t \cdot \exp\left(\frac{T - 100}{14.75}\right) \right] \quad (24)$$

In dieser Arbeit wurde der S nach Gleichung 24 berechnet.

Labordaten wurden für die Optimierung an jenen Stellen modifiziert, wo davon auszugehen ist, dass im Prozess bessere Ausbeuten erzielt werden können.

#### 7.2.2.1 Substratcharakterisierung und Massenverlust

Als Inputmaterial der Versuche diente Weizenstroh (*Triticum aestivum*) unbehandelt und mit Steam-Explosion vorbehandelt. Charakterisiert wurde das Material durch, Wasser- und Aschgehalt, Kohlenhydrate (Glucose, Arabinose, Xylose) und Lignin.

**Tabelle 34 Charakterisierung von Stroh – Trockenmasse**  
Quelle: eigene Darstellung

	S	TM	Masse <sub>TM</sub>
	[-]	[m/m-%]	[g]
<b>unbehandelt</b>	0	90.7 % ± 0.4	1000
<b>170°C/20min</b>	3.36	23.8 % ± 0.7	970
<b>180°C/20min</b>	3.66	22.6 % ± 1.2	920
<b>190°C/20min</b>	3.95	21.2 % ± 1.0	840
<b>200°C/20min</b>	4.25	20.0 % ± 0.2	820

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Die Charakterisierung erfolgte als Massenbilanz über die diskontinuierliche Steam-Explosion Laboranlage. Als Basis der Bilanz diente ein Kilogramm unbehandeltes Stroh. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 34 und 35 und Abbildung 63 dargestellt.

**Tabelle 35 Charakterisierung von Stroh- Kohlenhydrate und Lignin**

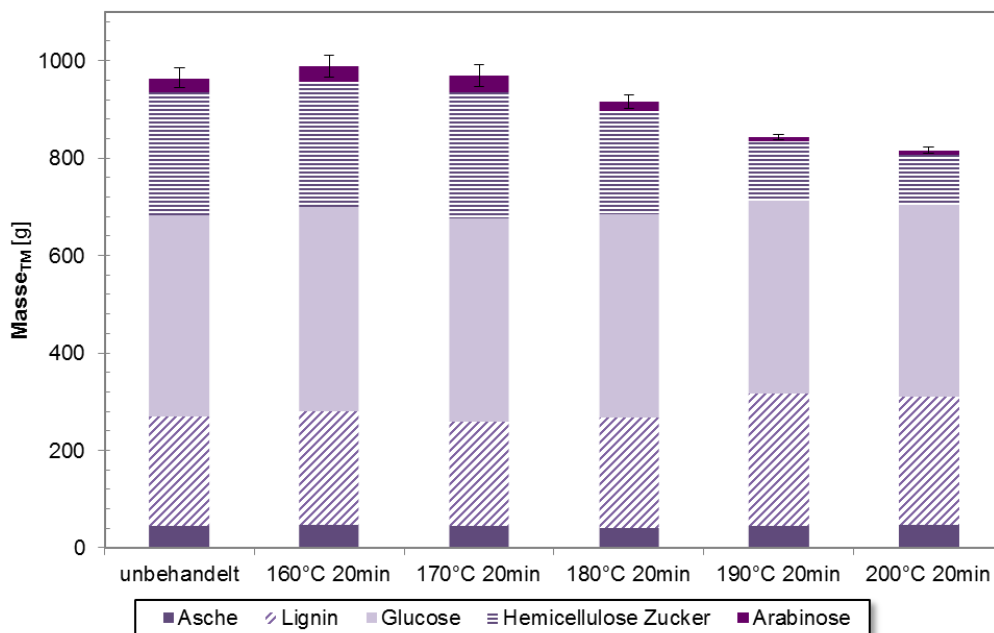
*Quelle: eigene Darstellung*

	XA [g]	Glc [g]	Xyl [g]	Ara [g]	lignin [g]
<b>unbehandelt</b>	44.1 ± 0.2	412.1 ± 15.2	253.1 ± 41.7	28.9 ± 7.8	225.9 ± 0.1
<b>170°C/20min</b>	44.2 ± 0.1	417.1 ± 15.4	259.4 ± 20.5	32.9 ± 8.8	215.2 ± 3.2
<b>180°C/20min</b>	39.7 ± 0.1	418.6 ± 13.3	211.8 ± 10.1	19.4 ± 5.4	226.8 ± 2.6
<b>190°C/20min</b>	45.9 ± 0.8	394.8 ± 12.6	126.0 ± 8.1	8.3 ± 3.9	271.4 ± 2.1
<b>200°C/20min</b>	47.3 ± 0.7	393.6 ± 16.5	102.0 ± 11.8	9.4 ± 8.0	263.2 ± 4.5

Deutlich zu erkennen ist ein nahezu konstanter Asche und Glucosegehalt über alle getesteten Vorbehandlungsbedingungen. Ab einem Severity-Factor von 3,66 ist ein deutlicher Rückgang der Zucker der Hemicellulose sowie auch der Gesamtmasse zu beobachten. Dieser Massenverlust kann durch den Abbau von Hemicellulose in leicht flüchtige Bestandteile, die mit dem Abdampf der Steam-Explosion Anlage verloren gehen, erklärt werden [vgl. Nocquet et al. 2014]. In den Versuchen wurden maximale Trockenmasseverluste von 18 % beobachtet. Diese Ergebnisse decken sich gut mit jenen aus der Literatur, wo für diskontinuierliche wie auch kontinuierliche Steam-Explosion Anlagen Massenverluste zwischen 15 und 25 % berichtet werden [vgl. Bjerre und Schmidt 1997; Ibrahim und Glasser 1999; Viola et al. 2008; Shao et al. 2008]. Eigene Laborversuche, bei denen der Abdampf kondensiert wurde, legen die Vermutung nahe, dass abgebaute Kohlenhydrate als CO<sub>2</sub> vorliegen und somit auch in einem geschlossenen System nicht für eine weitere Verwertung zur Verfügung stehen.

Ebenfalls zu erkennen ist eine leichte Abnahme des Glucose und Zunahme des Ligningehaltes. Auch die leichte Massensteigerung des Lignins wurde bereits in der Literatur beschrieben und ergibt sich aus einer Kondensationsreaktion von Abbauprodukten und Lignin und wird als Pseudo-Lignin bezeichnet [vgl. Sannigrahi et al. 2011]

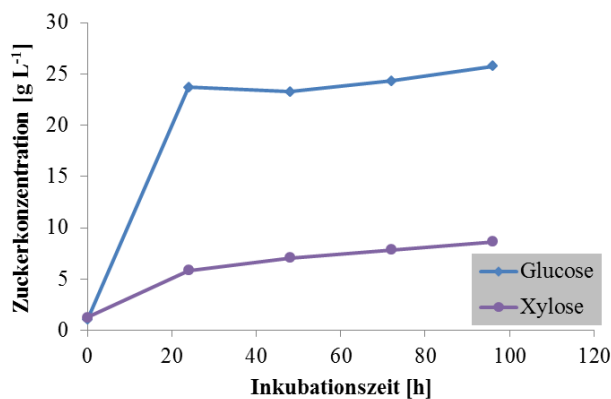
- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -



**Abbildung 63 Charakterisierung von dampfexplodierten Weizenstroh**  
*Quelle: eigene Darstellung*

7.2.2.2 Verzuckerung und Ethanolfermentation

Die Verzuckerung in den Laborversuchen wurde wie bereits beschrieben mit dem kommerziell erhältlichen Enzymmix Acellerase®1500 der Firma Genencor durchgeführt. Die Ermittlung von biochemischen Eigenschaften dieses Enzymmixes war nicht Inhalt dieser Arbeit. Die Prozessbedingungen wurden nicht ökonomisch optimiert sondern so gewählt, dass mit maximalen Ausbeuten zu rechnen war. In Vorversuchen wurde die Enzymkinetik des Enzymmixes untersucht. Aus Abbildung 64 ist zu erkennen, dass bereits nach 24 Stunden ein Großteil der Zucker gelöst vorliegt. Die Hydrolyse für die Laborversuche wurde bei 72 Stunden Verweilzeit durchgeführt, maximale Zuckerausbeuten konnten dadurch gewährleistet werden

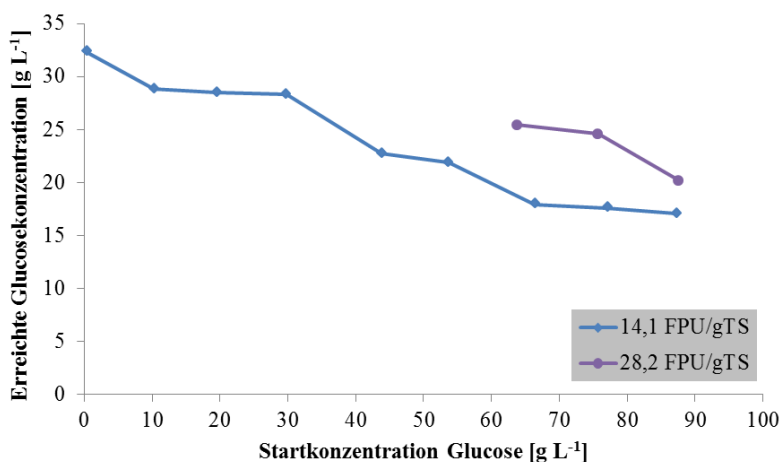


**Abbildung 64 Ermittlung der Enzymkinetik von Acellerase® 1500. Bestimmung der Zuckerkonzentration im Hydrolysat.**  
*Quelle: eigene Darstellung*

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Von Cellulasen ist bekannt, dass eine Substrat- und Produktinhibierung des Enzyms gegeben ist. Einerseits durch Adsorptionsprozesse an das Substrat aber auch durch das Zwischenprodukt Cellobiose und das Endprodukt Glucose [vgl. Hotzapple 1990, S.275]. Die Enzyme wurden in der Vergangenheit hinsichtlich hoher Substrat- und Produktkonzentrationen verbessert [vgl. Margeot et al 2009, Banerjee 2010], eine Inhibierung ist aber noch heute vorhanden [vgl. Teugjas und Väljamäe 2013]. Es konnte mehrfach gezeigt werden, dass höhere Substratkonzentrationen zu geringeren Verzuckerungsraten führen [vgl. Sun und Cheng 2002; Wang et al. 2011]. Da die Wirtschaftlichkeit der Aufreinigung des Ethanols aus der Fermentationslösung aber stark von der Ethanolkonzentration abhängig ist, kann im Prozess keine beliebig geringe Substratkonzentration gewählt werden. Es ist also ein Optimum aus Inhibierung und Ethanolkonzentration nach der Fermentation zu bestimmen.

Die Produktinhibierung durch Glucose wurde in einem Vorversuch untersucht. Zur Hydrolyse von 10 m% Stroh wurde Glucose in steigender Menge zudosiert. Die Auswirkung auf die erreichbare Glucoseausbeute ist in Abbildung 65 dargestellt. Deutlich erkennbar ist die Inhibierung des Enzyms bei steigender Glucosekonzentration, dieser Inhibierung kann durch Erhöhung der Enzymmenge entgegen gewirkt werden, was allerdings zu steigenden Enzymkosten führt.



**Abbildung 65 Untersuchung der Glucoseinhibierung von Accellerase® 1500**  
*Quelle: eigene Darstellung*

In dieser Arbeit wurden keine weiteren Optimierungsversuche hinsichtlich der optimalen Substratkonzentration durchgeführt. Die Versuche wurden mit einem Trockenmassegehalt des Strohs von 100 g je kg Reaktionsgemisch durchgeführt. Dieser Wert wurde gewählt, da bei dieser Trockenmassekonzentration noch eine ausreichende

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Benetzung des Strohs im Schüttelinkubator gewährleistet werden konnte. Die Ergebnisse der Hydrolyse des bei verschiedenen Temperaturen vorbehandelten Strohs sind in den Tabellen 31 und 32 zusammengefasst. Dargestellt werden die Zuckergehalte in der verbleibenden Biomasse in Lösung sowie die erreichbaren Verflüssigungsgrade von Cellulose (Glucoseverflüssigungsrate = GR) und Hemicellulose (Xyloseverflüssigungsrate = XR) im Versuch. Diese Umwandlungsraten werden basierend auf den Analyseergebnissen aus Tabelle 35 und die sich daraus ergebenden maximalen Zuckergehalte in der Lösung bestimmt.

**Tabelle 36 Massenbilanz über die Vorbehandlung – Kohlenhydrate und Lignin**  
Quelle: eigene Darstellung

Feste Biomasse nach der Hydrolyse											
	Masse <sub>TM</sub>	Glc			Xyl			Ara		Lignin	
	[g]	[g]			[g]			[g]		[g]	
170°C/20min	825	478	±	3.1	199.0	±	16.2	23.1	±	8.3	216.3 ± 2.3
180°C/20min	720	326.2	±	9.5	100.4	±	17.4	8.2	±	6.9	252.0 ± 3.6
190°C/20min	510	191.3	±	3.7	40.	±	3.2	3.2	±	1.6	252.5 ± 1.9
200°C/20min	500	189.0	±	4.4	36.5	±	3.2	2.2	±	0.4	248.0 ± 5.1
200°/ 20min opt.	329	39.4	*		15.3	*		2.2	*		248.0 *
200°C/20min opt.+C <sub>5</sub>	329	39.4	*		15.3	*		2.2	*		248.0 *

**Tabelle 37 Charakterisierung der Flüssigfraktion nach der Hydrolyse – eine Massenbilanz**  
Quelle eigene Darstellung

Flüssigfraktion nach der Hydrolyse									
	masse	Glc			Xyl		GR	XR	
	[g]	[g]			[g]		[w/w-%]	[w/w-%]	
170°C/20min	4025	97.3	±	24.5	33.2	±	1.2	<b>23</b>	<b>13</b>
180°C/20min	3880	109.5	±	16.7	82.1	±	1.7	<b>26</b>	<b>39</b>
190°C/20min	3690	199.0	±	9.7	80.4	±	5.1	<b>51</b>	<b>65</b>
200°C/20min	3600	210.4	±	1.8	83.3	±	1.6	<b>53</b>	<b>81</b>
200°/ 20min opt.	3771	354.2	*		86.7	*		<b>90</b>	<b>85</b>
200°C/20min opt.+C <sub>5</sub>	3771	354.2	*		86.7	*		<b>90</b>	<b>85</b>

Die besten Ergebnisse konnten bei den intensivsten Vorbehandlungsbedingungen erzielt werden. Bei 200°C und 20 min Vorbehandlung wurden eine GR von 53 % und eine XR von 81 % erreicht. Vergleichbare Werte wurden von Dererie et al. für Haferstroh und Vintila et al. für Weizenstroh berichtet [vgl. Vintila et al. 2010; Dererie et al 2011]. In der Literatur wurden allerdings für Weizenstroh auch Ausbeuten bis zu 98 % erreicht,

hier gilt es die bereits erwähnten Inhibierungseffekte zu beachten. Wang et al. fanden eine starke Abhängigkeit der Glucoseausbeute von der Substratkonzentration in der Hydrolyse [vgl. Wang et al., S.1142]. Für Cellulosefrachten von  $50 \text{ g L}^{-1}$  berichten sie eine Verflüssigungsrate von 50 %, ähnliche Werte wurden auch von anderen Gruppen publiziert [vgl. Dadi et al. 2006, S. 906; Petersson et al. 2007, S.816; Luo und Liu 2010, S.2]. Die in der vorliegenden Arbeit eingesetzte Cellulosefracht betrug  $47 \text{ g L}^{-1}$ . An dieser Stelle darf nicht unerwähnt bleiben, dass im Labor bei vergleichbaren Substratkonzentrationen auch höhere GR berichtet wurden [vgl. Mohagheghi et al. 1991, S.76; Saha et al 2006, S.451; Lu et al. 2010, S.365; Ramos et al. 2015, S.198]. Um die Möglichkeit einer optimierten Hydrolyse zu berücksichtigen wurde in der Prozessoptimierung neben den Laborergebnissen auch eine Variante mit angenommenen 90 % GR und 85 % XR untersucht. Dieser Prozess wird in den Ergebnissen als  $200^{\circ}\text{C}/20\text{min opt.}$  bezeichnet. Hierbei handelt es sich lediglich um einen theoretischen Wert, da diese Ergebnisse in den Versuchen nicht nachgewiesen werden konnten.

Die Fermentation wurde in der vorliegenden Arbeit mit *Saccharomyces cerevisiae* durchgeführt. Dieser Organismus ist ohne genetische Modifikation nur zur Verwertung von Hexosen in der Lage. Aus diesem Grund wurde für die Prozessoptimierung auch eine Variante mit kombinierter Pentosen und Hexosenverwertung berücksichtigt. Dieser Prozess wird als  $200^{\circ}\text{C}/20\text{min opt} + \text{C}_5$  bezeichnet. Auch hierbei handelt es sich lediglich um einen theoretischen Wert, der in den Laborversuchen nicht bestätigt wurde. Allerdings ist eine kombinierte  $\text{C}_5$  und  $\text{C}_6$  Zuckerverwertung wie in der Literatur berichtet wird bereits großtechnisch möglich [vgl. Clariant; BetaRenwables]. Im Versuch konnte eine Ethanolausbeute aus Glucose von 80 % des stöchiometrisch möglichen erzielt werden. Durch optimierte Fermentation konnten in der Literatur bereits Ausbeuten von 96 % nachgewiesen werden. Die vergleichbar geringe Ausbeute im Versuch kann durch Batch-Fermentation und aerobe Bedingungen am Beginn der Fermentation erklärt werden [vgl. Laopaiboon et al. 2007]. Für die Prozessoptimierung wurde eine Umwandlungsrate von 95 % oder 0,48 g Ethanol je Gramm Glucose angenommen. Ergebnisse der Fermentation in Tabelle 38 sind bereits mit dieser optimierten Umwandlung angegeben.

**Tabelle 38 Charakterisierung der Flüssigfraktion nach der Fermentation – eine Massenbilanz**  
*Quelle eigene Darstellung*

Flüssigfraktion nach der Fermentation							
	Masse	Ethanol		Xyl		Ethanol	Energiebedarf
	[g]	[g]		[g]		[m%]	Destillation [kJ]
170°C/20min	4025	47.1	± 2.0	29.3	± 0.0	1,17	5260
180°C/20min	3880	53.1	± 6,0	64.3	± 6.3	1,37	4501
190°C/20min	3690	96.4	± 5,7	56.2	± 8.1	2,61	2617
200°C/20min	3600	101.9	± 5,7	83.3	± 1.4	2,83	2402
200°/ 20min opt.	3771	171.6	*	86.7	*	4,53	1758
200°C/20min opt.+C <sub>5</sub>	3771	213.5	*	0.0	*	6,98	1487

### 7.2.2.3 Biogaspotentiale

Die Bestimmung der Biogaspotentiale erfolgte wie bereits erwähnt für Stroh und feste Biomasse nach der Hydrolyse mittels Batch Gärtests nach VDI4630. Die Ergebnisse der Potentialtests sind in Tabelle 39 zusammengefasst.

**Tabelle 39 Biogasausbeuten und Methangehalte von Stroh und fester Biomasse nach der Hydrolyse**

*Quelle: eigene Darstellung*

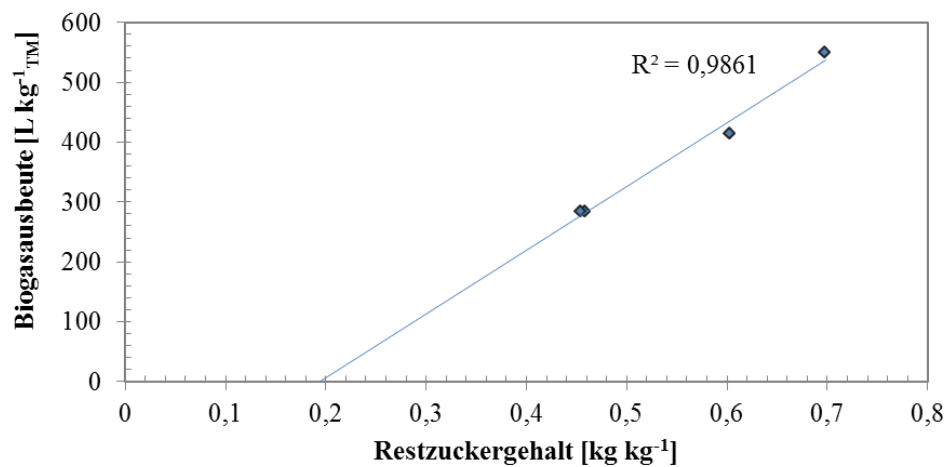
	Vorbehandeltes Stroh				Feste Biomasse nach der Hydrolyse			
	biogas		c CH <sub>4</sub>		biogas		c CH <sub>4</sub>	
	[L kg <sup>-1</sup> <sub>DM</sub> ]		[v/v-%]		[L kg <sup>-1</sup> <sub>DM</sub> ]		[v/v-%]	
Unbehandeltes Stroh	478	± 6.3	55	± 1.5	546	± 10.9	51	± 0.0
170°C/20min	549	± 14.8	54	± 1.5	548	± 21.9	50	± 0.7
180°C/20min	508	± 7.0	55	± 1.2	413	± 6.9	53	± 1.0
190°C/20min	517	± 18.5	53	± 1.2	288	± 11.5	50	± 0.5
200°C/20min	521	± 12.0	55	± 1.3	292	± 8.8	50	± 1.0

Für unbehandeltes Weizenstroh wurde ein spezifischer Biogasertrag von 490 NL kg<sub>OTM</sub><sup>-1</sup> mit einer Methankonzentration von 55 % bestimmt. Werte in der Literatur schwanken zwischen 50 – 297 NL kg<sub>OTM</sub><sup>-1</sup> Methanertrag [vgl. Kaparaju et al. 2009, S.2565; Bauer et al. 2009, S.53; Zhong et al. 2011, S.11180; KTBL Biogasrechner], die im Versuch ermittelte Ausbeute liegt im oberen Bereich dieser Werte. Die große Bandbreite in den Literaturergebnissen kann durch variierende Partikelgrößen und unterschiedliche Fermentationstemperaturen erklärt werden.



Steigende Biogaserträge durch Vorbehandlung der Biomasse mittels Steam-Explosion wurden bereits in anderen Arbeiten berichtet [vgl. Kaparaju et al. 2009; Bauer et al. 2009; Hendriks und Zeemann 2009; Chandra et al. 2012]. Negative Auswirkungen auf die Biogasfermentation durch die Vorbehandlung und Bildung von Inhibitoren konnte in den durchgeführten Laborversuchen nicht beobachtet werden. Die geringeren Methanausbeuten bei steigender Intensität der Vorbehandlung lassen sich vielmehr durch den Verlust leicht abbaubarer Zucker erklären. Intensive Vorbehandlungsbedingungen führten also zu einem sinkenden Methanertrag bei höherem Energiebedarf, allerdings zeigte sich eine deutliche Steigerung der Abbaugeschwindigkeit mit einem Faktor 2-2,6. Einflüsse der Abbaugeschwindigkeit wurden nicht in der energetischen Optimierungsrechnung berücksichtigt, die Ergebnisse werden daher an dieser Stelle nicht angeführt.

Für die feste Fraktion nach der Hydrolyse wurde eine lineare Abhängigkeit ( $y = 1062.8x - 205.49$ ) des Biogasertrages vom Restzuckeranteil in der Biomasse ermittelt, vergleiche dazu Abbildung 66.



**Abbildung 66 Biogasausbeute des festen Rückstandes nach der Hydrolyse in Abhängigkeit des Restzuckeranteiles**  
*Quelle: eigene Darstellung*

Diese Abhängigkeit führt zu der Aussage, dass höhere Verzuckerungsraten in der Hydrolyse zu deutlich reduzierten Biogaserträgen führen. Kaparaju et al. unterstützen mit ihren Ergebnissen diese These nicht [vgl. Kaparaju et al. 2009]. Sie berichten in ihrer Studie auch bei Verzuckerungsraten von 90 % hohe Biogaserträge. Hier ist allerdings zu beachten, dass Kaparaju et al. Fermentationsschlempe als Substrat eingesetzt haben. In dieser Schlempe sind auch Kohlenhydrate enthalten die nicht der

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

eingesetzten Biomasse zuzurechnen sind, wie Essigsäure, Hefe oder Enzyme. In der vorliegenden Arbeit wurde durch Auslaugung der Biomasse mit Wasser nur der Biogasertrag der verbleibenden Biomasse bestimmt. Biogaserträge der Flüssigfraktion wurden in der vorliegenden Arbeit nicht bestimmt sondern berechnet, auch hier wird der Biogasertrag anderer Kohlenstoffquellen nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse der berechneten Biogaserträge nach Buswell für die anfallenden Flüssigfraktionen im Prozess sind in Tabelle 40 zusammengefasst.

**Tabelle 40 Biogasausbeuten und Methangehalte von Hydrolysat Flüssigkeit nach der Fermentation**

*Quelle: eigene Darstellung*

	Hydrolysat				Flüssigkeit nach der Fermentation			
	biogas		c CH <sub>4</sub>		biogas		c CH <sub>4</sub>	
	[L kg <sup>-1</sup> <sub>DM</sub> ]		[v/v-%]		[L kg <sup>-1</sup> <sub>DM</sub> ]		[v/v-%]	
Unbehandeltes Stroh	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	
170°C/20min	24.7	*	50	*	6.7	*	50	*
180°C/20min	40.0	*	50	*	19.0	*	50	*
190°C/20min	60.5	*	50	*	20.2	*	50	*
200°C/20min	65.1	*	50	*	21.5	*	50	*
200°C/20min opt.	91.3	*	50	*	21.1	*	50	*
200°C/20min opt.+C <sub>5</sub> **	91.2	*	50	*	4.0	*	50	*

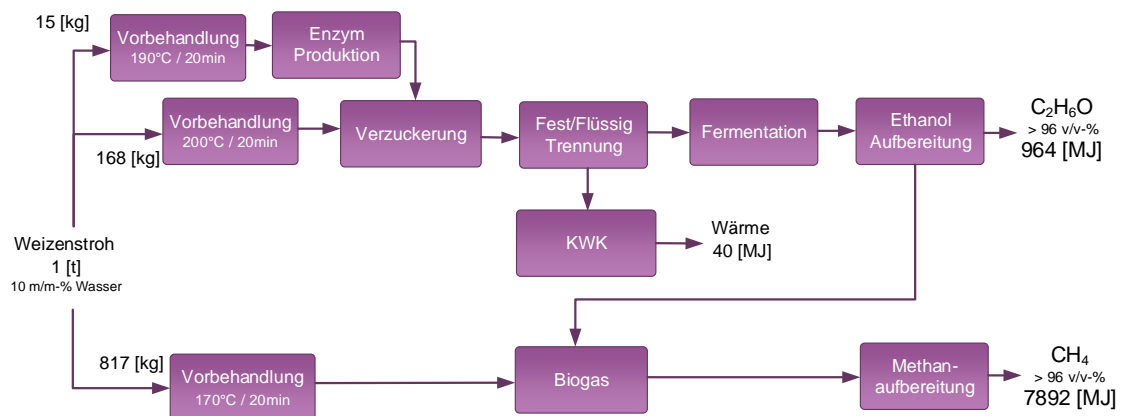
### 7.2.3 Prozessoptimierung mittels Prozessnetzwerksynthese

Die durch Literaturwerte und Laborversuche gesammelten Daten, wie in Tabelle 33 zusammengefasst, dienen als Grundlage für die durchgeführte Prozessoptimierung. Die energetische Optimierung wurde mittels PNS wie in Kapitel 4 beschrieben durchgeführt. Die Maximalstruktur wurde anhand des Flussdiagrammes wie in Abbildung 62 dargestellt entworfen. Alle getesteten Vorbehandlungsbedingungen wurden in der Maximalstruktur berücksichtigt. Ergänzend zu den Ergebnissen aus dem Labor wurden folgende Möglichkeiten in die Berechnung integriert. Neben der alleinigen Hexosenverwertung in der Ethanolfermentation wurde auch eine kombinierte Hexosen-/Pentosenverwertung berücksichtigt. Ebenfalls berücksichtigt wurde ein verbesserter Hydrolyseprozess mit Verzuckerungsraten von 90 %. Bei steigenden Ethanolausbeuten wurden die Methanausbeuten entsprechend reduziert. Energieautarkie des Prozesses wurde als Randbedingung festgelegt. Energiebereitstellung wurde in die

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Maximalstruktur anhand einer Kraftwärmekopplung befeuert mit Stroh, Lignin oder Biogas realisiert. Der Wirkungsgrad der Kraftwärmekopplung wurde mit 40 % Stromerzeugungswirkungsgrad und 50 % Wärmewirkungsgrad basierend auf dem unteren Heizwert festgelegt. Der untere Heizwert wurde nach der Gleichung von Thomsen et al. [vgl. Thomsen et al. 2008, S.4223] berechnet. Bei Vorbehandlung mit Steam-Explosion wurden neben dem Energiebedarf für die Dampferzeugung und die Destillation keine weiteren Verbräuche berücksichtigt. Es wurde davon ausgegangen, dass die restliche Prozesswärme durch Wärmerückgewinnung des Steam-Explosion Abdampfes gewonnen werden kann. Die für die Destillation notwendige Energie wurde anhand der Gleichung aus Tabelle 33 und der erhaltenen Ethanolkonzentration ermittelt (vergleiche Tabelle 38).

Die aus der Maximalstruktur durch ergebnisoffene Simulation generierte Optimalstruktur sieht wie in Abbildung 67 dargestellt aus.



**Abbildung 67 Optimalstruktur ermittelt durch Prozessnetzwerksynthese**

*Quelle: eigene Darstellung*

Bei einer Tonne Stroh Inputmaterial werden 81,7 % der Masse also 817 kg bei der für die Biogasproduktion optimalen Vorbehandlungstemperatur von 170°C behandelt und direkt in der Biogasanlage verwertet. 16,9 % der Masse werden bei 200°C vorbehandelt und durch Hydrolyse und Fermentation in Bioethanol umgewandelt. Um den Energieaufwand der Destillation zu minimieren werden in der Fermentation Pentosen und Hexosen in Ethanol umgewandelt. Das Abwasser nach der Produktabtrennung gelangt in die Biogasanlage. Der Prozess erzeugt aufgrund der Notwendigkeit von Energieautarkie, 40 MJ Abwärme die nicht weiter im Prozess genutzt werden kann. Ethanol entsteht lediglich als Nebenprodukt der Energieproduktion. Für die Energieproduktion wird die Verbrennung von Lignin, der Verbrennung von Stroh oder

Biogas vorgezogen. Nicht berücksichtigt wird die notwendige Trocknung des Ligninrückstandes oder die deutliche Minderung des Heizwertes aufgrund der Restfeuchtigkeit in der Biomasse.

### 7.2.3.1 Sensitivitätsanalyse der Prozessoptimierung

Um die Belastbarkeit der erhaltenen Optimalstruktur zu ermitteln wurde die Menge des produzierten Ethanols variiert und die erhaltenen Energieausbeuten mit einander verglichen. Das System aus Abbildung 62 bleibt dabei unverändert, lediglich die Mengen über den Ethanol- und Biogasweg verändern sich. Steigende Ethanolmenge führt zu einem steigenden Anteil Überschussstrom, welcher sich aus der Verbrennung des Ligninrückstandes ergibt. Ligninrückstand aus der Bioethanolproduktion bei maximaler Ausbeute der Zucker in der Hydrolyse und Fermentation wird bevorzugt verbrannt und nicht in der Biogasanlage verwertet. Hier gilt wiederum zu beachten, dass im Modell keine Trocknung des Restes berücksichtigt wurde. In Tabelle 42 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den optimierten Ethanolprozess (optimierte Hydrolyse und Möglichkeit der C5 Zuckerverwertung) dargestellt.

**Tabelle 41 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Energieausbeuten bei variierender Ethanolausbeute für den optimierten Ethanolprozess**

*Quelle: eigene Darstellung*

EtoH [MJ]	Vorbehandlung Biogas	Vorbehandlung Ethanol	Methan +			
			Methan [MJ]	Ethanol [MJ]	Strom [MJ]	Wärme [MJ]
0	170°C 20min	entfällt	8838	8838		318
500	170°C 20min	200°C 20min	8346	8846		174
1000	170°C 20min	200°C 20min	7830	8830	23	58
1500	170°C 20min	200°C 20min	6941	8441	351	310
2000	170°C 20min	200°C 20min	6053	8053	679	562
2500	170°C 20min	200°C 20min	4708	7208	1385	2492
3000	170°C 20min	200°C 20min	3729	6729	1789	3079
3500	170°C 20min	200°C 20min	2750	6250	2191	3666
4000	170°C 20min	200°C 20min	2504	6504	1991	1568
4500	170°C 20min	200°C 20min	1616	6116	2319	1819
5000	170°C 20min	200°C 20min	729	5729	2646	2071
5270	entfällt	200°C 20min	251	5251	2933	3407

- 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

Die optimalen Vorbehandlungsbedingungen für die Biogas- und Bioethanolerzeugung ändern sich nicht. Die Ethanolerzeugung erfolgt in allen Fällen durch kombinierte Pentosen- und Hexosenverwertung. Dies ergibt sich aufgrund des deutlich sinkenden Energiebedarfes für die Destillation bei steigender Ethanolkonzentration. Bei steigender Ethanolmenge nimmt die Energieausbeute an Ethanol und Methan deutlich ab es kann dafür zusätzlich Strom gewonnen werden, sodass die Gesamtenergieausbeute nahezu konstant bleibt. Hier gilt allerdings zu beachten, dass im Ethanolprozess alle Reststoffe einer energetischen Verwertung zugeführt werden können, der Energiegehalt der Biogasgülle jedoch nicht energetisch bewertet wurde.

Die Sensitivitätsanalyse wurde auch für den Prozess mit den Laborausbeuten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 42 zusammengefasst. Deutlicher Unterschied zum optimierten Ethanolprozess ist die geringere Methanausbeute und die höhere Stromausbeute. Der höhere Stromertrag ergibt sich einerseits aus dem verminderten internen Strombedarf aufgrund eines reduzierten Biogasstromes in der Methanaufreinigung und eines höheren Inputstromes in die KWK als fester Rückstand der Ethanolerzeugung. Ebenfalls reduziert ist die Überschusswärme aufgrund deutlich höheren Energiebedarfs in der Destillation.

**Tabelle 42 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Energieausbeuten bei variierender Ethanolausbeute**

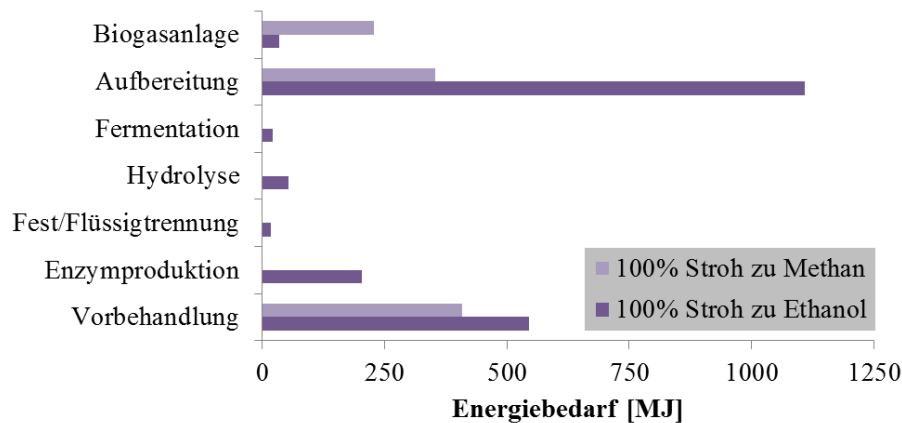
*Quelle: eigene Darstellung*

EtoH [MJ]	Vorbehandlung Biogas	Vorbehandlung Ethanol	Methan +			
			Methan [MJ]	Ethanol [MJ]	Strom [MJ]	Wärme [MJ]
0	170°C 20min	entfällt	8838	8838		318
500	170°C 20min	200°C 20min	7897	8397	250	174
1000	170°C 20min	200°C 20min	6279	7279	1093	26
1500	170°C 20min	200°C 20min	4616	6116	1956	310
2000	170°C 20min	200°C 20min	2955	4955	2819	496
2500	170°C 20min	200°C 20min	1292	3792	3682	731

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde darüber hinaus der Energiebedarf der Einzelprozesse bei angenommener 100% Ethanol- oder Biogasproduktion ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 68 dargestellt. Erkennbar ist die Dominanz der Ethanolaufreinigung (Ergebnisse zeigen den optimierten Ethanolprozess) die sich

## - 6. Energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger -

deutlich negativ gegenüber den Energieaufwendungen für die Biogasproduktion auswirkt.



**Abbildung 68 Energiebedarf der Teilprozesse bei der Verwertung von Weizenstroh**  
*Quelle: eigene Darstellung*

Für eine optimierte Produktabtrennung wie sie von Clariant entwickelt wurde wird eine mögliche Energieeinsparung von 50 % gegenüber konventioneller Destillation berichtet. Wird diese Einsparung im Modell berücksichtigt ändert sich die Optimalstruktur nicht, da im Prozess ohnehin ein Wärmeüberschuss vorhanden ist.

### **7.3 Zusammenfassung und Ausblick der energetischen Verwertung von Stroh**

Weizenstroh steht aufgrund seiner alternativen Nutzungsformen als Wirtschaftsdünger und Einstreumaterial für die energetische Verwertung nur in begrenzter Menge zur Verfügung. Die Verbrennung von Stroh hat sich aufgrund des niedrigen Ascheschmelzpunktes und des Verlustes der organischen Düngewirkung in den vergangenen Jahren nicht durchsetzen können. Die biotechnologische Verwertung ist eine alternative Nutzungsform mit hohem Potential aber großen Herausforderungen. Die prominentesten Verfahren zur biotechnologischen Nutzung von Stroh sind Bioethanol- und Biogaserzeugung. Beide Verfahren sind bei der Verwertung von Stroh mit technischen und ökonomischen Herausforderungen konfrontiert. Ohne Vorbehandlung des Rohstoffes ist eine biologische Verwertung im industriellen Maßstab nicht möglich. Entwicklungen in beiden Technologien haben die Verwertung von Stroh in den letzten Jahren konkurrenzfähig gemacht. Dabei wurden die beiden Prozesse in der Vergangenheit immer separat optimiert. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist allerdings anzustreben, die Energieausbeute nicht innerhalb eines Prozesses sondern in Bezug auf

den eingesetzten Rohstoff zu maximieren. Bei der kombinierten Prozessoptimierung beider Technologien können mögliche Synergien aufgezeigt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde eine ergebnisoffene energetische Optimierung mittels Prozessnetzwerksynthese durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass bei alleiniger Bewertung des Energieoutputs die Verwertung in Biogasanlagen der Verwertung in Bioethanolanlagen vorzuziehen ist. Eine Erweiterung des Modells um betriebswirtschaftliche, soziale und umweltrelevante Faktoren könnte die Aussagekraft der Optimierung im Sinne der Nachhaltigkeit deutlich verbessern.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

### **8.1 Die Energiestrategie von morgen schon heute denken**

Für die Entwicklung einer nachhaltigen Gesellschaft ist die Umstellung des Energiesektors eine unbedingte Voraussetzung. Neben verbesserter Energieeffizienz wird die Bereitstellung erneuerbare Energie unumgänglich sein. Derzeit ist unsere Gesellschaft von der Nutzung fossiler Energieträger, in der Form von Öl, Kohle, und Gas abhängig. Als erneuerbare Energieträger stehen auf der Erde die Sonne als primärer Energielieferant und ihre Derivate wie Wasserkraft oder Biomasse (und andere), zur Verfügung.

Es ist die Aufgabe der heutigen Gesellschaft die Umstellung des Energiesektors in die Wege zu leiten. Bereits heute gibt es viele verschiedene Technologien die diesen Weg ermöglichen sollen. Bei der Auswahl geeigneter Technologien ist auf viele verschiedene Parameter Rücksicht zu nehmen. Im Besonderen wird auf den langfristigen gesellschaftlichen Nutzen zu achten sein. Bereits heute muss man sich daher über das Energiesystem von morgen Gedanken machen um so wenig Umwege wie möglich auf dem Weg zu einem nachhaltigen Energiesystem in Kauf nehmen zu müssen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die menschlichen Interessen im Zusammenhang mit Energieverbrauch wie in Kapitel 2.3 erwähnt zukünftig nicht grundlegend ändern werden. Es sollte aber beachtet werden, dass ein Wandel des genutzten Energieträgers weitreichende Auswirkungen im gesamten System haben kann. Bei der Entwicklung einer Energiestrategie muss diese Wandelbarkeit berücksichtigt werden. Es sollte daher vor allem den Verbrauchern und weniger dem Weg und der Ressource Beachtung geschenkt werden. Die originäre Aufgabe unserer

Nutzung von Energie und daher auch von erneuerbarer Energie ist die Befriedigung von menschlichen Bedürfnissen und somit von Energie im Allgemeinen und nicht der Ersatz bestimmter fossiler Brennstoffen. Ich möchte an dieser Stelle den in Kapitel 4.3 vorgenommenen Exkurs in die Thematik des Individualverkehrs und den Diskurs zu flüssigen und gasförmigen Brennstoffen in Erinnerung rufen. Es ist richtig, dass Benzin und Diesel wie wir sie heute für den Transport einsetzen ohne Änderungen am Nutzungssystem durch erneuerbare Alternativen ersetzt werden können, es gilt aber die Sinnhaftigkeit einer Investition in diese Technologie jedenfalls kritisch zu prüfen. Wie in der vorliegenden Arbeit gezeigt werden konnte, ist bei der biotechnologischen Verwertung die Energieausbeute bei der Vergasung von Biomasse deutlich höher als bei der Erzeugung flüssiger Brennstoffe. Trotzdem gibt es signifikante Aktivitäten im Bereich der alternativen Flüssigbrennstoffe. Dies ergibt sich aus einer zu hinterfragenden Fokussierung auf den Erhalt des bestehenden Systems, woraus sich die oben getätigte Aussage der notwendigen intensiveren Beachtung der Ziele ableiten lässt.

## **8.2 Die Rolle von Biomasse in einer nachhaltigen Energiestrategie**

An dieser Stelle ist zu beantworten, wie sich die Nutzung von Biomasse bestmöglich in eine zukunftsorientierte Gesamtstrategie einbetten lässt. Hier sind vor allem die kurz- und mittelfristigen Vorteile aber auch die langfristige Nutzung zu bedenken.

Um der Argumentation von Kapitel 8.1 zu folgen muss zu Beginn die Energiestrategie der Zukunft entworfen werden. Hier wird wieder auf Kapitel 4.3 verwiesen, im welchen bereits ausführlich die Vorteile von Gas als Energieträger angeführt wurden. Es ist daher wahrscheinlich, dass Gas neben Strom eine zentrale Rolle in der Energieversorgung der Zukunft einnehmen wird. Beide Energieträger können aus Biomasse gewonnen werden. Die Vorteile der eingesetzten Technologie sind dabei zum einen vom eingesetzten Rohstoff aber auch von den regionalen Bedingungen beeinflusst. Eine optimale Nutzung der in einer Region vorhandenen Bioressourcen ist daher durch vergleichende Bewertung zu bestimmen.

An dieser Stelle wird noch einmal die Berücksichtigung der zu erfüllenden Bedürfnisse aus Kapitel 3 in Erinnerung gerufen. Die Bereitstellung von Energie durch Biomasse soll immer nur dann erfolgen, wenn keine alternative Nutzungsform vorhanden ist. Neben den heute bestehenden Verwertungsformen von Biomasse wird es in der Zukunft noch viele weitere Anwendungsfälle geben. Langfristig sind alle derzeit auf fossile



- 8. Zusammenfassung und Ausblick -

Ressourcen basierte Technologien durch erneuerbare Alternativen zu ersetzen. Für ein besseres Verständnis ist Abbildung 69 die derzeitige Verwertung von Rohöl dargestellt. Zukünftig wird es also verstärkt zur Entwicklung von Bio Raffinerie-konzepten kommen. Dabei ist davon auszugehen, dass ähnlich der in dieser Arbeit beschriebenen Lignocelluloseethanolanlage, im Prozess organische Reststoffe anfallen werden. Die energetische Verwertung dieser Prozessströme wird dabei ein wichtiger Bestandteil dieser Bio Raffineriekonzepte werden. Aufgrund des meist hohen Wassergehaltes dieser Prozessströme ist eine biotechnologische Verwertung wahrscheinlich. Es ist also damit zu rechnen, dass Investitionen im Bereich der anaeroben Biomasseverwertung einen langfristigen Nutzen haben werden. Neben der Verwertung organischer Reststoffe aus Bio Raffinerien stehen auch andere Reststoffe zu Verfügung für die es neben der energetischen Verwertung oft keine alternative Nutzungsform gibt. Eine Einteilung von Reststoffen gemäß ihrer stofflichen und energetischen Verwertbarkeit ist derzeit noch ausständig.

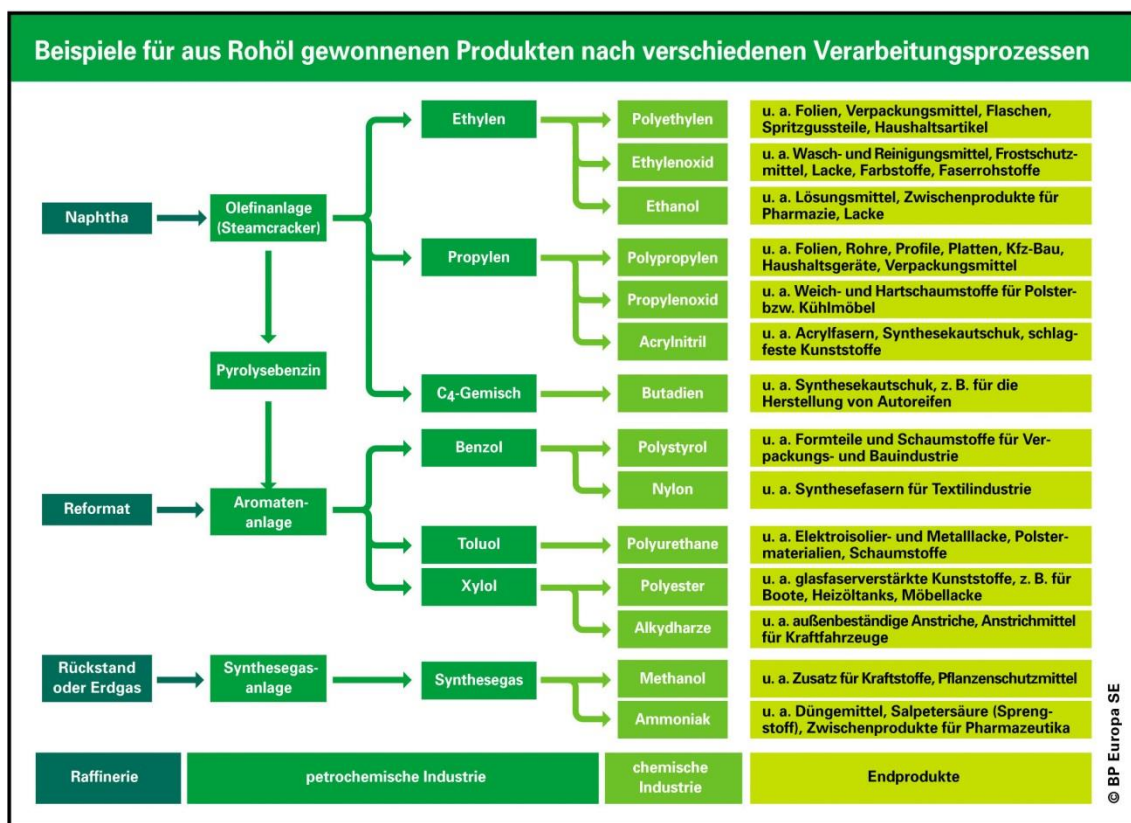


Abbildung 69 Die Verwertung von Rohöl

Quelle: [http://www.bp.com/de\\_de/germany/presse/mediathek/grafiken.html](http://www.bp.com/de_de/germany/presse/mediathek/grafiken.html)

### **8.3 Die energetische Verwertung von Wirtschaftsdünger**

Tierische Exkrememente sind ein Beispiel für organische Reststoffe für die außer dem Einsatz als Wirtschaftsdünger und der energetischen Verwertung bis heute keine alternativen Nutzungsformen bekannt sind. Wirtschaftsdünger ist ein wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen Landwirtschaft und notwendig für einen optimalen Nährstoffzyklus. Durch den Einsatz anaerober Fermentation kann aus dem Wirtschaftsdünger Energie erzeugt werden ohne die Düngewirkung negativ zu beeinflussen. Trotzdem wird nur ein sehr geringer Teil des anfallenden Mistes zur Energieerzeugung genutzt. Dies ist ein Resultat aus dem bis heute noch fehlenden Anlagenkonzept, welches auf die speziellen Herausforderungen bei der Verwertung dieses Rohstoffes Rücksicht nimmt. Aus ökologischen Gesichtspunkten wäre eine Verwertung der Gülle aber in jedem Fall anzustreben. Dabei liegt der größte ökologische Nutzen, wie in Kapitel 6.7.6 ermittelt, nicht in der sehr oft angeführten direkten Emissionsreduktionen bei Lagerung und Ausbringung sondern in den Emissionsreduktion die sich aus der Erzeugung erneuerbarer Energie ergeben.

In der vorliegenden Arbeit wurde für Gülle ein erster wichtiger Schritt für die Konzeptionierung eines Fermentationssystems gemacht. Es konnte gezeigt werden, dass aufgrund des geringen Energiegehaltes und den daraus resultierenden hohen Transportkosten und spezifischen Transportemissionen von Rohgülle die Verwertung am Hof aus ökonomischer wie auch ökologischer Sicht zu bevorzugen ist. Die spezifischen Gasgestehungskosten dieser Hofanlagen sind bei Nutzung der derzeit vorhandenen Technologien allerdings noch nicht konkurrenzfähig und dezentrale Kleinanlagen daher auf staatliche Zuschüsse angewiesen. Als Möglichkeit zur Reduktion der Investitions- und Betriebskosten wurden die Nutzung vorhandener Infrastruktur und die Einbindung eines alternativen Rührkonzepts angeführt. Eine Senkung der Investitions- und Betriebskosten durch Entfall der Fermenterheizung kann den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit folgend nicht empfohlen werden. In der vorliegenden Arbeit konnte für die Verwertung von Gülle noch kein fertiges Anlagenkonzept entworfen werden, aber es wurden die wichtigsten zu beachtenden Eckdaten zusammengefasst. Dabei wurde vor allem deutlich, dass der Verwertung des anfallenden Gases zukünftig besondere Bedeutung zukommen sollte. Die Verwertung in einem BHKW ist zum einen mit hohen Investitionskosten verbunden und zum anderen kann Strom auch aus anderen alternativen Quellen und das oft günstiger erzeugt

- 8. Zusammenfassung und Ausblick -

werden. Bei der Vergasung ist daher vor allem die Erzeugung von Biomethan von Interesse. Derzeit ist die Aufreinigung des Biogases zu Biomethan noch mit erheblichen Kosten verbunden und eine hofintegrierte Verwertung noch undenkbar. Es wäre allerdings zu prüfen ob eine regionale Verwertung möglich ist und wie in diesem System die Rahmenbedingungen zu definieren sind.

Nur überblicksmäßig wurde im Kapitel 6 die Wirtschaftlichkeit kleiner hofintegrierter Biogasanlagen behandelt. Abschließend wird an dieser Stelle deshalb auf den zu erwartenden Jahresumsatz und die daraus resultierenden maximalen Investitionskosten für diese Kleinanlagen eingegangen. In Tabelle 43 sind diese Zahlen für Rindergülle angegeben. Auf der linken Seite der Tabelle wurde mit den in Kapitel 6.2.1 abgeleiteten 16,4 m<sup>3</sup> Gülle je GVE unter Berücksichtigung einer Weideperiode gerechnet, rechts wurde von einer intensiven Tierhaltung ohne Weideperiode ausgegangen. Für die Verwertung des Gases wurde vorerst keine Förderung berücksichtigt und von einem Erdgaspreis von 9 €Cent je kWh ausgegangen. Dieser Wert kann als repräsentativ für die Eigennutzung des Gases angesehen werden, bei Einspeisung wäre der Preis auf 3,5 €Cent zu reduzieren.

**Tabelle 43 Vereinfachte Ermittlung erzielbarer Erlöse bei der Methanerzeugung aus Rindergülle**

EtoH [MJ]	Gülleanfall [m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> ]	Methan [kWh a <sup>-1</sup> ]	Erlös [€ a <sup>-1</sup> ]	Gülleanfall [m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> ]	Methan [kWh a <sup>-1</sup> ]	Erlös [€ a <sup>-1</sup> ]
25 GVE	410	50020	4502	518	63135	5682
50 GVE	820	100040	9004	1035	126270	11364
70 GVE	1148	140056	12605	1449	176778	15910
150 GVE	2460	300120	27011	3105	378810	34093

Es ist zu erkennen, dass bei Viehbeständen kleiner 70 GVE wie sie in Österreich vorherrschend sind, bei einer angenommenen Abschreibungsdauer von 10 Jahren nur sehr geringe Summen für eine Investition zur Verfügung stehen, vor allem da neben den Anlagenkosten auch noch die Betriebs- und Instandhaltungskosten zu berücksichtigen sind. Derzeit sind die Anlagenkosten für kleine Biogasanlagen vorgegeben und nur ausreichend große Betriebe können eine anaerobe Verwertung der Gülle verwirklichen. Für eine existierende Kleinanlage mit für 130 Milchkühe wird eine Investitionssumme von 220.000 € angegeben [vgl. Theißen 2015, S.103].

In Deutschland wird in vielen Fällen die Wirtschaftlichkeit der Anlagen durch die Beimischung von Co-Substraten erhöht. Dabei gilt es aber zu beachten, dass sich dadurch die Komplexität der Anlage wesentlich erhöht. Es ist allerdings davon auszugehen, dass Viehbetriebe durch den Betrieb einer Biogasanlage nur ein Minimum an Mehrarbeit in Kauf nehmen wollen, dies wird auch in einem Fachinterview bestätigt. Das Ziel von Anlagenbauern sollte also sein, kreative Lösungen zu suchen, die mit Investitionssummen wie sie sich aus Tabelle 43 ableiten lassen, realisierbar sind.

#### **8.4 Die energetische Verwertung fester agrarischer Abfälle**

In dieser Arbeit wurde die energetische Verwertung fester agrarischer Abfälle im speziellen am Rohstoff Weizenstroh diskutiert. Dabei wurde die Erzeugung von Bioethanol mit der Erzeugung von Biomethan anhand der Ermittlung von Nettoenergieausbeuten vergleichend bewertet. Ziel war eine ergebnisoffene Analyse welche die Ressourceneffizienz der Technologie ins Zentrum der Bewertung rücken sollte. Es war dies die erste Arbeit die diesen ergebnisoffenen Ansatz gewählt hat und einen direkten Vergleich der biotechnologischen Verwertung von Stroh ermöglicht hat. Bei alleiniger energetischer Verwertung des Strohs konnten dabei klare Vorteile der Vergasung ermittelt werden. Für eine höhere Relevanz der Ergebnisse ist das System um eine thermische Verwertung (Verbrennung und Vergasung) und eine mögliche stoffliche Verwertung zu erweitern. In dieser Arbeit wurde somit noch nicht die optimale Verwertung von Stroh ermittelt es wurde aber gezeigt, dass ein systematischer Vergleich unterschiedlichster Technologien unbedingt erforderlich ist.

#### **8.5 Empfehlungen für weiterführende Arbeiten**

Das zentrale Ergebnis dieser Arbeit ist die Forderung nach verstärkter Verschaltung von Technologieentwicklung und Systemanalyse. Dies gilt dabei nicht nur für die Energiewirtschaft, wie sie in der vorliegenden Arbeit behandelt wurde, sondern auch für andere Wirtschaftszweige. Nur durch eine sorgfältig durchgeführte Analyse kann größtmögliche Ressourceneffizienz gewährleistet werden. Die Ergebnisse dieser Systemanalysen sollten schließlich die Grundlage für Technologieförderprogramme bilden.

Für die beiden untersuchten Rohstoffe Wirtschaftsdünger und Stroh können dabei im speziellen die die folgenden Aussagen abgeleitet werden:

## - 8. Zusammenfassung und Ausblick -

Für Wirtschaftsdünger kann die im Kapitel 8.3 gestellte Forderung nach der Entwicklung einer kostengünstigen Gasverwertungstechnologie um folgende Punkte erweitert werden. Das zu entwerfende Anlagenkonzept wird in besonderem Maße von regionalen Gegebenheiten abhängig sein. Je nach Viehdichte in einer Region werden dezentrale Lösungen je Hof oder regionale Lösungen für mehrere Landwirte zu finden sein. Die bestmögliche Gasverwertung kann sich dabei wesentlich unterscheiden. Auch gilt es zu überlegen ob eine zentrale Verwertung nach Konzentrierung der Gülle, wie sie auch bereits für Gärreste eingesetzt [vgl. REBIOwater] wird eine interessante Alternative darstellen kann.

Bei der Verwertung von Stroh ist, wie bereits oben erwähnt, das in dieser Arbeit entwickelte Modell in jedem Fall um die thermische Verwertung zu erweitern. Wobei im Speziellen die Vergasung von Stroh von Interesse ist. Dabei wird es dann auch von besonderer Bedeutung sein die Düngewirkung organischer und anorganischer Reststoffe zu bewerten. Außerdem ist der möglichen stofflichen Verwertung in einer Bioraffinerie größere Aufmerksamkeit zu schenken.

Um für organische Reststoffe bereits vor der Durchführung einer Technologiebewertung eine Vorauswahl der anwendbaren Technologien ermöglichen zu können, wäre eine bessere Kategorisierung von Reststoffen erforderlich.

## 9 Literaturverzeichnis

- Abfallwirtschaftsgesetz 2002: Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft. BGBl. I Nr.102/2002
- Adler, Tina: Better Burning, Better Breathing: Improving Health with Cleaner Cook Stoves. In: Environmental Health Perspectives Vol.118/2010, Heft 3, S. A124-A129
- Aicher, Thomas; Blum, Ludger; Specht, Michael: Wasserstoffgewinnung aus Erdgas – Anlagenentwicklung und Systemtechnik.  
URL:[http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004\\_03\\_02.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004_03_02.pdf)
- Alvira P; Tomás-Pejó, E; Ballesteros, M; Negro, M.J: Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. In: Bioresource Technology Vol.101/2010, S. 4851–4861
- Amon, Barbara: Methane, Nitrous Oxide and Ammonia emissions from management of liquid manures. Final Report. 2002
- Amon, Barbara; Fröhlich, Martina; Weißensteiner, Roswitha; Zablatnik, Breda; Amon, Thomas: Tierhaltung und Wirtschaftsdüngermanagement in Österreich. Endbericht GZ LE.1.3.2/0066-II/1/2005. April 2007
- Amon, Barbara; Kryvoruchko, V.; Amon, Thomas; Zechmeister-Boltenstein, S: Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. In: Agriculture, Ecosystems and Environment Vol.112/2006, S.153-162
- Amon, Thomas; Amon, Barbara; Hpfner-Sixt, Katharina; Hackl, E; Jeremic, D; Boxberger, J: Neue Entwicklung der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung und wirtschaftliche Rahmenbedingungen.  
URL:<http://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/finish/90-bautagung-2001/299-neue-entwicklung-amon.html>.
- Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: BHKW-Kenndaten 2011. stand Juli 2011 URL:<http://asue.de/cms/upload/broschueren/2011/bhkw-kenndaten/asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf>
- Arnold, Karin; von Geibler, Justus; Bienge, Katrin; Stachura, Caroline; Borbonus, Sylvia; Kristof, Kora: Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Ein Konzept zur Verbesserung der Rohstoffeffizienz und Optimierung der Landnutzung. Wuppertal Papers Nr. 180/2009  
URL:<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Km1fmQOjvTtWJ:epub.wupperinst.org/files/3303/WP180.pdf+&cd=2&hl=de&ct=clnk&gl=at>
- Arthur, Richard; Baidoo, Martina F; Antwi, Edward: Biogas as a potential renewable energy source: A Ghanaian case study. In: Renewable Energy Vol.36/2011, S.1510-1516
- Bakan, S.; Raschke, E.: Der natürliche Treibhauseffekt. In: promet Jahrg. 28/2002, Nr.3/4, S.85-94
- Balat, Mustafa: Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. In: Energy Conversion and Management Vol.52/2011, Heft 2, S.858-875
- Banerjee, Goutami; Scott-Craig, John S; Walton, Jonathan D: Improving Enzymes for Biomass Conversion: A Basic Research Perspective. In: BioEnergy Research Vol.3/2010, Heft 1, S. 82-92
- Barfuss, Isabel; Gwavuya, Stanley; Abele, Steffen; Müller, Joachim: Biogas production vs. dung combustion as household energy in rural Ethiopia. Hohenheim : Univ. Hohenheim, 2011  
URL:[http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2013/816/pdf/Barfuss\\_2011a.pdf](http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2013/816/pdf/Barfuss_2011a.pdf)

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Bauer, Alexander; Bösch, Peter; Friedl, Anton; Amon, Thomas: Analysis of methane potentials of steam-exploded wheat straw and estimation of energy yields of combined ethanol and methane production. *Journal of Biotechnology* Vol.142/2009, S. 50–55
- Bauer, Christoph; Lebuhn, Michael; Gronauer, Andreas: Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Freising 2012.  
URL:[http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p\\_36964.pdf](http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_36964.pdf)
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Kapitel Kap. 1.1 – 1.5, Stand Juli 2007 URL:<http://www.lfu.bayern.de/energie/biogashandbuch/doc/kap1bis15.pdf>
- Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL): Basisdaten Stand 2013.  
URL:[http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/basisdaten\\_2013.pdf](http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/basisdaten_2013.pdf)
- Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL): Themenblatt Bodendruck, Freising 2010  
URL:[http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/ilt1\\_bodenfruchtbarkeit\\_themenblatt\\_bodenv Erdichtung.pdf](http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/ilt1_bodenfruchtbarkeit_themenblatt_bodenv Erdichtung.pdf)
- Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL): Verminderung gasförmiger Emissionen in der Tierhaltung. Ammoniak, Mehtan, Lachgas. RB-Nr: 08/0316 Freising:2003
- Bjerre, A.B; Schmidt, A.S: Development of chemical and biological processes for production of bioethanol. Risø National Laboratory 1997; Risø-R-967(EN)
- Bock, B.R: Poultry litter to energy: Technical and econoical feasibility. Download vom 25.03.2015
- Boodoo, A; Delaitre, C; Preston, T.R: The effect of retention time on biogas production from slurry produced by cattle fed sugar cane. In: *Tropical Animal Production* Vol.4/1977; Heft 1, S. 21-25
- Bozzo, Alvise; Reichhalter, Hannes; Dal Savio, Stefano; Guerra, Thomas: Energetische, ökologische und ökonomische Analyse von Biogasanlagen in Südtirol. Abschlussbericht 2011  
URL:[https://tis.bz.it/doc-bereiche/ren\\_doc/pdf/okobilanz-von-biogasanlagen.pdf](https://tis.bz.it/doc-bereiche/ren_doc/pdf/okobilanz-von-biogasanlagen.pdf)
- Braun, Rudolf: Biogas — Methangärung organischer Abfallstoffe. Grundlagen und Anwendungsbeispiele. In: *Innovative Energietechnik* Wien:Springer Verlag 1982
- Breiholz, Jorn; Netzhammer, Michael; Feldmann, Lisa: Energie ist Leben. Entwicklung und Armutsbekämpfung brauchen Energie. In: *Nachhaltigkeit hat viele Gesichter*, Nr.9, 2009
- Bundes-Energieeffizienzgesetz EEEffG  
URL: <http://www.bmwf.gv.at/EnergieUndBergbau/Energieeffizienz/Documents/Bundes-Energieeffizienzgesetz.pdf>
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Erneuerbare Energien 2020. Potenziale und Verwendung in Österreich. Wien, 2009
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Fortschrittbericht nach §6 Klimaschutzgesetz. Wien, 2014
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Grüner Bericht 2010. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Wien 2010
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Grüner Bericht 2011. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Wien 2011
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Grüner Bericht 2012. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Wien 2012
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Grüner Bericht 2013. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Wien 2013

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Grüner Bericht 2014. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Wien 2014
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Indikatoren-Bericht zur Biodiversität in Österreich. Wien 2013b
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Nachhaltige Entwicklung . Letzte Aktualisierung: 21.01.2015 URL: <http://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/nachhaltigkeit/nachhaltigkeit.html> vom 10.04.2015
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Das Klimaschutzgesetz. Letzte Aktualisierung: 10.10.2014 URL: [http://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik\\_national/klimaschutzgesetz/ksg.html](http://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik_national/klimaschutzgesetz/ksg.html) Download vom 10.04.2015
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Nitratrichtlinie (91/676/EWG) URL: [www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu\\_wasserrecht/Nitratrichtlinie\\_1.html](http://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu_wasserrecht/Nitratrichtlinie_1.html)
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit): Biogas Branchenmonitor Endbericht 2008. Erhebung von Wirtschaftsdaten und Trends zu Biogas in Österreich. Wien 2008
- Bundesministerium für wirtschaft und Arbeit: Technische Grundlage für die Bewertung von Biogasanlagen. BMWA 2007  
URL: [http://www.lea.at/download/Biogas/TechnischeGrundlageBiogasanlagen\\_BMWA\\_2007.pdf](http://www.lea.at/download/Biogas/TechnischeGrundlageBiogasanlagen_BMWA_2007.pdf)
- Bundesverband der landw. Berufsgenossenschaften e. V: Sicherheitsregeln für Biogasanlagen. Technische Information 2004. Kassel: Sozialversicherung für Landwirtschaft Stand 1/2013
- Busch-Lüty, Christiane: Nachhaltige Entwicklung als Leitmodell einer ökologischen Ökonomie. In: Fritz, P.; Huber, J.; Levi, H. W. (Hrsg.): Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive, S. 115-126. Stuttgart 1995
- Buswell, A.M; Mueller, H.F: Mechanism of Methane Fermentation. In: Industrial and Chemical Engineering Vol.44/1952, Heft 3; S. 550-552
- Camberato James J: Nitrogen in soil and fertilizers.  
URL: <http://www.scstma.org/upkeep/resources/files/Nitrogen%20in%20Soil%20and%20Fertilizers.pdf>
- Chae, K.J; Jang, A; Yim, S,K; Kim, I.S: The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. In: Bioresource Technology Vol.99/2008 Jan, Heft 1, S. 1-6
- Chandra, R; Takeuchi, H; Hasegawa, T; Kumar, R: Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. In: Energy Vol.43/2012, Heft 1, S. 273-282
- Chen, Yu; Yang, Gaihe; Sweeney, Sandra; Feng, Yongzhong: Household biogas use in rural China: A study of opportunities and constraints. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol.14/2010, S.545-549
- Chmiel, Horst (Hrsg.): Bioprozesstechnik. 3.Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2011
- Clark, James H: Green chemistry for the second generation biorefinery sustainable chemical manufacturing based on biomass biorefinery. In: Journal of Chemical Technology and Biotechnology Vol.82/2007, S.603-609



## - 9. Literaturverzeichnis -

- Clemens, Joachim; Trimborn, Manfred; Weiland, Peter; Amon, Barbara: Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol.112/2006, S. 171–177
- Cobb, S.A; Hill, D.T: Volatile fatty acid relationships in attached growth anaerobic fermenters. In: *Transactions of the ASAE* Vol.34/1991, Heft 6, S.2564-2572
- Côté, Caroline; Massé, Daniel I; Quessy, Sylvain: Reduction of indicator and pathogenic microorganisms by psychrophilic anaerobic digestion in swine slurries. In: *Bioresource Technology* Vol.97/2006, S. 686-691
- Cullimore, Roy D; Maule A; Mansury, N: Ambient temperature methanogenesis from pig manure waste lagoons: Thermal gradient incubator studies. In: *Agricultural Wastes* Vol.12/1985, Heft 2, S. 147-157
- Dadi, Anantharam P; Varanasi, Sasidhar; Schall, Constance A: Enhancement of Cellulose Saccharification Kinetics Using an Ionic Pretreatment Step. In: *Biotechnology and Bioengineering* Vol.95/2006, Heft 5, S. 904-910
- Dämmgen, Ulrich: Berechnungen der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft. Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2009 für 2007. Johann Heinrich von Thünen Institut 2009
- Davis, R; Tao, L; Tan, C.D; Biddy, M.J; Beckham, G.T; Scarlata, C: Process Design and Economics for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbons: Dilute-Acid and Enzymatic Deconstruction of Biomass to Sugars and Biological Conversion of Sugars to Hydrocarbons. NREL/TP-5100-60223, 2013
- De Paoli, F; Bauer, A; Leonhartsberger, C; Amon, B; Amon, T: Utilization of by-products from ethanol production as substrate for biogas production. In: *Bioresource Technology* Vol.102/2011, Heft 11, S.6621-6624
- Dererie, Debebe Yilma; Trobro, Stefan; Momeni, Mjid Haddan; Hansson, Henrik; Blomqvist, Johanna; Passoth, Volkmar; Schnürer, Anna; Sandgren, Mats; Ståhlberg, Jerry: Improved bio-energy yields via sequential fermentation and biogas digestion of steam exploded oat straw. In: *Bioresource Technology* Vol.102/2011, S. 4449-4455
- Dhaked, Ram Kumar; Singh, Padma; Singh; Lokendra: Biomethanation under psychrophilic conditions. In: *Waste Management* Vol.30/2010, S. 2490–2496
- DIN 38414-2:1985-11: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Bestimmung des Wassergehaltes und des Trockenrückstandes bzw. der Trockensubstanz (S 2)
- DIN 38414-3:1985-11: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Bestimmung des Glührückstandes und des Glühverlustes der Trockenmasse eines Schlammes (S 3)
- DIN 38414-8:1985-06: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Schlamm und Sedimente (Gruppe S). Bestimmung des Faulverhaltens (S 8)
- DIN EN ISO 14044:2006-10: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006)
- DIN ISO 15705:2003-09: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfs (ST-CSB) - Küvettenes
- Dincer, Ibrahim; Rosen, Marc A.: *Exergy. Energy Environment and Sustainable Development*. 2. Auflage, Oxford: Elsevier Ltd. 2013

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Ding, Wenguang; Wu, Yang; Wang, Xia; Gao, Yayu: Family-size Biogas Plant Using Manure and Urine Mixture at Ambient Temperature in Semi-arid Regions of Northwestern China. In: World Academy of Science Engineering and Technology Vol.4/2010 , S. 33-41.
- Dissemond, Herman; Eilmsteiner, Wilfried; Nowak, Horst; Sedlar, Christoph; Rauchenberger, Maria: Biogasnutzung aus der Landwirtschaft. UBA-93-088, Wien:1993  
URL:<http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/R088.pdf>
- Döhler, Helmut; Eurich-Menden, Brigitte; Dämmgen, Ulrich; Osterburg, Bernhard; Lüttich, Manfred; Bergschmidt, Angela; Berg, Werner; Brunsch, Reiner: BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahre 2010. Forschungsbericht 299 42 245/02 Berlin:2002  
URL:<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2071.pdf>
- Düngemittelgesetz 1994: Bundesgesetz über den Verkehr mit Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln.  
URL:<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010827>
- Dustan, Andrew: Review of methane and nitrous oxide emission factors for manure management in cold climates. < ©JTI 2002
- Eder, Michael; Kirchweger, Stefan: Aufbereitung und Analyse von Daten aus dem Arbeitskreis Biogas zu Kosten bestehender Biogasanlagen. Wien, 2011  
URL:[http://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/pub/Biogas/2011\\_Studie\\_Biogas\\_NOE\\_2010\\_.pdf](http://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/pub/Biogas/2011_Studie_Biogas_NOE_2010_.pdf)
- Edström, Mats; Schüßler, Ingmar; Luosterinen, Sari: COMBUSTION OF MANURE: Manure as fuel in a heating plant. In: Baltic MANURE WP6 Energy potentials 2011  
URL:[http://balticmanure.eu/download/Reports/baltic\\_manure\\_combustion\\_final\\_2\\_2011\\_total.pdf](http://balticmanure.eu/download/Reports/baltic_manure_combustion_final_2_2011_total.pdf)
- Energie-Control Austria: Ökostrombericht 2014. URL: [http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/publikationen/dokumente/pdfs/Oekostrombericht2014\\_final.pdf](http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/publikationen/dokumente/pdfs/Oekostrombericht2014_final.pdf)
- Erler, Ronny: Fassbiogasanlage - einfaches, kostengünstiges Anlagenkonzept revolutioniert Biogaserzeugung in Entwicklungsländern. Afrika Woche Dresden: 2012 URL:[http://www.wipro-dresden.de/data/Erler\\_Fassbiogasanlage\\_V01.pdf](http://www.wipro-dresden.de/data/Erler_Fassbiogasanlage_V01.pdf)
- ESEIA, European Sustainable Energy Innovation Alliance, Working Group 1: Innovation challenge towards rational use of Bio-Resources in Europe. A discourse book. 2014
- EurObserv'ER: Biogas Barometer 2014. URL:[http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat\\_baro/observ/baro224\\_Biogas\\_en.pdf](http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro224_Biogas_en.pdf)
- Europäische Umweltkommission (EAA): How much bioenergy can europe produce without harming the environment. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities 2006.
- EUROSTAT: Struktur landwirtschaftlicher Betriebe. Metadata aktualisiert 16.01.2014
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR): Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung. 6., überarbeitete Auflage, Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V 2013
- Fazeni, Karin; Steinmüller, Horst: Impact of changes in diet on the availability of land, energy demand, and greenhouse gas emissions of agriculture. In: Energy, Sustainability and Society Vol.1/2011, Heft 6 URL:<http://www.energysustainsoc.com/content/1/1/6>
- Ferraz Dias de Moraes, Márcia Azanha: Reflections on Brazil's ethanol industry.  
URL:<http://dc.itamaraty.gov.br/imagens-e-textos/Biocombustiveis-08ing-consideracoesetanol.pdf>

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Ferrer, I; Gamiz, M; Almeida, M; Ruiz, A: Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru). In: Waste Management Vol.29/2009, S. 168-173
- Field, Christopher B; Campbell, Elliott J.; Lobell, David B.: Biomass Energy: the scale of the potential resource. In: Trends in Ecology and Evolution Vol.23/ 2007, Heft 2, S. 65-72
- Friedler, Ferenc; Fan, L.T; Imreh, B: Process Network Synthesis. Problem Definition. In: Networks Vol. 31/1998, Heft 2; S. 119-124
- Friedler, Ferenc; Tarjan, K; Huang, Y.W; Fan, L.T: Graph-theoretic approach to process synthesis. Polynomial Algorithm for maximal structure generation. In: Computers Chemical Engineering Vol.17/1993; Heft 9, S. 929-942
- Friedler, Ferenc; Varga, J.B; Fan, L.T: Decision-Mapping: A tool for consistent and complete decisions in process synthesis. In: Chemical Engineering Science Vol. 50/1995, Heft 11, S. 1755-1768
- Galler, Josef: Wirtschaftsdünger. Anfall, Lagerung, Verwertung, Umwelt. In: Landwirtschaftskammer Salzburg (Hrsg.), 1.Auflage 2009
- Garcia-Ojeda, Juan C; Bertok, Botond; Friedler, Ferenc: Planning Evacuation Routes with the P-graph Framework. In: Chemical Engineering Transactions Vol29/2012, S.1531-1536
- Gardner, M; Lautenbach, M; Fischer, T; Ebertsch, G: Wärmenutzung bei kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Stand: Nov. 2007, Garching: Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. 2007  
URL:[http://www.lfu.bayern.de/energie/biogas/doc/machbarkeitsstudie\\_abwaermenutzung.pdf](http://www.lfu.bayern.de/energie/biogas/doc/machbarkeitsstudie_abwaermenutzung.pdf)
- Gasser, Michael: Betriebserfahrung von Faulbehälterumwälzsystemen Rührwerke, Gaseinpressung, BIMA. In: 21. Sprechertagung der ÖWAV-Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaften, Pregarten:2012
- Gautam, Rajeeb; Baral, Sumit; Herat, Sunil: Biogas as a sustainable energy source in Nepal: Present status and future challenges. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol.13/2009, S. 248–252
- Gehrlein, Ulrich: Nachhaltigkeitsindikatoren zur Steuerung kommunaler Entwicklung. 1. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien 2004
- Ghafoori, Emad ; Flynn, Peter C; Feddes, John J: Pipeline vs. truck transport of beef cattle manure. In: Biomass and Bioenergy Vol.31/2007, S. 168-175
- Gistore Servizi Energetici: All-inclusive feed-in tariff. Letzte Aktualisierung: 07.03.2012  
URL:<http://www.gse.it/en/qualificationandcertificates/Theall-inclusivefeed-intariff/Pages/default.aspx> Download vom: 05.04.2015
- Gnansounou, Edgard: Production and use of lignocellulosic bioethanol in Europe: Current situation and perspectives. In: Bioresource Technology Vol.101/2010, Heft 13, S. 4842–4850
- Gnansounou, Edgard; Dauriat, Arnaud: Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol: A review. In: Bioresource Technology Vol.101/2010, S. 4980–4991
- Haberl, Helmut; Erb, Karl-Heinz; Krausmann, Fridolin: Global human appropriation of net primary production (HANPP). 2013 URL:<http://www.eoearth.org/view/article/153031>
- Haberl, Helmut; Erb, Karl-Heinz; Krausmann, Fridolin; Gaube Veronika; Bondeau, Alberte; Plutzer, Christoph; Gingrich, Simone; Lucht, Wolfgang; Fischer-Kowlaski, Marina: Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. In: PNAS Vol. 104/2007, Heft 31, S.12942-12947

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Hartmann, Volker: Die Photosynthese als erneuerbare Energie. Zukünftige Produktion von Biowasserstoff aus Sonnenlicht. Wiesbaden:Springer Fachmedien Wiesbaden 2015
- Hauff, Michael; Kleine, Alexandro: Methodischer Ansatz zur Systematisierung von Handlungsfeldern und Indikatoren einer Nachhaltigkeitsstrategie. Das Integrierende Nachhaltigkeitsdreieck. 2005  
URL:<https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/docId/1597>
- Hauff, Michael; Kleine, Alexandro: Nachhaltige Entwicklung. Grundlagen und Umsetzung. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH 2009
- Hecht, Melanie: Die Bedeutung des Carbonat-Puffersystems für die Stabilität des Gärprozesses landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Dissertation, Bonn: 2008
- Hendriks, A.T.W.M; Zeeman, G: Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* Vol.100/2009, S. 10–18
- Hiebel, Markus (Projektleiter): Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 3 - Biomasse-Energie. LANUV-Fachbericht 40 Recklinghausen: 2014  
URL:<http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fabe40/fabe40-III.pdf>
- Hill, D.T: Simplified Monod Kinetics of Methane Fermentation of Animal Wastes. In: *Agricultural Wastes* Vol.5/1983, S.1-16
- Holtzapple, Mark; Cognata, Mona; Shu, Yuancai; Hendrickson, Christie: Inhibition of *Trichoderma reesei* cellulase by sugars and solvents. In: *Biotechnology and Bioengineering* Vol.36/1990, Heft 3, S. 275-287
- Hopfner-Sixt, Katharina: Analyse und Optimierung neuer Biogasanlagen. Ausgewählte Ergebnisse In: *Biogastagung Oktober 2007* URL:<http://oekl.at/wp-content/uploads/gems/HopfnerSixt.pdf>
- Huang, Hua-Jiang; Ramaswamy, Shri; Tschirner, U.W; Ramarao, B.V: A review of separation technologies in current and future biorefineries. In: *Separation and Purification Technology* Vol.62/2008, S.1-21
- Humbird, D; Davis, R; Tao, L; Kinchin, C; Hsu, D; Aden, A: Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover. NREL/TP-5100-47764, 2011
- Ibrahim, M; Glasser, W.G: Steam-assisted biomass fractionation. Part III: a quantitative evaluation of the "clean fractionation" concept. In: *Bioresource Technology* Vol.70/1999, S. 181-192
- IEA Bioenergy Task 42: Biorefineries: adding value to the sustainable utilisation of biomass.  
URL:<http://www.ieabioenergy.com/publications/biorefineries-adding-value-to-the-sustainable-utilisation-of-biomass/>
- Imhoff, Marc I.; Bounoua, Lahouari; Ricketts, Taylor; Loucks, Colby; Hariss, Robert; Lawrence, William T.: Global patterns in human consumption of net primary production. In: *Nature* Vol. 429/2004, S. 870-873
- International Energy Agency (IEA): World Energy Outlook 2012. URL:  
<http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2012/>
- Jirouš, Filip: Renewable energy policy database and support – RES-LEGAL EUROPE. 8.November 2013  
URL: [http://www.res-legal.eu/no\\_cache/archive/?cid=268&did=390&sechash=19779485](http://www.res-legal.eu/no_cache/archive/?cid=268&did=390&sechash=19779485).
- Jungbluth, Niels et al: Life Cycle Inventories of Bioenergy. Project "ecoinvent data v2.0" Uster 2007  
URL:[http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/jungbluth-2007-TP1\\_bioenergy-summary.pdf](http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/jungbluth-2007-TP1_bioenergy-summary.pdf)
- Kalia, Anjan K; Kanwar, Sarbjit S: Temperature Profiles of Biogas Plant Operating under Hilly Conditions: In: *Biological Wastes* Vol.30/1989; S.217-224

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann: Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2009
- Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang; Wiese, Andreas (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 5., erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014
- Kaltschmitt, Martin; Wiese, Andreas (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1995
- Kanoğlu, Mehmet; Çengel, Yunus A.; Dinçer, Ibrahim: Efficiency Evaluation of Energy Systems. New York: Springer Verlag 2012
- Kapadani, K.R; Kapadani, Kavita, R: Review on Development of Hydrogen CNG Blender Mechanism for Existing Gasoline Engine Vehicles. In: IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering Second National Conference on Recent Developments in Mechanical Engineering 2013 , S.2278-1684, ISSN(p) : 2320–334X, S. 32-37
- Kaparaju, Prasad; Serrano, Maria; Angelidaki, Irini: Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. In: Bioresource Technology Vol.100/2009, Heft 9, S. 2562-2568
- Kaparaju, Prasad; Serrano, María; Thomsen Anna Belinda; Kongjan, Prawit; Angelidaki, Irini: Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. In: Bioresource Technology Vol.100/2009, S. 2562–2568
- Kappas, Martin: Klimatologie. Klimaforschung im 21. Jahrhundert - Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl. 2009
- Karim, Khursheed; Hoffmann, Rebecca; Klasson, Thomas K; Al-Dahhana, M.H: Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. In: Water Research Vol.39/2005, S. 3597–3606
- Kashyap, D.R; Dadhich, K.S; Sharma, S.K: Biomethanation under psychrophilic conditions: a review. Bioresource Technology Vol.87/2003, S. 147–153
- Kemppainen Katariina et al.: Ethanol and biogas production from waste fibre and fibre sludge. The FibreEtOH conceot. In: Biomass and Bioenergy (2012) doi:10.1016/j.biombioe.2012.03.027
- Khoiyangbam, R.S; Kumar, Sushil; Jain, M.C; Gupta, Navindu; Kumar, Arun; Kumar, Vinod: Methane emission from fixed dome biogas plants in hilly and plain regions of northern India. Bioresource Technology Vol.95/2004, S. 35–39
- Klein, Arne; Merkel, Erik; Pfluger, Benjamin; Held, Anne; Ragwitz, Mario, Resch, Gustav; Busch, Sebastian: Evaluation of different feed-in tariff design option. Best practice paper for the International Feed-In Cooperation. 3rd edition, update by December 2010. URL:[http://www.feed-in-cooperation.org/wDefault\\_7/download-files/research/Best\\_practice\\_Paper\\_3rd\\_edition.pdf](http://www.feed-in-cooperation.org/wDefault_7/download-files/research/Best_practice_Paper_3rd_edition.pdf).
- Klöpffer, Walter: Life Cycle Assessment. From the Beginning to the Current State. In: Environmental Science and Pollution Research Vol.4/1997, Heft 4, S.223-228
- Klöpffer, Walter; Grahl, Birgit: Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH und Co. KGaA 2009
- Klöpffer, Walter; Renner, Isa: Ökobilanzen. Eine Chance für die Neuorientierung der Industriepolitik. In: Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie Vol.4/1992, Heft 5, S. 271-273
- Knoll, Tobias: Wachablöse bei der Einstru. Stroh hat ausgedient. In: Pferde Woche, 6.Februar 2013

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Kovarik, Bill: Henry Ford, Charles Kettering and the Fuel of the Future. In: Automotive History Review Vol.32/1998, S. 7 – 27. URL:<http://www.environmentalhistory.org/billkovarik/about-bk/research/henry-ford-charles-kettering-and-the-fuel-of-the-future/>
- Kravanja, Philipp; Modaressi, Ala; Friedl, Anton: Heat integration of biochemical ethanol production from straw. A case study. In: Applied Energy Vol.102/2013, S.32-43
- Kretschmer, Bettina; Allen, Ben; Hart, Kaley: Mobilising cereal straw in the EU to feed advanced biofuel production. Institute for European Environmental Policy:2012  
URL:[http://www.ieep.eu/assets/938/IEEP\\_Agricultural\\_residues\\_for\\_advanced\\_biofuels\\_May\\_2012.pdf](http://www.ieep.eu/assets/938/IEEP_Agricultural_residues_for_advanced_biofuels_May_2012.pdf)
- Krol, Gerd-Jan: Sustainable Development und Konsum als Gegenstand schulischer Bildungsprozesse. In: Engelhard, Karl (Hrsg.): Umwelt und nachhaltige Entwicklung. Ein Beitrag zur Lokalen Agenda 21. Münster: Waxmann 1998
- Krotscheck, Christian; Narodslawsky, Michael: The Sustainable Process Index. A new dimension in ecological evaluation. In: Ecological Engineering Vol.6/1996, S.241-258
- Krutzler, Thomas; Böhmer, Siegmund; Gössl, Michael; Schindler, Ilse; Storch, Alexander; Wiesenberger, Herbert: Energiewirtschaftliche Inputdaten und Szenarien als Grundlage zur Erfüllung der Berichtspflichten des Monitoring Mechanisms. Synthesebericht. Wien, 2009 URL:  
<http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0237.pdf>
- Landeskontrollverband Brandenburg e.V: Untersuchung von Gülle, notwendig für den fachgerechten Einsatz als Dünger oder als Substrat in Biogasanlagen. URL:<http://www.lkvbb.de/hauptinf-Dateien/Guelle%20mit%20Tabellen.pdf>
- Lanzerstorfer, Christof; Jäger, Alexander: Decentralized integrated biogas and bioethanol production. In: Zucker Industrie Vol. 133/2008, Heft 10, S. 642-645
- Laopaiboon, Lakkana; Thanonkeo, Pornthap; Jaisil, Prasit; Laopaiboon, Pattana: Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by *Saccharomyces cerevisiae*. In: World Journal of Microbiology and Biotechnology Vol.23/2007, Heft 10, S. 1497-1501
- Lassmann, Tino; Kravanja, Philipp; Friedl, Anton: Prozesssimulation der Produktion von Ethanol und Methan aus lignocellulosehaltigen Rohstoffen. In: Chemie Ingenieur Technik Vol.83/2011, Heft 10, S. 1609-1617
- Laurenz, Ludger: Energiemais mit Vorteilen. In: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. Veröffentlichung 05.01.2005  
URL:<https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/biogas/veroeffentlichungen/energiemais.htm>
- Lee, Sang Rak; Cho, Nam Kee; Jai Maeng, Wong: Using the Pressure of Biogas Created during Anaerobic Digestion as the Source of Mixing Power. In: JOURNAOL F FERMENTATIOANND BIOENGINEERING Vol. 80/1995, Heft 4, S. 415-417
- Leick, Barbara C.E: Emission von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) von landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen. Dissertation Hohenheim:2003
- Lichti, Fabian H: Bewertung und Optimierung der Nährstoff- und Umweltwirkung von Gärrückständen aus der Biogasgewinnung. Dissertation München:2012
- Liebetrau, Jan: Regelungsverfahren für die anaerobe Behandlung von organischen Abfällen. In: Bidlingmaier, Werner; Kranert, Martin (Hrsg.): Manuskripte zur Abfallwirtschaft. Band 9, Berlin: Rhombos-Verlag 2008

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Lindorfer, Johannes; Fazeni, Karin; Steinmüller, Horst: Life cycle analysis and soil organic carbon balance as methods for assessing the ecological sustainability of 2nd generation biofuel feedstock. In: Sustainable Energy Technologies and Assessments Vol.5/2014, S.95–105.
- Lindorfer, Johannes; Steinmüller, Horst; Jäger, Alexander; Auer, Werner; Eder, Alexander: Untersuchung der Vorhydrolyse von Lignocellulose Rohstoffen mittels Steam Explosion. In: Chemie Ingenieur Technik Vol.82/2010, Heft 2, S. 1169-1176
- Linke, Bernd; Mähner, Pia: Einfluss der Raumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen. URL:[http://biogas-infoboard.de/pdf/10\\_Linke.pdf](http://biogas-infoboard.de/pdf/10_Linke.pdf)
- Lo, K.V; Liao, P.H: Psychrophilic Anaerobic Digestion of Screened Dairy Manure. In: Energy in Agriculture Vol.5/1986, S. 339-345
- Lu, Yifeng; Wang, Yonghong; Xu, Guoqian; Chu, Ju; Zhuang, Yingping; Zhang, Siliang : Influence of High Solid Concentration on Enzymatic Hydrolysis and Fermentation of Steam-Exploded Corn Stover Biomass. In: Applied Biochemistry and Biotechnology Vol.160/2010, S. 360–369
- Luo, Peng; Liu, Zhong: Conversion of Wheat Straw to Ethanol by Simultaneous Saccharification and Fermentation. In: 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010
- Luostarinen, Sari: Energy potential of manure in the baltic sea region. Biogas Potential & Incentives and Barriers for Implementation. Baltic MANURE WP6 Energy potentials 2013 URL: [http://www.balticmanure.eu/download/Reports/bm\\_energy\\_potentials\\_web.pdf](http://www.balticmanure.eu/download/Reports/bm_energy_potentials_web.pdf)
- Lynd, Lee R; Weimer, Paul J; van Zyl, Willem H; Pretorius, Isak, S: Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology. In: Microbiology and Molecular Biology reviews. Vol.66/2002, Heft 3, S. 506–577
- Madel Sabine: 8. Grundgegebenheiten: Tierische Produktion 1. Rinder. In: Payer, Margarete (Hrsg.) Einführung in Entwicklungsländerstudien. Teil I: Grundgegebenheiten Fassung vom 2001-02-07. URL: <http://www.payer.de/entwicklung/entw081.htm>
- Mähner, Pia: Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation. Berlin: 2007 URL:<http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/maehner-pia-2007-07-23/PDF/maehner.pdf>
- Mantau, Udo: Wood Flows in Europe (EU27). Project Report. Celle 2012 URL:<http://www.cepi.org/system/files/public/documents/publications/forest/2012/CEPIWoodFlowsinEurope2012.pdf>
- Margeot, Antoine; Hahn-Hagerdal, Bärbel; Edlund, Maria; Slade, Raphael; Monod, Frederic: New improvements for lignocellulosic ethanol. In: Current Opinion in Biotechnology Vol.20/2009, S.372-380
- Massé, Daniel I.; Masse, Lucie; Croteau, Francis: The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure. In: Bioresource Technology Vol.89/2003, S. 57–62
- Massé, Daniel I: Psychrophilic anaerobic digestion of swine manure slurry in intermittently fed sequencing batch reactor. Dissertation. Ottawa: 1995
- Merl, Adolf Daniel: Langzeitbindung. Wiederverwendung, Weiterverwendung, Recycling, themische Nutzung. In: zuschnitt: vorläufig nachhaltig 2006. URL:<http://www.proholz.at/zuschnitt/24/langzeitbindung/>
- Mlekuž, Dimitrij: The materiality of dung the manipulation of dung in Neolithic Mediterranean caves. In: Documenta Praehistorica XXXVIDOI, 2009, s219-225 DOI: 10.4312/dp.36.14

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Modaresi, Ala; Kravanja, Philipp; Friedl, Anton: Pinch and exergy analysis of lignocellulosic ethanol, biomethane, heat and power production from straw. In: Applied Thermal Engineering Vol.43/2012, S.20-28
- Mohagheghi, A; Tucker, M; Grohmann, K; Wyman, C: High Solids Simultaneous Saccharification and Fermentation of Pretreated Wheat Straw Ethanol. In: Applied Biochemistry and Biotechnology Vol.33/1992; S.67-81
- Mondal, Alam Hossain; Kamp Linda M; Pachova, Nevelina I: Drivers, barriers, and strategies for implementation of renewable energy technologies in rural areas in Bangladesh. An innovation system analysis. In: Energy Policy Vol.38/2010, S.4626-4634
- Moser, Tobias: Standort- und Kapazitätsplanung von BtL- Anlagen in Österreich, mittels gemischt-ganzzahliger Optimierung. Masterarbeit. Wien 2012.  
URL:[https://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/pub/DA\\_Diss/2012\\_DA\\_Moser.pdf](https://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/pub/DA_Diss/2012_DA_Moser.pdf)
- Mousdale, David M: Introduction to Biofuels. Taylor and Francis Group 2010
- Narodoslawsky, Michael; Krotscheck, Christian: Integrated ecological optimization of processes with the sustainable process index. In: Waste Management Vol.20/2000 S.599-603
- Narodoslawsky, Michael; Krotscheck, Christian: What can we learn from ecological valuation of processes with the Sustainable Process Index (SPI). The case study of energy production systems. In: Journal of Cleaner Production Vol.12/2004, S.111-115
- Narodoslawsky, Michael; Niederl-Schmidinger, Anneliese; Halasz, Laslo: Utilising renewable resources economically: new challenges and chances for process development. In: Journal of Cleaner Production Vol.16/2008, Heft 2, S. 164-170
- Neugschwandtner, Reinhard; Bürstmayr, Hermann; Kaul, Hans-Peter: Ackerbauliche Ernterückstände als Ressource für Bioraffinerien – Potentiale und Einschränkungen. In: Workshop „Bioraffinerien - weiße Biotechnologie“, 27.10.2010, Universität für Bodenkultur Wien  
URL:[http://www.boku.ac.at/fileadmin/\\_/bioconversion/Neugschwandtner.pdf](http://www.boku.ac.at/fileadmin/_/bioconversion/Neugschwandtner.pdf)
- Nijboer, Michiel: The Contribution of Natural Gas Vehicles to Sustainable Transport. Working Paper. © OECD/IEA, 2010  
URL:[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/natural\\_gas\\_vehicles.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/natural_gas_vehicles.pdf)
- Nocquet, Timothée; Dupont, Capucine; Commandre, Jean-Michel; Grateau, Maguelone; Thiery, Sébastien; Salvador, Sylvain: Volatile species release during torrefaction of wood and its macromolecular constituents: Part 1. Experimental study. In: Energy Vol.72/2014, S. 180-187
- NREL/TP-510-42618 : Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. URL: <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/42618.pdf>
- "Oberberger, Ingwald: Thermische Nutzung fester biogener Brennstoffe. In: VDI Schriftenreihe  
URL:<http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Oberberger-ThermischeBiomassenutzung-VDI-2000-05-05.pdf>
- „Regenerative Energien in Ungarn und in Deutschland“, In: VDI Verlag GmbH (Hrsg.), Düsseldorf: 2000, S. 59-101 "
- Offer, G.J; Howey, D; Contestabile, M; Clague, R; Brandon, N.P: Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. Energy Policy Vol. 38/2010, Heft 1, S. 24-29
- ÖKL-Merkblatt Nr.24: Düngersammelanlagen für wirtschaftseigenen Dünger. 5.Auflage 2007



## - 9. Literaturverzeichnis -

- ÖKL-Merkblatt Nr.83: Baustoffe in der Landwirtschaft. Beton. 1.Auflage 2007
- Ökostromgesetz 2012: Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern. BGBl. I Nr. 11/2012
- Oleskowicz-Popiel, Piotr; Kádár, Zsófia; Heiske, Stefan; Klein-Marcuschamer, Daniel; Simmons, Blake A; Blanch, Harvey W; Schmidt Jens Ejbye: Co-production of ethanol, biogas, protein fodder and natural fertilizer in organic farming--evaluation of a concept for a farm-scale biorefinery. In: Bioresource Technology Vol.104/2012, S.440-446
- Onuki Shinnosuke: Bioethanol : Industrial production process and recent studies.  
URL:<http://www.public.iastate.edu/~tge/courses/ce521/sonuki.pdf> "
- Österreichischer Bundesfeuerwehrverband: Baulicher Brandschutz. Brandabschnittsbildung. Technische Richtlinien Vorbeugender Brandschutz. TRVB B 108. Ausgabe 1991
- Padró, C.E. Grégoire; Putsche, V: Survey of the Economics of Hydrogen Technologies. NREL/TP-570-27079, 1999 URL:<http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/27079.pdf>
- Palmqvist, Eva; Hahn-Hägerdal, Bärbel: Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition. In: Bioresource Technology Vol.74/2000, Heft 1, S. 25-33
- Pehnt, Martin: Energieeffizienz – Definitionen, Indikatoren, Wirkungen. In: Pehnt, Martin (Hrsg.): Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. Heidelberg: Springer Verlag 2010
- Perez, Richard; Perez, Marc: The world's energy reserves. A fundamental look. In: SHC Solar Update Vol.50/2009 S.2-3
- Petersson, Anneli; Thomsen, Mette H; Hauggaard-Nielsen, Henrik; Thomsen, Anne-Belinda: Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean. In: Biomass and Bioenergy Vol.31/2007, S. 812–819
- Pia, Mähner: Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation. Berlin:2007
- Piechota, Rafael B: Untersuchungen zur nachhaltigen thermischen Nutzung fester regenerativer Energieträger. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH 2011
- Piringer, M; Fischer T: Kreislaufwirtschaft mit Produktion aus nachwachsenden Rohstoffen. Voraussetzungen und Strategien. Berichte aus Energie und Umweltforschungen 2003. URL: [http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw\\_pdf/0314\\_kreislaufwirtschaft.pdf](http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/0314_kreislaufwirtschaft.pdf)
- Pöllinger, Alfred (Projektleitung): Projektbericht Emissionen, Gülleausbringung, -lager Projekt Nr./Wissenschaftliche Tätigkeit Nr. Antrag 100585. Evaluierung der ÖPUL-Maßnahme „Verlustarme Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern und Biogasgülle. 2011  
URL:<http://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/viewdownload/1818-sonstige/14583-evaluierung-der-oepul-massnahme-verlustarme-ausbringung-von-fluessigen-wirtschaftsduengern-und-biogasquelle.html>
- Pöllinger, Alfred: Wirtschaftsdünger optimal und verlustarm einsetzen. In: Maschinenring Grünlandtag 2013 Neukirchen an der Vöckla, 2013 URL:<http://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/viewdownload/1693-2311-wirtschaftsduenger-versuch/13141-wirtschaftsduenger-optimal-und-verlustarm-einsetzen.html>
- Poore, Matt; Harvey, Ray; Crickenberger, Roger: Feeding Poultry Litter to Beef Cattle. In: Southern Regional Beef Management Handbook, SR 2007  
URL:[www.ces.ncsu.edu/depts/poulsci/tech\\_manuals/feeding\\_poultry\\_litter.pdf](http://www.ces.ncsu.edu/depts/poulsci/tech_manuals/feeding_poultry_litter.pdf)

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Pötsch, E.M; Pfundtner, E; Resch, R; Much, P: Stoffliche Zusammensetzung und Ausbringungseigenschaften von Gärrückständen aus Biogasanlagen. In: 10.Alpenländisches Expertenforum, 18. - 19. März 2004 URL:<http://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/component/jdownloads/viewdownload/860-umweltsressourcen-im-gruenland/12694-stoffliche-zusammensetzung-und-ausbringungseigenschaften-von-gaerrueckstaenden-aus-biogasanlagen.html>
- Priewasser, Reinhold: Das Konzept der Nachhaltigkeit und seine Anwendung in den Bereichen Energienutzung und räumliche Mobilität. Frankfurt am Main: Europäischer Verlag der Wissenschaften 2003
- Priewasser, Reinhold: Wege in Richtung Nachhaltigkeit. Konzeptioneller Anspruch und Grenzen der Realisierung. In: Stelzer-Orthofer, Christine; Weidenholzer, Josef (Hrsg.): Partizipation und Gerechtigkeit. Linz: Trauner Druck GmbH & Co KG 2007
- Rajendran, Karthik; Aslanzadeh, Solmaz; Taherzadeh, Mohammad J: Household Biogas Digesters—A Review. In: *Energies* Vol.5/2012, S. 2911-2942
- Ramanauskaite, Rita et al.: Biogas markets and the use of heat of biogas plants in Austria, Croatia, Czech Republic, Denmark, Germany, Italy, Latvia, Poland and Romania. Project No: IEE/11/025 Veröffentlicht:2012 URL:[http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/biogasheat\\_biogas\\_markets\\_and\\_use\\_of\\_heat\\_in\\_biogas\\_plants\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/biogasheat_biogas_markets_and_use_of_heat_in_biogas_plants_en.pdf)
- Ramos, Luiz Pereira; da Silva, Larissa; Ballem, Annielly Comelli; Pitarelo, Ana Paula; Chiarello, Luana Marcele; Silveira, Marcos Henrique Luciano: Enzymatic hydrolysis of steam-exploded sugarcane bagasse using high total solids and low enzyme loadings. In: *Bioresource Technology* Vol.175/2015, S. 195–202
- Raven Peter H; Evert Ray F; Eichhorn Susan E: *Biologie der Pflanzen*. 4. Auflage, New York: W.H Freeman and Company 2005
- Reckleben, Yves: Die Traktor oder Lkw-Frage beim Gülletransport. In: *Bauernblatt* 15. März 2014 URL:[http://www.lksh.de/fileadmin/dokumente/Bauernblatt/PDF\\_Toepfer\\_2014/BB\\_11\\_15.03/35-38\\_Reckleben.pdf](http://www.lksh.de/fileadmin/dokumente/Bauernblatt/PDF_Toepfer_2014/BB_11_15.03/35-38_Reckleben.pdf)
- Resch, Reinhard; Pötsch, Erich; Pfundtner, Erwin: Biogasanlagen in Österreich. Ein aktueller Überblick. In: 10. Alpenländisches Expertenforum, 18. - 19. März 2004 URL: <http://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/viewdownload/49-expertenforum-2004/425-biogasanlagen-in-oesterreich-resch.html>
- RICHTLINIE 2003/30/EG: Richtlinie zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor. URL:<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:123:0042:0046:DE:PDF>
- RICHTLINIE 2009/28/EG: zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>
- RICHTLINIE 2012/27/EU: Richtlinie zur Energieeffizienz. Amtsblatt der Europäischen Union 14.11.2012 URL:<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>
- Safley, L.M; Westerman, P.W: Low-temperature digestion of dairy and swine manure. In: *Bioresource Technology* Vol.47/1994; S. 165-171
- Safley, L.M; Westerman, P.W: Psychrophilic Anaerobic Digestion of Animal Manure: Proposed Design Methodology. In: *Biological Wastes* Vol.34/1990, S. 133-148

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Saha, Badal C; Cotta, Michael A: Ethanol Production from Alkaline Peroxide Pretreated Enzymatically Saccharified Wheat Straw. In: Biotechnology Progress Vol.22/2006, S. 449-453
- Sannigrahi, Poulomi; Kim, Dong Ho; Junga, Seokwon; Ragauskas, Arthur: Pseudo-lignin and pretreatment chemistry. Energy and Environmental Science 2011, Heft 4, S. 1306-1310
- Sauter, Stefan; Sauter, Norbert: The Sauter Biogas System. Spraying instead of stirring. In: Progress in Biogas II Tagungsband. Stuttgart-Hohenheim:2011
- Scheffelowitz, Mattes et al.: Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila Biomasse) Leipzig: 2014  
URL:[https://www.dbfz.de/fileadmin/user\\_upload/Referenzen/Berichte/Monitoring\\_ZB\\_Mai\\_2014.pdf](https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Berichte/Monitoring_ZB_Mai_2014.pdf)
- Scheffelowitz, Mattes et al.: Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG. Leipzig: 2014 URL:<http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/XYZ/zwischenbericht-vorhaben-2a,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- Schieder, Doris; Gronauer, Andreas; Lebuhn, Michael; Bayer, Kerstin; Beck, Jürgen; Hiepp, Georg: Prozessmodell Biogas. Nr. III-3/2010. URL:[https://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Prozessmodell\\_Biogas.pdf](https://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Prozessmodell_Biogas.pdf)
- Schön, Michael: Numerical Modelling of Anaerobic Digestion Processes in Agricultural Biogas Plants. In: Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Band 6, 1.aufgabe, Innsbruck: university press 2010
- Schwab, Markus; Reinhold, Gerd: Biogaserträge aus Energiepflanzen. Eine kritische Bewertung des Datenpotentials. URL:[http://biogas-infoboard.de/pdf/4\\_SCHWAB\\_Biogasertraege.pdf](http://biogas-infoboard.de/pdf/4_SCHWAB_Biogasertraege.pdf)
- Shafiei, M; Karimi, K; Taherzadeh, MJ: Techno-economical study of ethanol and biogas from spruce wood by NMMO-pretreatment and rapid fermentation and digestion. Bioresource Technology Vol.102/2011, Heft 17, S.7879-7886
- Shao, Shunliu; Wen, Guifeng; Jin, Zhenfu: Changes in chemical characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) components during steam explosion. In: Wood Science Technolgy Vol.42/2008, S.439-451
- Sick, Nathalie: Diffusion erneuerbarer Energietechnologien. Eine empirische Analyse unter besonderer Berücksichtigung von Rohstoffpreisen. In: Gmünden et al.: Betriebswirtschaftliche Studien in forschungintensiven Industrien. Münster: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014
- Sims, Ralph; Taylor, Michael: From 1st to 2nd Generation biofuel technology. An overview of current industry and RD&D activities. OECD/IEA: 2008  
URL:[http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2nd\\_biofuel\\_gen.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2nd_biofuel_gen.pdf)
- Sinabell, F; Stürmer, B: Agrarische Rohstoffe zur Energiegewinnung – eine Zwischenbilanz für Österreich. In: Ökosystemdienstleistungen und Landwirtschaft – Herausforderungen und Konsequenzen für Forschung und Praxis. 22. Jahrestagung der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie  
URL:[http://oega.boku.ac.at/fileadmin/user\\_upload/Tagung/2012/Short\\_Paper\\_2012/11\\_Sinabell-Stuermer-TB\\_2012\\_1.pdf](http://oega.boku.ac.at/fileadmin/user_upload/Tagung/2012/Short_Paper_2012/11_Sinabell-Stuermer-TB_2012_1.pdf)
- Sluiter, A; Hames B; Ruiz, R; Scarlata, C; Sluiter, J; Templeton, D; Crocker, D: Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. Technical Report NREL/TP-510-4261. 2002  
URL:<http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/42618.pdf>
- Smith, Thomas M.; Smith, Robert Leo: Ökologie. 6., aktualisierte Ausgabe, München: Pearson 2009
- Statistik Austria (2012): Einsatz aller Energieträger in allen Haushalten nach Verwendungszwecken 2003 bis 2012.

## - 9. Literaturverzeichnis -

- URL:[http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_und\\_umwelt/energie/energieeinsatz\\_der\\_haushalte/](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energieeinsatz_der_haushalte/)
- Statistik Austria (2012b): Viehbestand. Thematische Karten.  
URL:[http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/land\\_und\\_forstwirtschaft/viehbestand\\_tierische\\_erzeugung/viehbestand/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/land_und_forstwirtschaft/viehbestand_tierische_erzeugung/viehbestand/index.html)
- Statistik Austria (2013): Gesamtenergiebilanz Österreich 1970 bis 2013 (Detailinformation)  
URL:[http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_und\\_umwelt/energie/energiebilanzen/](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/)
- Staudt, Erich; Auffermann, Susanne; Schroll, Markus: Die Grenzen der Kreislaufwirtschaft. Das Beispiel Papier. In: Entsorgungspraxis Vol 17/1999, Heft 2 S. 16-19
- Steger, Peter: ogistische Anforderungen und Lösungen bei der Wirtschaftsdüngervergärung in größeren Gemeinschaftsanlagen. In: Kongress biogas12 Linz:2012
- Steinmüller, Horst: Enzymatic hydrolisis of wheat straw, a techno-economical study. Dissertation. Graz 1991
- Steinmüller, Horst; Tichler, Robert: Leitartikel Europäische Energiepolitik im Umbruch? In: Steinmüller, Horst; Hauer, Andreas; Schneider, Friedrich (Hrsg.): Energiewirtschaft. Jahrbuch 2014.
- Stevens, Mark A; Schulte, Dennis D: Low Temperature Anaerobic Digestion of Swine Manure, In: Journal of the environmentalengineering division 1979, S. 33-42
- Sticklen, Mariam B: Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. In: Nature Reviews Genetics Vol.9/2008, S. 433-443
- Streicher et al.: Energieautarkie für Österreich 2050. Feasibility Study. Endbericht Dezember 2010  
URL:<https://www.klimafonds.gv.at/assets/Uploads/Studien/Energieautarkie205012pt20110308Final.pdf>
- Sun, Ye ; Cheng, Jiayang: Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. In: Bioresource Technology Vol.83/2002, S. 1-11
- Taherzadeh, Mohammad J; Karimi, Keikhosro: Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. In: International Journal of Molecular Sciences Vol.9/2008, Heft 9, S. 1621-1651
- Technische Universität Wien: Presseaussendung vom 07.06.2011.  
URL:[http://www.tuwien.ac.at/aktuelles/news\\_detail/article/7040/](http://www.tuwien.ac.at/aktuelles/news_detail/article/7040/)
- Teugjas, Hele; Våljamäe, Priit: Product inhibition of cellulases studied with 14C-labeled cellulose substrates. Biotechnology for Biofuels Vol.6/2013
- Theißen, Gerd: Mit wenig Aufwand effizient Strom erzeugen. Kleinbiogasanlage von KFB. In: profi Magazin für professionelle Landtechnik. 04/2015, S.100-103
- "Thomsen, Mette Hedegaard; Thygesen, Anders; Thomsen, Anne Belinda: Hydrothermal treatment of wheat straw at pilot plant scale using a three-step reactor system aiming at high hemicellulose recovery, high cellulose digestibility and low lignin hydrolysis. In: Bioresource Technology Vol.99/2008, S. 4221-4228"
- Tuerk, Oliver: Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Grundlagen - Werkstoffe - Anwendungen. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014
- Umweltbundesamt: Klimaschutzbericht 2013. Wien, 2013
- Van Mierlo, J; Magetto, G: Fuel Cell or Battery: Electric Cars are the Future. In: FuelCells Vol.7/2007, Heft 2, S. 165-173

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Van Mierlo, J; Maggetto, G; Lataire, Ph: Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles. In: Energy Conversion and Management Vol.47/2006, Heft 17, S. 2748–2760
- Vance, Leisha; Cabezas, Heriberto; Heckl, Istvan; Bertok, Botond; Friedler, Ferenc: Synthesis of Sustainable Energy Supply Chain by the P-graph Framework. In: Industrial and Engineering Chemistry Research Vol52/2013, S.266-274
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI 4630. Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure 2006
- VERORDNUNG (EG) Nr. 956/2008: Verordnung zur Änderung von Anhang IV der Verordnung (EG) Nr. 999/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates mit Vorschriften zur Verhütung, Kontrolle und Tilgung bestimmter transmissibler spongiformer Enzephalopathien.  
URL:[https://www.verbrauchergesundheit.gv.at/dateien/amtliche\\_veterinaernachrichten/2008/avn\\_11\\_2008\\_7.p\\_Verordnung\\_EG\\_Nr.956\\_2008.pdf?4cxx82](https://www.verbrauchergesundheit.gv.at/dateien/amtliche_veterinaernachrichten/2008/avn_11_2008_7.p_Verordnung_EG_Nr.956_2008.pdf?4cxx82)
- Viikari, L; Vehmaanperä, J; Koivula; A: Lignocellulosic ethanol: From science to industry. In: Biomass and Bioenergy Vol.46/2012, S. 13-24
- Vintila, Teodor; Dragomirescu, Monica; Croitoriu, Veronica; Vintila, Cornelia; Barbu, Horia; Sand, Camelia: Saccharification of lignocelulose-with reference to Miscanthus-using different cellulases. In: Romanian Biotechnological Letters Vol15/2010, Heft 4, S. 5498-5504
- Viola, E; Zimbardi, F; Cardinale, M; Cardinale, G; Braccio, G; Gambacorta, E: Processing cereal straws by steam explosion in a pilot plant to enhance digestibility in ruminants. In: Bioresource Technology Vol99/2008, S. 681–689
- Vobr, Karel: Experience on biogas feed-in tariff in the Czech Republic. In: 2nd High Level Conference in Latvia 20/09/2012.  
URL:[http://www.biogasin.org/files/pdf/2nd%20HLC/7\\_Karel\\_Vobr\\_CzBA\\_20092012.pdf](http://www.biogasin.org/files/pdf/2nd%20HLC/7_Karel_Vobr_CzBA_20092012.pdf)
- Walla, Christoph: Investitionskosten von Biogasanlagen. Poster 2003.  
URL:[https://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/pub/Biogas/2003\\_Biogas\\_Poster.pdf](https://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/pub/Biogas/2003_Biogas_Poster.pdf)
- Walla, Christoph: Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Dissertation. Wien:2006
- Walla, Christoph; Schneeberger, Walter: The optimal size for biogas plants. In: Biomass and Bioenergy Vol.32/2008, S. 551-557
- Wang, Wie; Kang, Li; Wie, Hui; Arora, Rajeev; Lee, Y.Y: Study on the decreased sugar yield in enzymatic hydrolysis of cellulosic substrate at high solid loading. In: Applied Biochemistry and Biotechnology Vol.164/2011, S. 1139-1149
- Weiland, Peter: Stand der Technik bei der Trockenfermentation. Aktuelle Entwicklungen. In: Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe: Gülzower Fachgespräche. Trockenfermentation – Stand der Entwicklungen und weiterer F+E-Bedarf. Gülzow:2006
- Weiser Christian: Einflüsse auf den Getreidestroh-ertrag als Voraussetzung der Bestimmung des nachhaltigen Strohpotenzials. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis.Vol.2/2014, 23. Jg., S. 66-70
- Weiser, Christian; Zeller, Vanessa; Reinicke, Frank; Wagner, Bernhard; Majer, Stefan; Vetter, Armin; Thrän, Daniela: Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany. In: Applied Energy Vol.114/2014, S. 749–762

## - 9. Literaturverzeichnis -

- Weltkommission für Umwelt und Entwicklung: Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. 1987 URL:<http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>
- Wendland, Matthias: Organische Düngung, Gülle.  
URL:<http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/032705/index.php>
- Winter, Ralf: Biokraftstoffe im Verkehrssektor 2011. Zusammenfassung der Daten der Republik Österreich gemäß Art. 4, Abs. 1 der Richtlinie 2003/30/EG für das Berichtsjahr 2010. URL:  
<http://www.bmlfuw.gv.at/dms/lmat/umwelt/luft-laerm-verkehr/verkehr-laermschutz/biokraftstoffbericht/Biokraftstoffbericht-2011/Biokraftstoffbericht%202011.pdf>
- Wolfahrtstätter, Claudia; Rohner, Nicolas; Boutellier, Roman: Technologieplanung und Technologie Roadmap in der Elektrizitätswirtschaft. Nuklearkraft und neue erneuerbare Energien. URL:  
[http://www.wohlfahrtstaetter.ch/fileadmin/pdf/05\\_svt\\_Technologie\\_Roadmap\\_Elektrizitaetswirtschaft\\_ETH\\_09\\_08\\_final.pdf](http://www.wohlfahrtstaetter.ch/fileadmin/pdf/05_svt_Technologie_Roadmap_Elektrizitaetswirtschaft_ETH_09_08_final.pdf)
- Zeller, Vanessa et al.: Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung. DBFZ Report Nr. 13. Leipzig:2012  
URL:[https://www.dbfz.de/fileadmin/user\\_upload/DBFZ\\_Reports/DBFZ\\_Report\\_13.pdf](https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_13.pdf)
- Zethner, Gerhard; Stübenbacher, Elisabeth: Vergärung von Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen. Evaluierung hinsichtlich Klimaschutzrelevanz. REP-0377 Wien:2012  
URL:<http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0377.pdf>
- Zhong, Weizhang; Zhang, Zhongzhi; Luo, Yijing; Sun, Shanshan; Qiao, Wie; Xiao, Meng: Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. In: Bioresource Technology Vol.102/2011, S. 11177–11182
- Zoetemeyer, R.J; Arnoldy, P; Cohen, A; Boelhouwer, C: Influence of temperature on the anaerobic acidification of glucose in a mixed culture forming part of a two-stage digestion process. In: Water Research Vol.16/1982, Heft 3, S. 313–321

## Internetquellen

- arge kompost&biogas: Biomethan in Österreich. URL:[http://www.kompost-biogas.info/index.php?option=com\\_content&task=view&id=775&Itemid=461](http://www.kompost-biogas.info/index.php?option=com_content&task=view&id=775&Itemid=461) Download vom: 04.03.2015
- arge kompost&biogas: Energetische Nutzung. URL:[http://www.kompost-biogas.info/index.php?option=com\\_content&task=view&id=240&Itemid=285](http://www.kompost-biogas.info/index.php?option=com_content&task=view&id=240&Itemid=285) Download vom: 05.01.2015
- arge kompost&biogas: Geschichtliche Entwicklung. URL:[http://www.kompost-biogas.info/index.php?option=com\\_content&task=view&id=68&Itemid=108](http://www.kompost-biogas.info/index.php?option=com_content&task=view&id=68&Itemid=108) Download vom 20.04.2015
- axpo: Kompogas URL:[http://www.axpo.com/axpo/kompogas/de/ueber\\_uns/axpo-kompogas/kompogassystem.html](http://www.axpo.com/axpo/kompogas/de/ueber_uns/axpo-kompogas/kompogassystem.html) Download vom 20.04.2015
- BetaRenewables: ProseaTM. URL:<http://www.betarenewables.com/proesa/what-is> Download vom 20.04.2015
- Bio4Gas: URL:<http://bio4gas.eu/technologie/fermenter> Download vom 04.03.2015

## - 9. Literaturverzeichnis -

- BOKU 2013: <http://www.boku.ac.at/met/wetter/mon-archiv/2013/201310/201310.html> Download vom 05.06.2014
- Clariant: Sunliquid® URL:<https://www.clariant.com/en/Business-Units/New-Businesses/Biotech-and-Biobased-Chemicals/Sunliquid> Download vom: 20.12.2014
- Die Presse (2011): Deutschland: Totalschaden bei Biosprit-Einführung. Aktualisiert am 04.03.2011  
URL:[http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/639426/Deutschland\\_Totalschaden-bei-BiospritEinfuehrung](http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/639426/Deutschland_Totalschaden-bei-BiospritEinfuehrung) Download vom 20.04.2015
- Europäische Kommission, EU Aktionen: The 2020 climate and energy package. Letzte Aktualisierung: 26.03.2015 URL: [http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm) Download vom 02.04.2015
- Europäische Kommission, EU Aktionen: The 2020 climate and energy package. Letzte Aktualisierung: 26.03.2015 URL: [http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm) Download vom 02.04.2015
- Europäische Kommission: Effort Sharing Decision. Letzte Aktualisierung: 26.03.2015 URL: [http://ec.europa.eu/clima/policies/effort/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/effort/index_en.htm) Download vom 02.04.2015
- Kongress der Vereinigten Staaten von Amerika: Energy Independence and Security Act of 2007.  
URL:[https://www1.eere.energy.gov/buildings/appliance\\_standards/commercial/pdfs/eisa\\_2007.pdf](https://www1.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/commercial/pdfs/eisa_2007.pdf)  
Download vom: 25.04.2015
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL): Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas.  
URL:<http://daten.ktbl.de/biogas/navigation.do?selectedAction=Startseite> Download vom 06.11.2014
- Lanfranconi, Claudia, Schwarz, :<http://www.reisefuedli.ch/1435.html> Download vom 15.11.2014
- Pyper, Julia; ClimateWire: Will Cheap Natural Gas Resurrect the Hydrogen Car? In: Scientific American  
26.09.2012 URL:<http://www.scientificamerican.com/article/will-cheap-natural-gas-resurrect-the-hydrogen-car/> Download vom: 05 04 2015
- Schünemann-Plag, Peter: Biogas im EEG 2012 – Aus für die Standardanlage? Letzte Aktualisierung: 21.09.2011 URL:<http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/360/article/17606.html>  
Download vom 20.04.2015
- SEBE 2013: [http://tkm.sebe2013.eu/index.php/National\\_Financing\\_Framework\\_Italy](http://tkm.sebe2013.eu/index.php/National_Financing_Framework_Italy) Download vom 04.12.2014
- Statista (2014): Energieverbrauch der OECD-Länder im Wohnsektor. Aktualisiert am: 16.09.2014  
URL:<http://de.statista.com/infografik/2723/energieverbrauch-im-wohnsektor/> Download vom: 20.03.2015
- Statista (2014b): Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland in den Jahren 1992 bis 2014  
URL:<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167671/umfrage/anzahl-der-biogasanlagen-in-deutschland-seit-1992/> Download vom: 02.04.2015
- statista (2015) - Das Statistik Portal: Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland in den Jahren 1992 bis 2014 URL:<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167671/umfrage/anzahl-der-biogasanlagen-in-deutschland-seit-1992/> Download vom 04.02.2015
- statista (2015)- Das Statistik Portal: Installierte elektrische Leistung von Biogasanlagen in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2015 (in Megawatt)  
URL:<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167673/umfrage/installierte-elektrische-leistung-von-biogasanlagen-seit-1999/> Download vom 04.02.2015

## - 9. Literaturverzeichnis -

Statista (2015): Installierte elektrische Leistung von Biogasanlagen in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2015 (in Megawatt). URL:<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167673/umfrage/installierte-elektrische-leistung-von-biogasanlagen-seit-1999/> Download vom 05.02.2015

Umweltbundesamt: Fossile Energien. URL:  
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/energie/energietraeger/fossileenergie/?zg=schulenpage%253D5> Download vom 15.04.2015

Umweltbundesamt: Energie der Zukunft. URL:  
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/energie/energietraeger/erneuerbareenergie/>  
Download vom 15.04.2015

Wettach Silke: Biosprit E10. Andere EU-Länder lassen sich Zeit. WirtschaftsWoche. Aktualisiert am: 07.03.2011 URL:<http://www.wiwo.de/politik/ausland/biosprit-e10-andere-eu-laender-lassen-sich-zeit/5249406.html> Download vom: 01.01.2015

World Health Organization (WHO): <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/en/> Download vom 20.04.2015

<http://www.boerse-go.de/Mais> Download vom 15.12.2014

[http://biogas-infoboard.de/pdf/Biologie\\_der\\_Biogaserzeugung.pdf](http://biogas-infoboard.de/pdf/Biologie_der_Biogaserzeugung.pdf) Download vom: 16.12.2014

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth\\_energy\\_budget.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_energy_budget.svg) Download vom 25.10.2014

<http://hitech.bfh.ch> Download vom 02.11.2014

<http://spionweb.tugraz.at/de/spi> Download vom 20.04.2015

[http://www.bp.com/de\\_de/germany/presse/mediathek/grafiken.html](http://www.bp.com/de_de/germany/presse/mediathek/grafiken.html) Download vom 03.04.2015

<http://www.caranddriver.com/features/natural-gas-the-next-step-on-the-road-to-hydrogen-tech-dept>  
Download vom 14.04.2015

<http://www.optitwin.de/> Download vom 22.04.2015

<http://www.p-graph.com/pnsstudio/> Download vom 20.03.2014

[http://www.p-graph.com/wiki/index.php/How\\_to\\_define\\_desing\\_alternatives](http://www.p-graph.com/wiki/index.php/How_to_define_desing_alternatives) Download vom 20.03.2014



ANHANG 1a:

Kosteninput Optimale Gasverwertung Studie TUGraz

**Transportkosten**  
*Gülle 6.1 %TS* 6,1 %TS

Transportkosten	Fixkostenanteil [€/t TS]	operation cost [€/a]
Gülle Straße	20	5,000
Gülle Verschlauchung	30	Kosten € für 2km 20,0

*Biogas*

variable Kosten [€/m]	Fixkosten [€]
200	20000

**Betriebskosten**

*Fermenter*

Fermentergröße	invest cost [€/a]	operation cost [€/a]	Strom [MWh/a]	Stromkosten [€/a]	Wärme [MWh/a]	Wärmekosten [€/a]
5kW_el	29.981,00	12.734,00	2,00	260	25,20	1314,41
80kW_el	51.605,80	18.361,00	38,40	4992	378,00	19716,14
160kW_el	98.154,70	28.188,00	76,80	9984	756,00	39432,27
250kW_el	183.000,00	43.061,00	120,00	15600	1.181,25	61612,93

*CHP Anlagen*

CHP Größe	invest cost [€/a]	operation cost [€/a]
CHP_19kW_el	2.800,00	6.345,00
CHP_30kW_el	5.200,00	8.053,00
CHP_45kW_el	9.153,00	9.951,00
CHP_150kW_el	16.002,00	18.656,00
CHP_300kW_el	22.072,00	26.788,00
CHP_1MW_el	38.589,00	50.222,00
CHP_3MW_el	64.246,00	89.114,00

## ANHANG 1b:

Ausgewählte Ergebnisse zur optimalen Gasverwertung für die Region Bruck/Mur.  
Studie TUGraz. Verwertung gesamte Gülle der Region.

Obersteiermark - Bruck-Mürzz.; Anzahl Rinder/Betrieb: 24,4 #/Betrieb  
Betriebsgröße: 107,74 ha/Betrieb

CHP-Anlage	Fermenter	Anzahl benötigte Fermenter	Anzahl benötigte CHP Anlagen	Hochgerechnete Transportkosten [€/a]	Hochgerechnete Fermenter+CHP Kosten [€/a]	Hochgerechnete Gesamtkosten [€/a]	Gesamtkosten pro t Gülle [€/t*a]
CHP_19kW_el	Fermenter_5kW_el	389	151	5,40E+06	1,80E+07	2,34E+07	49,20
	Fermenter_80kW_el	26	151	2,34E+07	3,20E+06	2,66E+07	56,05
	Fermenter_160kW_el	12	151	4,19E+07	2,90E+06	4,48E+07	94,23
	Fermenter_250kW_el	9	151	5,84E+07	3,42E+06	6,19E+07	130,12
CHP_30kW_el	Fermenter_5kW_el	389	74	3,76E+06	1,76E+07	2,13E+07	44,90
	Fermenter_80kW_el	26	74	2,85E+07	2,80E+06	3,13E+07	65,80
	Fermenter_160kW_el	12	74	4,07E+07	2,50E+06	4,32E+07	90,95
	Fermenter_250kW_el	9	74	6,04E+07	3,02E+06	6,34E+07	133,37
CHP_45kW_el	Fermenter_5kW_el	389	70	3,64E+06	1,80E+07	2,16E+07	45,43
	Fermenter_80kW_el	26	71	2,72E+07	3,18E+06	3,04E+07	63,93
	Fermenter_160kW_el	12	71	4,67E+07	2,87E+06	4,96E+07	104,33
	Fermenter_250kW_el	9	71	5,77E+07	3,39E+06	6,11E+07	128,55
CHP_150kW_el	Fermenter_5kW_el	389	21	2,55E+06	1,73E+07	1,99E+07	41,85
	Fermenter_80kW_el	26	22	3,23E+07	2,58E+06	3,48E+07	73,22
	Fermenter_160kW_el	12	22	7,01E+07	2,28E+06	7,23E+07	152,19
	Fermenter_250kW_el	9	22	6,93E+07	2,80E+06	7,20E+07	151,54
CHP_300kW_el	Fermenter_5kW_el	389	12	2,36E+06	1,72E+07	1,95E+07	41,05
	Fermenter_80kW_el	26	12	2,54E+07	2,41E+06	2,78E+07	58,47
	Fermenter_160kW_el	12	12	7,38E+07	2,10E+06	7,58E+07	159,50
	Fermenter_250kW_el	9	12	7,31E+07	2,62E+06	7,57E+07	159,22
CHP_1MW_el	Fermenter_5kW_el	389	4	2,16E+06	1,70E+07	1,91E+07	40,18
	Fermenter_80kW_el	26	4	1,96E+07	2,17E+06	2,17E+07	45,69
	Fermenter_160kW_el	12	4	4,88E+07	1,87E+06	5,07E+07	106,63
	Fermenter_250kW_el	9	4	7,26E+07	2,39E+06	7,49E+07	157,65
CHP_3MW_el	Fermenter_5kW_el	389	2	2,11E+06	1,69E+07	1,89E+07	39,79
	Fermenter_80kW_el	26	2	1,95E+07	2,13E+06	2,15E+07	45,29
	Fermenter_160kW_el	12	2	4,07E+07	1,82E+06	4,24E+07	89,13
	Fermenter_250kW_el	9	2	5,64E+07	2,34E+06	5,86E+07	123,36

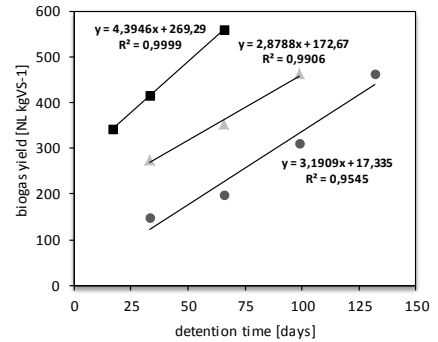
## ANHANG 2:

### Abbildung des Excel-Optimierungsprogramms zur Ermittlung der Nettoenergieausbeute.

#### Data Basis from Laboratory Experiments

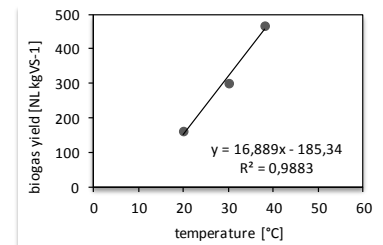
Analysed correlation of temperature and retention time  
a linear correlation was observed (see figure)

	Temperature	gradient	intercept
<i>squares</i>	38 °C	4,395	269,29
<i>triangles</i>	30 °C	2,879	172,67
<i>dots</i>	20 °C	3,191	17,335



target temperature 45 °C target retention time 45 days

Temperature	biogas yield
38 °C	467,05 L kg <sup>-1</sup> vs
30 °C	302,22 L kg <sup>-1</sup> vs
20 °C	160,93 L kg <sup>-1</sup> vs
<b>45 °C</b>	<b>574,65 L kg<sup>-1</sup> vs</b>



#### biogas plant calculation

volatile solid content 50 kg/m<sup>3</sup>  
liquid manure temperature 5 °C

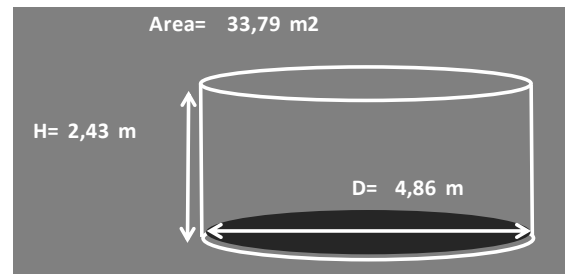
temperature difference (soil-biogas plant)  
ΔT 40 °C

c<sub>p</sub> liquid manure 3,951 kJ/kgK  
k-Wert isolated slurry pit 0,243 W/m<sup>2</sup>\*K

heat loss 7,882 kWh d<sup>-1</sup>m<sup>-3</sup>  
heat demand 43,900 kWh d<sup>-1</sup>m<sup>-3</sup>

Σ heat demand 51,782 kWh d<sup>-1</sup>m<sup>-3</sup>  
energy biogas 186,763 kWh d<sup>-1</sup>m<sup>-3</sup>

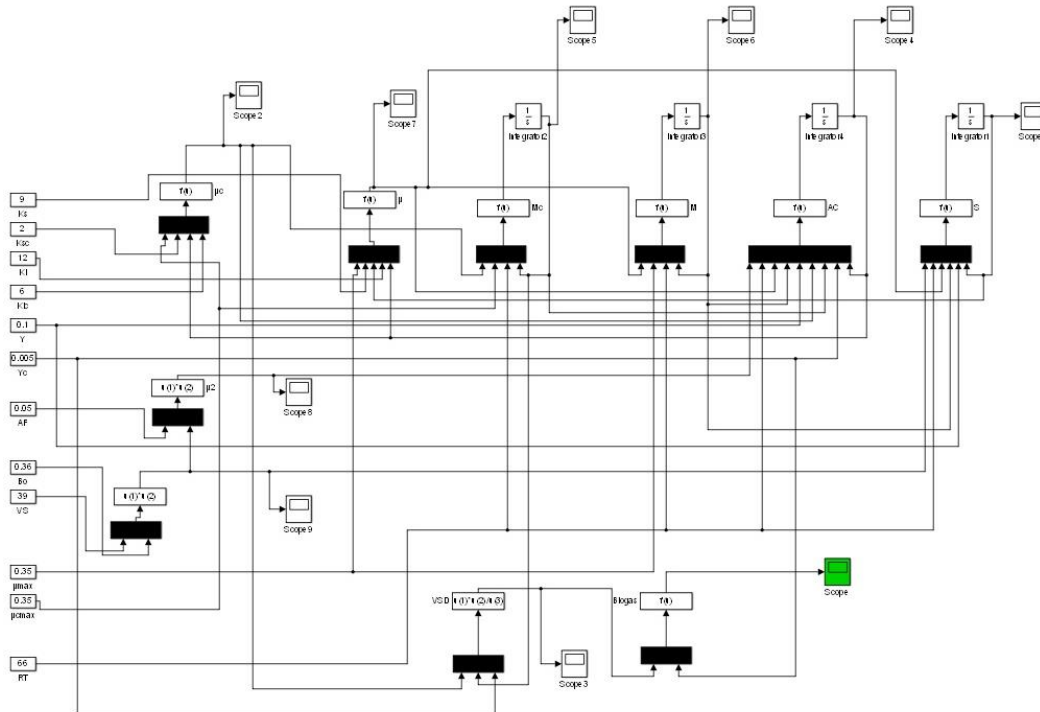
net energy produced 134,980 kWh d<sup>-1</sup>



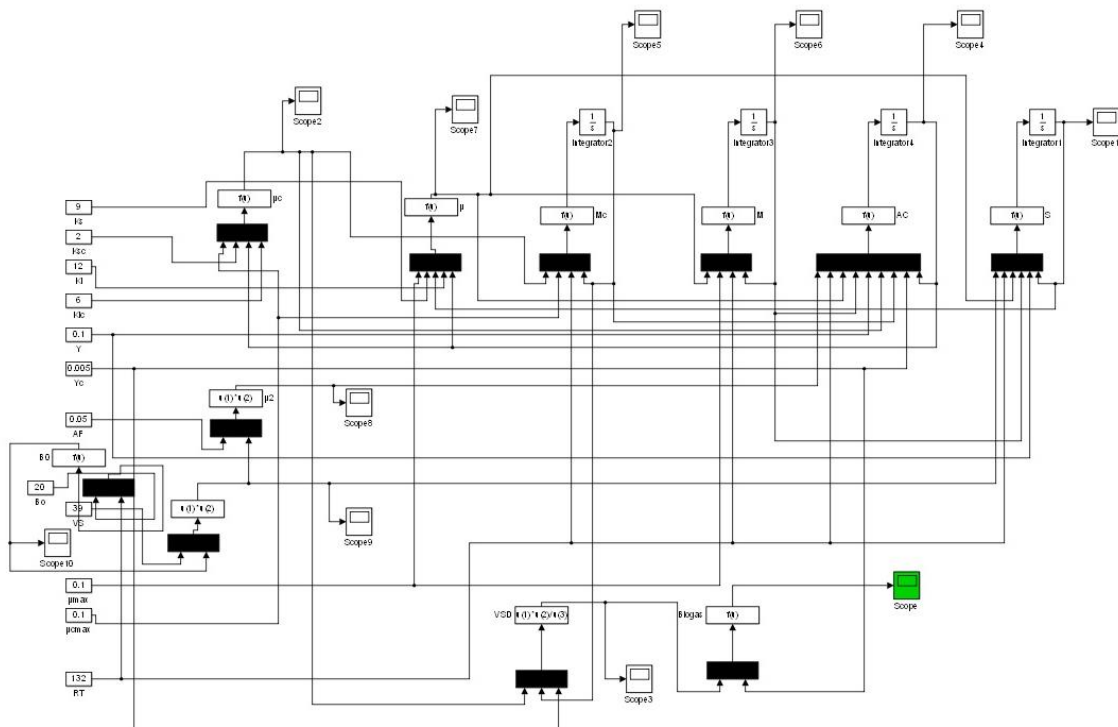
### ANHANG 3:

Implementierung des Modells nach Hill [vgl. Hill 1983] in Matlab Simulink.

Parameter wie in Hill [vgl. Hill 1983]:

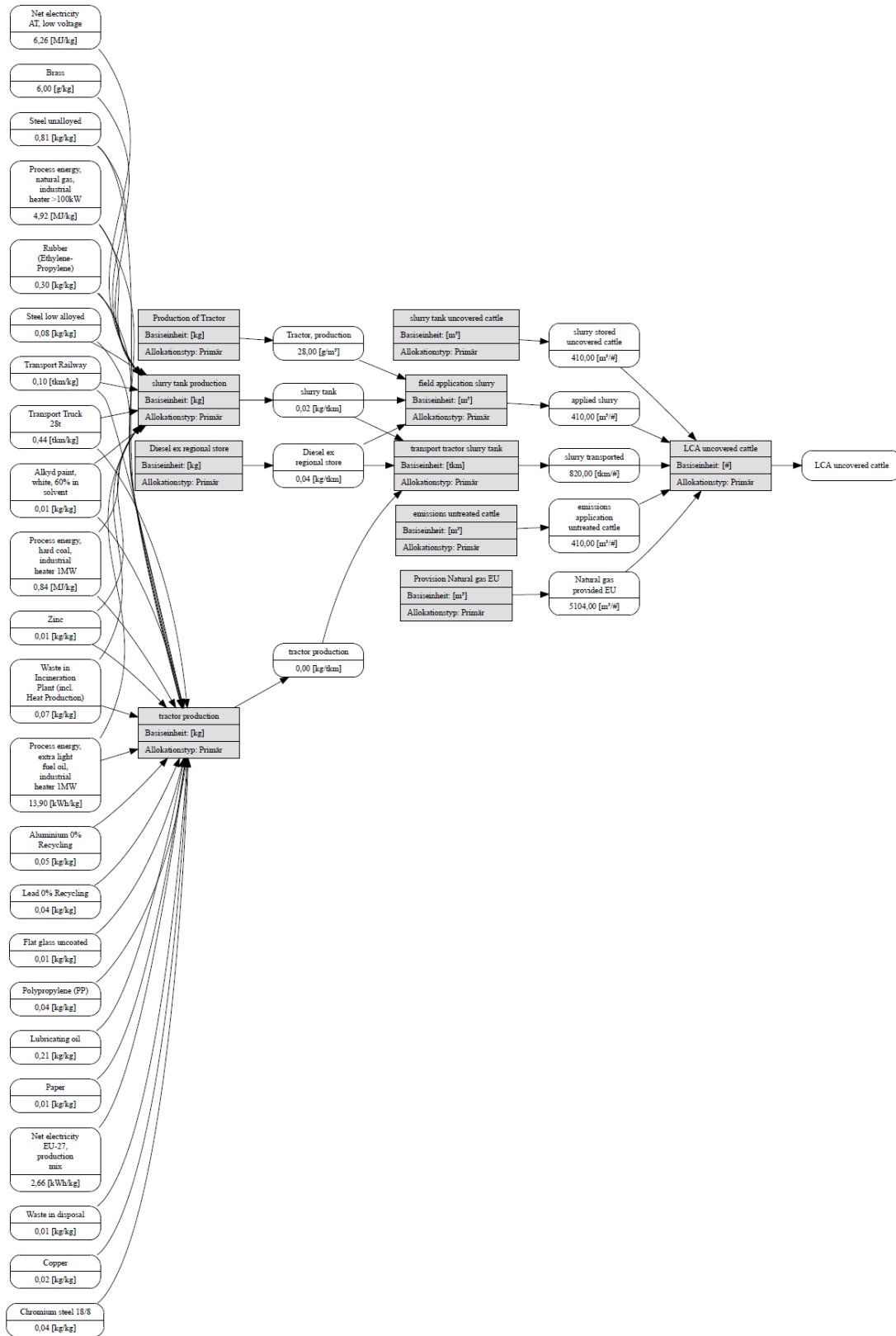


Modifikation von Hill [vgl. Hill 1983].  $B_0$  in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur:



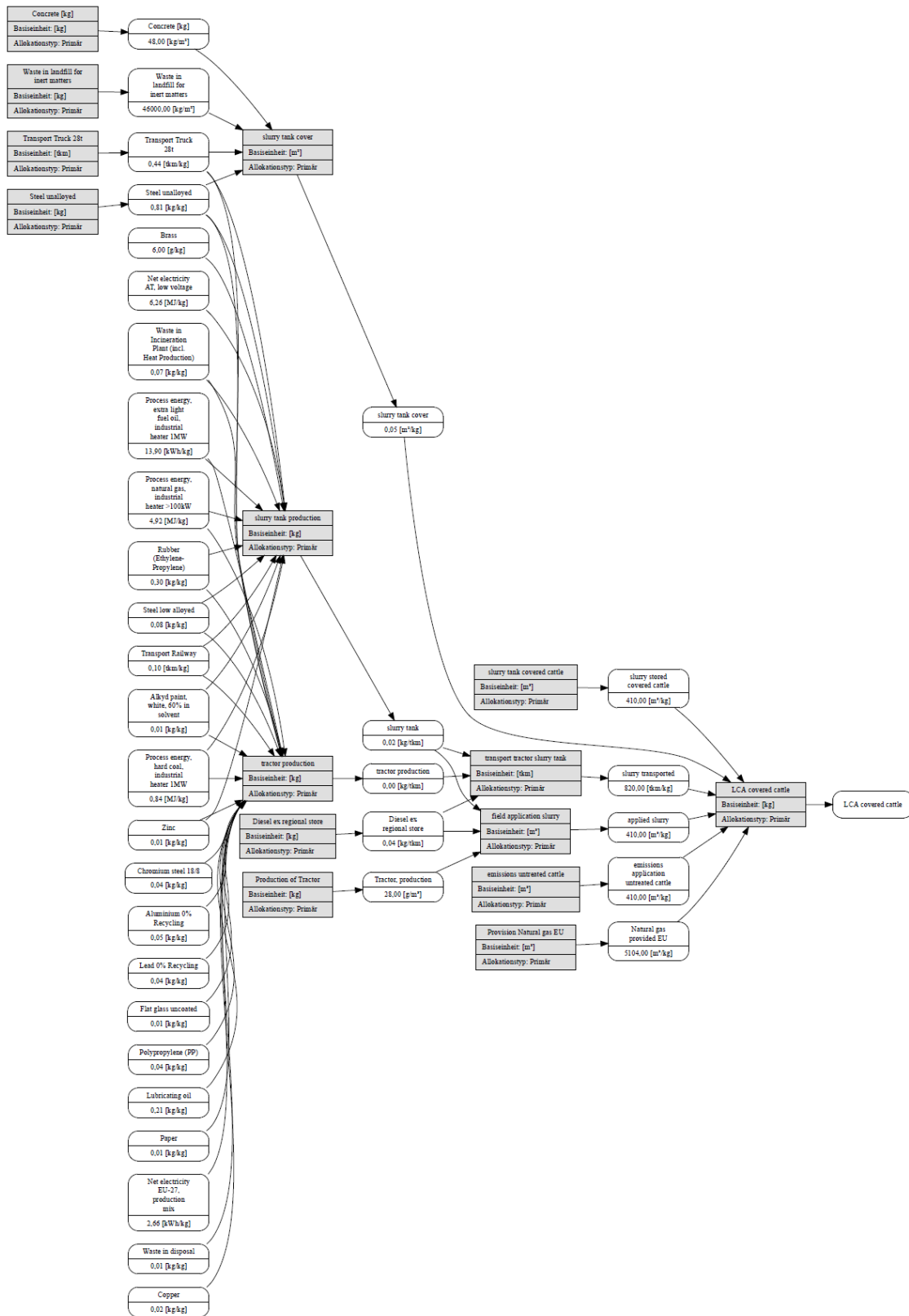
# ANHANG 4a:

## Prozesskette wie in SPIONWeb implementiert für System1- Rindergülle



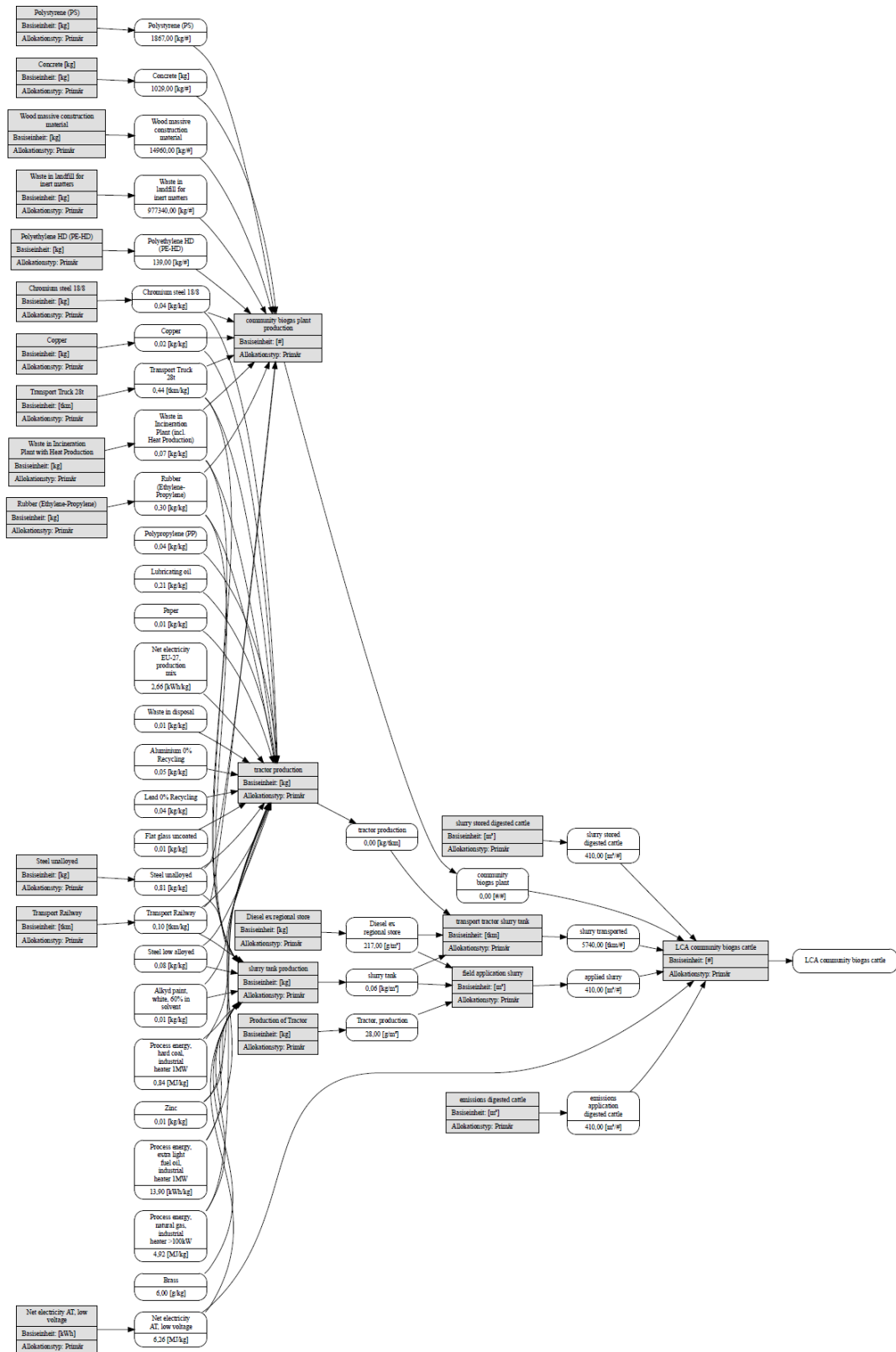
# ANHANG 4b:

## Prozesskette wie in SPionWeb implementiert für System2- Rindergülle



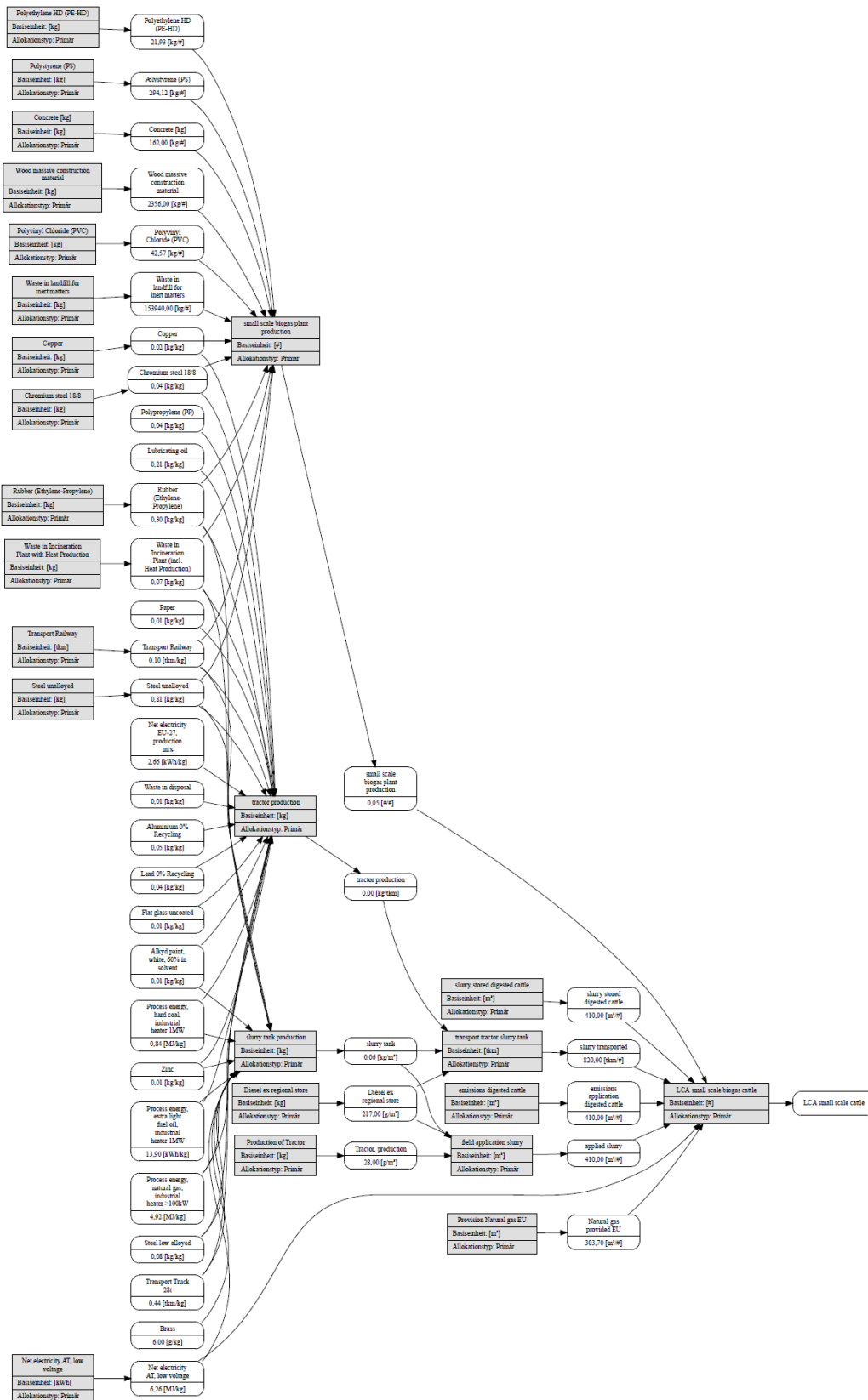
# ANHANG 4c:

## Prozesskette wie in SPIONWeb implementiert für System3- Rindergülle



# ANHANG 4d:

## Prozesskette wie in SPionWeb implementiert für System 4- Rindergülle

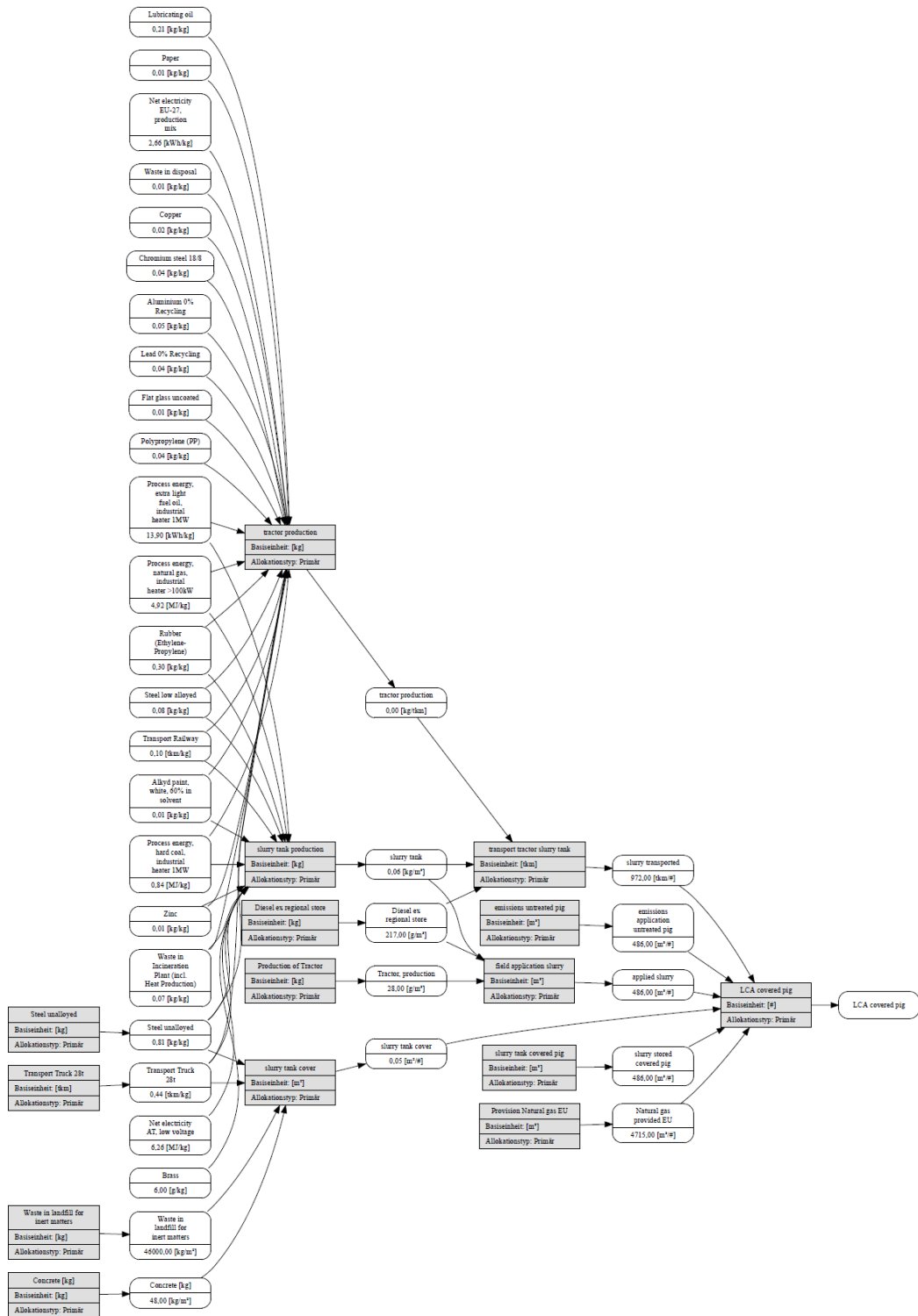






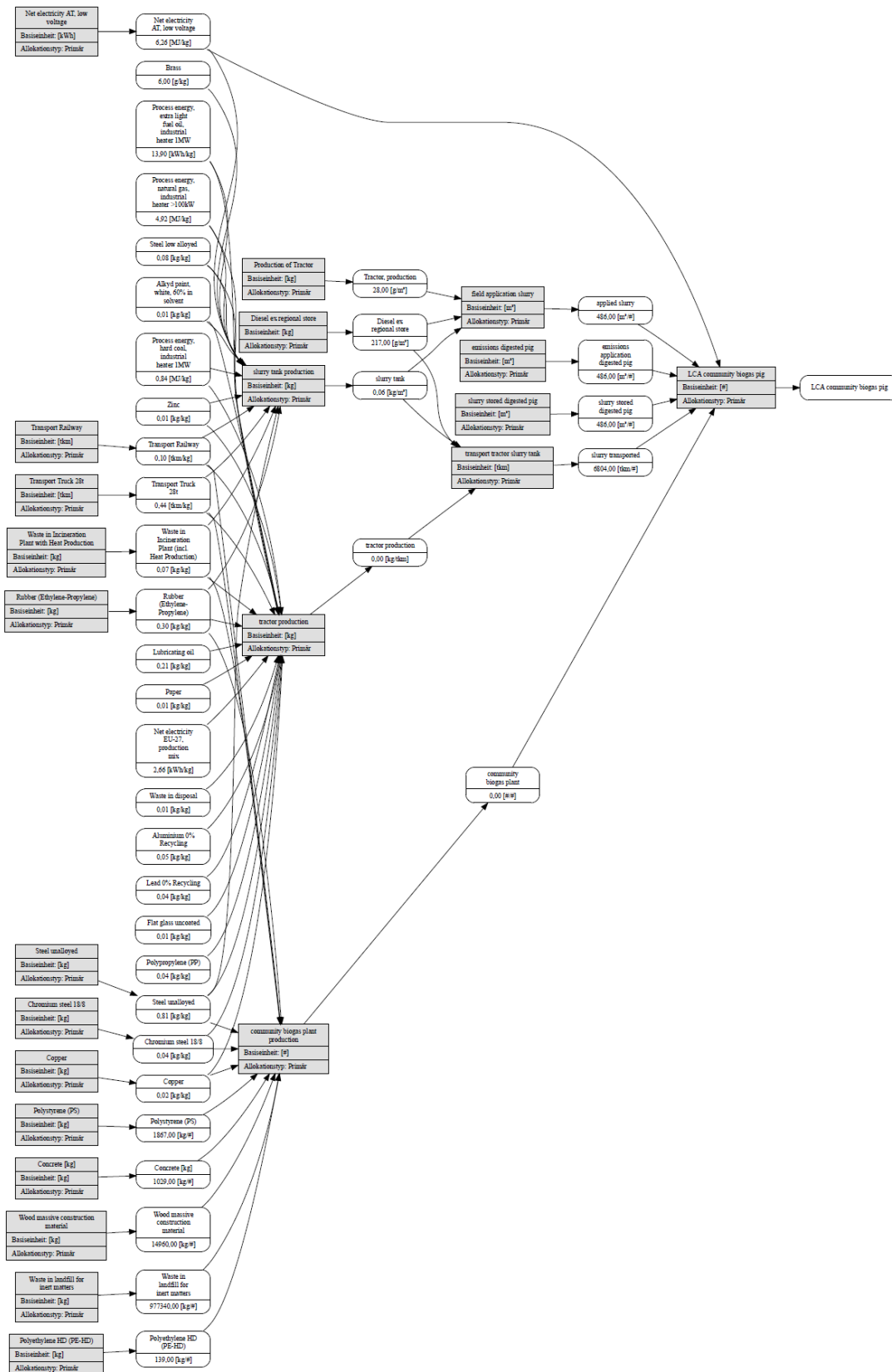
# ANHANG 4f:

## Prozesskette wie in SPionWeb implementiert für System 2- Schweinegülle



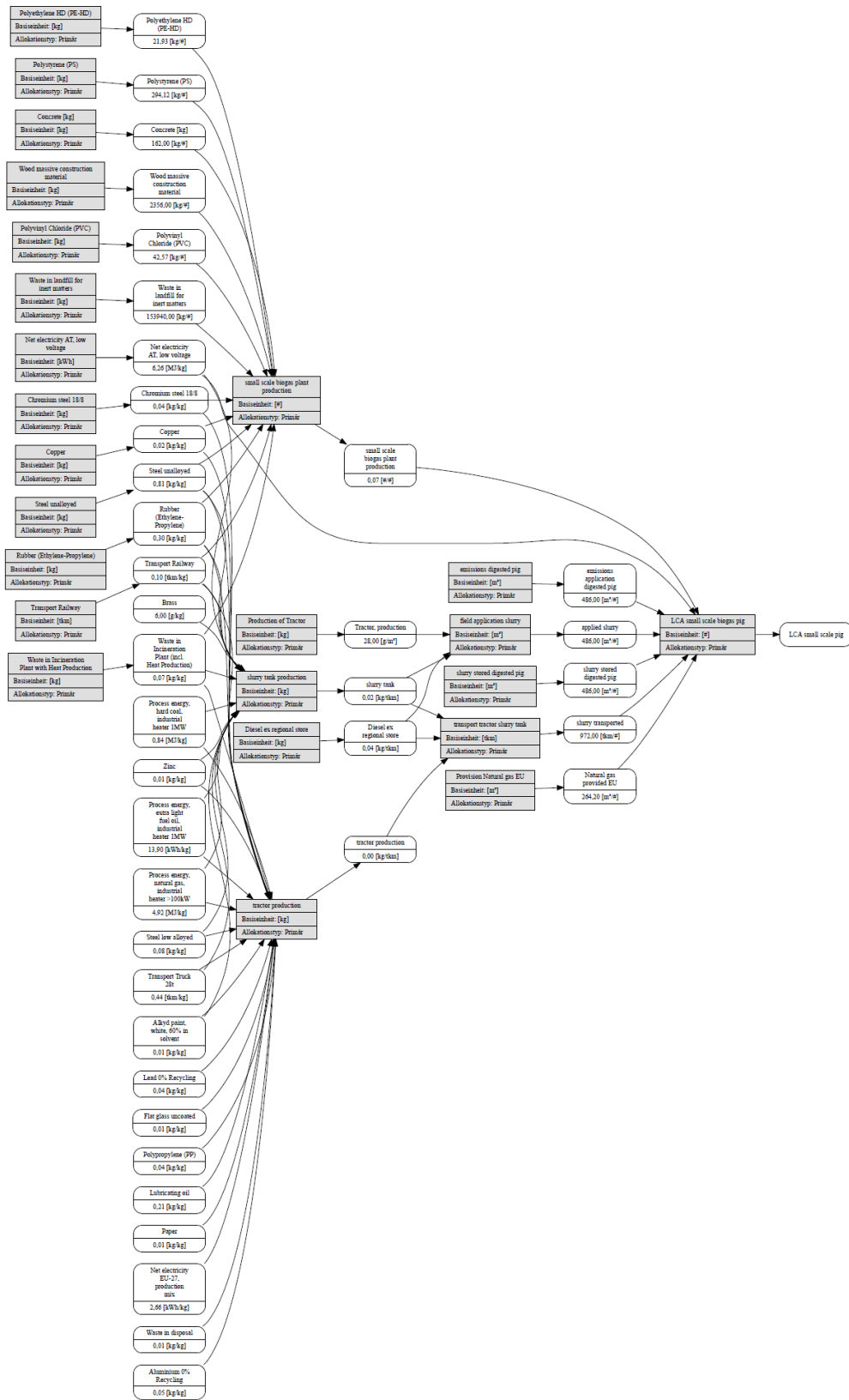
# ANHANG 4g:

## Prozesskette wie in SPIONWeb implementiert für System 3- Schweinegülle



# ANHANG 4h:

## Prozesskette wie in SPionWeb implementiert für System 4- Schweinegülle



ANHANG 5a:

Materialien der Maximalstruktur für die Optimierung einer kombinierten Bioethanol und Biogasanlage. Export aus pns-solver.

Materials					
Name	Type	Quantity type	Price	Min. flow	Max. flow
straw_untreated	raw material	mass	0,00 €/t	1,00 t/yr	1,00 t/yr
ps_170_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
ps_160_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
ps_180_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
ps_200_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
ps_190_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
sf_170_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
sf_160_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
sf_180_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
sf_190_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
sf_200_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
sf_200_20opt	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
lf_170_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
lf_160_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
lf_180_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
lf_190_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
lf_200_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
lf_200_20opt	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
biogas	intermediate	volume	0,00 €/m <sup>3</sup>	0,00 m <sup>3</sup> /yr	100.000.000,00 m <sup>3</sup> /yr
ethanol_im	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
steam	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
digestate_190_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
digestate_rest_190	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
digestate_200_20	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
digestate_200_20opt	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
digestate_rest_200	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
digestate_rest_200opt	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
digestate_rest_200opt_CH5	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
enzymes	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
hydrolysate_170	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
hydrolysate_160	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
hydrolysate_190	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
hydrolysate_180	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
hydrolysate_200	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
hydrolysate_200opt	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
biomethane_im	intermediate	volume	0,00 €/m <sup>3</sup>	0,00 m <sup>3</sup> /yr	100.000.000,00 m <sup>3</sup> /yr
lignin	intermediate	mass	0,00 €/t	0,00 t/yr	100.000.000,00 t/yr
process_heat	intermediate	energy, work, quantity of heat	0,00 €/MJ	0,00 MJ/yr	100.000.000,00 MJ/yr
power	product	energy, work, quantity of heat	1,00 €/MJ	0,00 MJ/yr	100.000.000,00 MJ/yr
ethanol	product	energy, work, quantity of heat	1,00 €/MJ	0,00 MJ/yr	100.000.000,00 MJ/yr
biomethane	product	energy, work, quantity of heat	1,00 €/MJ	0,00 MJ/yr	100.000.000,00 MJ/yr
electricity	product	energy, work, quantity of heat	1,00 €/MJ	0,00 MJ/yr	100.000.000,00 MJ/yr
heat	product	energy, work, quantity of heat	0,00 €/MJ	0,00 MJ/yr	100.000.000,00 MJ/yr

