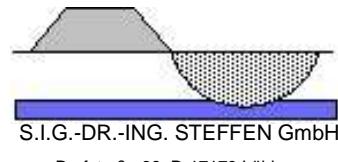




Westfälische Wilhelms-Universität Münster



S.I.G.-DR.-ING. STEFFEN GmbH

Dorfstraße 38, D-17179 Lüburg

Westfälische Wilhelms-Universität Münster

&

S.I.G.-DR. -ING. STEFFEN GmbH

in Kooperation mit der  
Abfallentsorgungsgesellschaft Ruhrgebiet (AGR)

## Konzeption

**zum ökologisch nachhaltigen Betrieb**

**einer Biogasanlage am stillgelegten Deponiestandort**

**Rheinberg-Winterswick**

Diplomarbeit

Vorgelegt im Fachbereich Geowissenschaften der  
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster  
Studiengang Landschaftsökologie  
von

Nina Köhler

Betreuer:

Prof. Dr. Otto Klemm, Westfälische Wilhelms-Universität Münster  
Dr.-Ing. Burckhard Tscherpel, S.I.G.-DR.-ING. STEFFEN GmbH

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>1. Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Anlass der Arbeit.....	4
1.1.1 Treibhausgasemissionen .....	4
1.1.2 Ökologische Folgen des Energiepflanzenanbaus.....	5
1.2 Zusammenhang zwischen Biogaserzeugung und Abfallwirtschaft .....	6
1.3 Ziel der Arbeit.....	7
<b>2. Grundlagen der Biogaserzeugung.....</b>	<b>9</b>
2.1 Fermentationsprozess.....	9
2.2 Substrate .....	9
2.3 Verfahrenstechnik .....	12
2.3.1 Nassfermentation.....	13
2.3.2 Trockenfermentation.....	15
2.3.3 Kraft-Wärme-Kopplung .....	16
<b>3. Untersuchungsgebiet.....</b>	<b>19</b>
3.1 Naturräumliche Gliederung und Schutzgüter von besonderer Bedeutung (Vorrang und Ausschlussgebiete) .....	19
3.2 Klima .....	20
3.3 Geologie .....	20
3.4 Boden.....	21
3.5 Hydrologie .....	23
3.6 Situation der Landwirtschaft.....	24

3.7	Biogasanlagen in der Umgebung von Rheinberg .....	27
<b>4.</b>	<b>Methoden .....</b>	<b>28</b>
4.1	Potentialanalyse der Region Rheinberg .....	28
4.1.1	Rohstoffe für die Biogaserzeugung.....	28
4.1.2	Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung .....	28
4.2	Erstellen einer Treibhausgasanalyse für ausgewählte Biogassubstrate anhand einer Lebenszyklusanalyse .....	30
4.2.1	Zieldefinition und Untersuchungsrahmen.....	31
4.2.2	Sachbilanz .....	32
4.2.3	Wirkungsabschätzung.....	37
4.2.4	Auswertung.....	38
<b>5.</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>39</b>
5.1	Potentiell verfügbare Rohstoffe für die Biogaserzeugung .....	39
5.1.1	Nachwachsende Rohstoffe .....	39
5.2.2	Außenlandwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffe.....	48
5.2	Treibhausgasbilanzen ausgewählter Biogassubstrate .....	51
5.2.1	Silomais .....	52
5.2.2	Zuckerrüben.....	53
5.2.3	Zuckerrüben-Reststoffe .....	54
5.2.4	Gülle .....	55
5.3	Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung.....	57
<b>6.</b>	<b>Diskussion verschiedener Konzepte zum ökologisch nachhaltigen Betrieb einer Biogasanlage am Deponiestandort Rheinberg-Winterswick .....</b>	<b>58</b>
6.1	Bewertung der Rohstoffe für die Biogaserzeugung .....	58
6.1.1	Nachwachsende Rohstoffe .....	59
6.1.2	Außenlandwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffe.....	62
6.2	Treibhausgasbilanzen der Strombereitstellung aus verschiedenen Biogassubstraten.....	62
6.3	Mögliche Standorte der Biogasanlagen-Komponenten .....	70
6.3.1	Fermenter .....	70
6.3.2	Blockheizkraftwerk .....	71
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>73</b>

**8. Danksagung.....**

**Literatur.....**

**Anlagen .....**

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien entsprechend dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (2004) bei Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 2008 .....	1
Abbildung 2:	Biogasanlagen in Deutschland 1992 bis 2007 .....	3
Abbildung 3:	Stufen eines biochemischen Abbauprozesses organischer Substanzen .....	9
Abbildung 4:	Einfluss der Stoffgruppen auf Menge und Qualität des Biogases .....	10
Abbildung 5:	Biogasausbeute unterschiedlicher Substrate .....	12
Abbildung 6:	Landwirtschaftliche Biogasanlage als Nassfermentation .....	13
Abbildung 7:	Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit Verwendung von Kosubstraten als Nassfermentation .....	14
Abbildung 8:	Schematische Darstellung des Container- / Garagenverfahrens (BEKON) .....	16
Abbildung 9:	Trockenfermenter in Containerbauweise .....	16
Abbildung 10:	Schematischer Aufbau eines BHKW .....	18
Abbildung 11:	Übersichtsplan Rheinberg am Niederrhein .....	19
Abbildung 12:	Natürlicher Grundwasserflurstand (oben) und Veränderung durch den Bergbau (unten) .....	24
Abbildung 13:	Übersicht der Biogasanlagen in der Umgebung von Rheinberg ..	27
Abbildung 14:	Darstellung des Untersuchungsrahmens und der THG-Emissionsquellen des Energiebereitstellungssystems „Energie aus Biogas“ .....	32
Abbildung 15:	Erzeugerpreise ausgewählter Feldfrüchte für NRW .....	41
Abbildung 16:	Verschiedene Wurzelsysteme innerhalb der vorgeschlagenen Energiepflanzen Marktfrucht-Fruchtfolge .....	46
Abbildung 17:	Potentielle Wärmeabnehmer um die Deponie Rheinberg-Winterswick .....	57
Abbildung 18:	THG-Quellen und -senken der Energiebereitstellung aus Rindergülle mittels eines Gas-Otto-BHKWs .....	67

Abbildung 19:	THG-Quellen und -senken der Energiebereitstellung aus Rindergülle mittels eines Zündstrahl-BHKWs .....	67
Abbildung 20:	Mögliche Standorte für die Komponenten einer Biogasanlage für den konkreten Fall Deponie Rheinberg-Winterswick .....	72

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Art und Herkunft der verschiedenen organischen Substratgruppen....	11
Tabelle 2:	Betriebsfläche der landwirtschaftlichen Betriebe 2003 nach Hauptnutzungs- und Kulturarten in Rheinberg .....	25
Tabelle 3:	Naturschutzflächen der Stadt Rheinberg 2007.....	26
Tabelle 4:	Betriebsstrukturen der Viehhaltungsbetriebe in Rheinberg (Betriebsfläche > 5 ha) .....	26
Tabelle 5:	Global Warming Potential wichtiger Treibhausgase zur Quantifizierung des anthropogenen Treibhauseffektes bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren .....	31
Tabelle 6:	Repräsentative Substrate für die Lebenszyklusanalyse .....	33
Tabelle 7:	Schadgasemissionen der Vorkettenenergie und des Endenergiegehaltes von Diesel in g / l Diesel .....	34
Tabelle 8:	Unterstellte THG-Emissionswerte für die Verbrennung von Biogas im Gas-Otto- und -Zündstrahl BHKW .....	37
Tabelle 9:	Für die Vergärung relevante Feldfrüchte in Rheinberg und ihr Flächenertrag sowie der potentielle Biogasertrag .....	40
Tabelle 10:	Dreigliedrige Fruchfolge aus Energiepflanzen und Pflanzen für den Verkauf.....	43
Tabelle 11:	Fünfgliedrige Fruchfolge aus Energiepflanzen und Pflanzen für den Verkauf.....	45
Tabelle 12:	Viehbesatz in Rheinberg und Alpen nach Großvieheinheiten und durchschnittliche jährliche Biogaserträge der Gülle bzw. des Kotes ...	47
Tabelle 13:	Grünschnittmengen und mittlere Biogaserträge von Naturschutzflächen der Stadt Rheinberg .....	48
Tabelle 14:	Organische Abfallarten und Mengen der Stadt Rheinberg und deren mittlere Biogaserträge .....	50
Tabelle 15:	Varianten der Treibhausgasanalysen.....	51

Tabelle 16: Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas auf der Basis von Silomais (Werte gültig für die Stromerzeugung aus 100 ha Silomais / a). Für CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O berechnen sich die CO <sub>2</sub> -Äquivalente durch Multiplikation der Masse-Emissionen (kg) mit dem GWP (Tabelle 5). Die Präzision der Zahlenangaben spiegelt nicht die Genauigkeit wieder, mit der sie bekannt sind.....	52
Tabelle 17: Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas auf der Basis von Zuckerrüben (Werte gültig für die Stromerzeugung aus 100 ha Zuckerrüben / a) .....	53
Tabelle 18: Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas auf der Basis von Zuckerrüben-Resten (Werte gültig für die Stromerzeugung aus Reststoffen von 100 ha Zuckerrüben / a).....	54
Tabelle 19: Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas auf der Basis von Rindergülle (Werte gültig für die Stromerzeugung aus Rindergülle von 300 Rindern (0,7 GVe) / a) .....	55
Tabelle 20: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Lebenszyklusanalyse.....	56
Tabelle 21: Vergleich der Sachbilanzen verschiedener Lebenszyklusanalysen zu THG-Emissionen von Biogasanlagen.....	64

**Anlagenverzeichnis**

- Anlage 1: Übersicht der Flächennutzung in Rheinberg - Luftbild  
(auf Grundlage von Luftbildern des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen, Aufnahmen vom Juni 2006)
- Anlage 2: Übersicht der Gebiete mit besonderer ökologischer Bedeutung:  
Naturschutzgebiete,  
FFH-Gebiete,  
Vogelschutzgebiete von internationaler Bedeutung und  
Trinkwasserschutzzonen  
(Auf Grundlage der topografischen Karte, Blatt 4405 Rheinberg des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen, 1994)
- Anlage 3: Geologische Übersichtskarte  
(aus der Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen, Blatt 4504 Moers, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, 1968)
- Anlage 4: Geologische Übersichtskarte  
(Geologische Übersichtskarte, Blatt CC 4702 Düsseldorf, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1984)
- Anlage 5: Bodentypenkarte NRW  
(Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen, Blatt 4504 Moers, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, 1968)
- Anlage 6: Tabellen mit Annahmewerten für die Lebenszyklusanalyse
- Anlage 7: Spezifische Eigenschaften der organischen Substrate zur Biogaserzeugung
- Anlage 8: Grafische Darstellungen der Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse
- Anlage 9: Luftbild der Deponie Rheinberg-Winterswick  
(Luftbild des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen, Aufnahme vom Juni 2006)

## Abkürzungsverzeichnis

AGR = Abfallentsorgungsgesellschaft Ruhrgebiet

BHKW = Blockheizkraftwerk

EEG = Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien

FFH-Gebiete = Fauna-Flora-Habitat-Gebiete (Naturschutzgebiete von internationaler Bedeutung)

FM = Frischmasse

GPS = Ganzpflanzensilage

GWh = Gigawattstunden ( $10^6$  kWh)

CCM = Corn-Cob-Mix (eine Mischung aus Körnern und Kolben, ohne Stengel)

CH<sub>4</sub> = Methan

CO<sub>2</sub> = Kohlendioxid

CO<sub>2</sub>-ÄE = CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen

GVe = Großviecheinheit

NH<sub>3</sub> = Ammoniak

kW = Kilowatt

kWh<sub>el</sub> = Kilowattstunden elektrische Leistung

kWh<sub>th</sub> = Kilowattstunden thermische Leistung

LZA = Lebenszyklusanalyse

N = Stickstoff

N<sub>2</sub>O = Distickstoffoxid (Lachgas)

NO<sub>2</sub> = Stickstoffdioxid

NO<sub>x</sub> = Stickoxide allgemein

NaWaRo = Nachwachsende Rohstoffe

THG = Treibhausgas

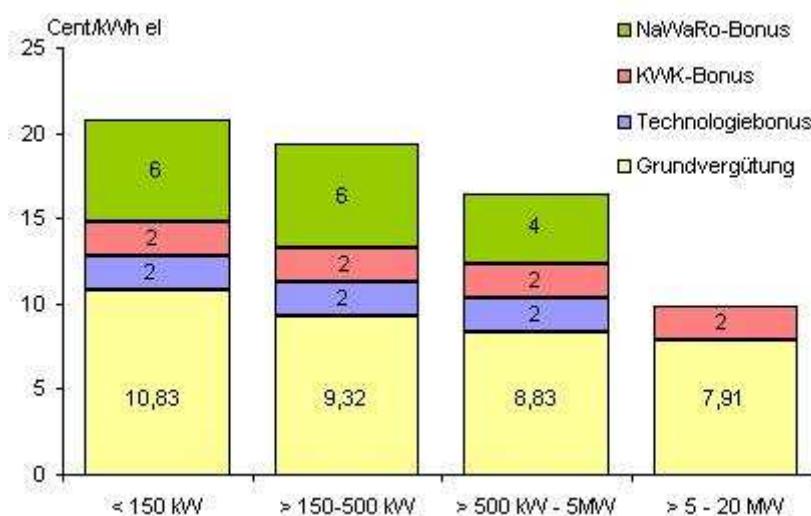
TS = Trockensubstanz

oTS = organische Trockensubstanz

## 1. Einführung

Am 27. September 2001 trat die EU-Richtlinie zur Förderung der erneuerbaren Energien<sup>1</sup> in Kraft. Die Richtlinie legt konkrete Vorgaben für den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch für jedes Land der EU verbindlich fest. Für Deutschland gibt die Richtlinie das Erreichen eines 12,5%-igen Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2010 (Richtlinie 2001/77/EG) vor.

Ein großer Aufschwung der Biogasbranche begann bereits 1991 auf Grund des Stromeinspeisungsgesetzes (StrEG), welches erstmals eine Mindestvergütung für Strom aus erneuerbaren Energien festlegte. 2000 wurde das StrEG durch das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG 2000) abgelöst, das die bisher jährlich schwankende Förderung durch einen Fördersatz in Form einer Mindestvergütung über eine Laufzeit von 20 Jahren festlegte. Der Fördersatz war einer jährlichen Regression von 1,5% unterworfen. Das EEG 2000 wurde im Jahre 2004 auch auf Grundlage der Forderungen der Richtlinie 2001/77/EG novelliert. Neue Regelungen betrafen sowohl eine Anhebung der Fördersätze (Grundvergütung) wie auch zusätzliche Bonus-Systeme. Hierdurch wurde die bislang rasanteste Entwicklung angestoßen (EDER, B. UND SCHULZ, H., 2006). Das Bonussystem des EEG 2004 ist in Abbildung 1 dargestellt. Die jährliche Regression beträgt weiterhin 1,5 %.



**Abbildung 1: Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien entsprechend dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (2004) bei Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 2008.**

<sup>1</sup> Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Elektrizitätsbinnenmarkt vom 27. September 2001.

Der Bonus für nachwachsende Rohstoffe, der so genannte NaWaRo-Bonus, gilt für „Strom aus Pflanzen oder Pflanzenbestandteilen, die in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben oder im Rahmen der Landschaftspflege anfallen und die keiner weiteren als der zur Ernte, Konservierung oder Nutzung in der Biomasseanlage erfolgten Aufbereitung oder Veränderung unterzogen wurden“, sowie für Gülle im Sinne der Verordnung (EG) 1774 / 2002 und Schlempe aus landwirtschaftlichen Brauereien (§ 8 Abs. 2 Nr. 1 EEG).

Der Kraft-Wärme-Kopplungs-Bonus (KWK-Bonus) wird nur für den Anteil des KWK-Stroms gezahlt. Dieser ist das rechnerische Produkt aus Nutzwärme und Stromkennzahl der KWK-Anlage (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) und berechnet sich nach folgender Formel: a kWh<sub>th</sub> x b = c kWh<sub>el</sub>

a = Extern genutzte Wärme in kWh

b = Stromkennzahl des BHKW (die Stromkennzahl ist das Verhältnis von elektrischem zum thermischen Wirkungsgrad: % kWh<sub>el</sub> / % kWh<sub>th</sub>)

c = KWK-Strom in Kilowattstunden

Der Technologie-Bonus wird für Strom aus Anlagen gewährt, die auch in Kraft-Wärme-Kopplung betrieben werden und die Biomasse durch thermochemische Vergasung (z. B. Holzvergasung) oder Trockenfermentation umwandeln, das zur Stromerzeugung eingesetzte Gas aus Biomasse auf Erdgasqualität aufbereitet worden ist oder der Strom mittels Brennstoffzellen, Gasturbinen, Dampfmotoren, Organic-Rankine-Anlagen, Mehrstoffgemisch-Anlagen, insbesondere Kalina-Cycle-Anlagen oder Stirling–Motoren gewonnen wird.

Im Jahr 2009 wird erneut eine EEG-Novelle in Kraft treten, die gerade im Bereich des Bonus-Systems einige Änderungen und Anpassungen an die Entwicklungen im Erneuerbare-Energien-Sektor vorsieht. Für die Biogaserzeugung relevante Änderungen sind:

- Anhebung der Grundvergütung für Kleinanlagen bis 150 kW um 1ct / kWh ab 2009
- Ein zusätzlicher Gülle-Bonus von 2 ct / kWh<sub>el</sub> für Anlagen bis 150 kW, die mindestens 30 Masse-% Gülle einsetzen

- Kopplung des Anspruchs auf die Grundvergütung nach EEG mit der Bedingung der Kraft-Wärme-Kopplung für Anlagen über 5 MW
- Verringerung der jährlichen Regression der Grundvergütung auf 1%
- Wegfall des Technologie-Bonus für Trockenfermentations-Anlagen
- Festgelegte Positivliste für Abwärmenutzungen, die einen Anspruch auf den KWK-Bonus gewähren

In Abbildung 2 ist der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland seit 1992 dargestellt. Da der Ausbau so erfolgreich verläuft, sollen als neues Ziel für den Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch bis 2020 mindestens 20 % gesetzlich verankert werden (Bundesministerium für Naturschutz, Umwelt und Reaktorsicherheit, 2007).



Abbildung 2: Biogasanlagen in Deutschland 1992 bis 2007

Quelle: Fachverband Biogas e. V., Stand 09 / 07

## 1.1 Anlass der Arbeit

Die Entwicklung der Biogasbranche, wie auch die der anderen erneuerbaren Energien, genießt heute seit 17 Jahren die politische Förderung auf Grund von Umweltschutzz Zielen und Klimaschutzvereinbarungen. Genau wie jede andere Energiegewinnungsmethode bringt jedoch auch die Energieerzeugung aus Biogas bzw. aus Organik ökologisch nachteilige Entwicklungen mit sich. Die vorliegende Arbeit analysiert dieses spezifische Spannungsfeld und befasst sich mit den daraus entstandenen Forderungen für eine ökologisch nachhaltige Biogaserzeugung.

Die Kritik an negativen Umweltauswirkungen der Biogaserzeugung wird in zahlreichen Mitteilungen und Veröffentlichungen von öffentlichen Stellen, privaten Organisationen und Institutionen im Umweltbereich ausgedrückt.

Die nachfolgenden Aspekte stehen im Fokus der Kritik:

1. Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) durch die Energieerzeugung
2. Ökologisch nachteilige Entwicklungen durch die Flächennutzung für den Energiepflanzenanbau

### 1.1.1 Treibhausgasemissionen

Im Rahmen einer Studie des World Wide Fund for Nature (WWF) Deutschland über die zentralen ökologischen und sozialen Einflussfaktoren der Bioenergieerzeugung wird die Forderung nach einer konkreten Grenze für Treibhausgasemissionen im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse<sup>2</sup> formuliert. Die Forderung beinhaltet eine Kopplung der staatlichen Förderung erneuerbarer Energien an eine Höchstemissionsgrenze für Treibhausgase von:

- < 60 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen / GJ (0,216 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent / kWh) für die Umwandlung in nutzbare Energie (Strom und Wärme).
- sowie die Einhaltung eines Energieumwandlungsfaktors von mindestens 67 % (FRITSCH et al., 2006).

<sup>2</sup> Im Falle von landwirtschaftlichen Produkten wird bei einer Lebenszyklusanalyse der gesamte Lebenszyklus des zu untersuchenden Produkts von der Produktion und Nutzung bis zur Entsorgung analysiert, um die mit dem Produkt verbundenen Umweltbelastungen zu ermitteln (SCHOLWIN et al., 2006).

### 1.1.2 Ökologisch nachteilige Entwicklungen durch die Flächennutzung für den Energiepflanzenanbau

Zur Vermeidung negativer Folgen für die Flächennutzung durch den Energiepflanzenanbau<sup>3</sup> werden folgende Forderungen an die Nachhaltigkeit gestellt:

- Konkrete Formulierungen für Vorranggebiete bzw. Ausschlussgebiete für die Biomasseproduktion,
- der Erhalt von Arten- und Strukturvielfalt in der Landwirtschaft,
- der Erhalt der Bodenfruchtbarkeit landwirtschaftlicher Böden,
- die Einhaltung einer mindestens dreigliedrigen Fruchfolge,
- der weitgehende Verzicht auf Herbizide, Fungizide und Insektizide sowie
- der sparsame Umgang mit Ressourcen.

Der Ausschluss von bestimmten Anbaugebieten betrifft Flächen bzw. Biotope mit einem hohen Erhaltungswert, wie zum Beispiel gesetzlich geschützte Biotope, Dauergrünland, Wald, Verbindungskorridore und Schutzgebiete. Diese sind in der Vergangenheit teilweise durch die Umnutzung zum Energiepflanzenanbau massiv beeinträchtigt worden (FRITSCHE et al., 2006).

Die Verengung bzw. Vereinheitlichung von Fruchfolgen für die Biomasseproduktion stellt eine starke Belastung für die Arten- und Strukturvielfalt in der Agrarlandschaft sowie eine erhöhte Gefahr des Schädlingsbefalls dar. Dies wiederum führt zu erhöhtem Einsatz von Pestiziden (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2007). Die Forderungen an den nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen lautet daher eine Beschränkung der Energiepflanzen-Hauptfrucht auf maximal ein Drittel der Anbaufläche, die Einhaltung einer dreigliedrigen Fruchfolge und der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft (OELIGER & SCHÖNE, 2007) sowie die Abstimmung der Erntezeitpunkte auf Bodenbrüter, Niederwild und Samenreife der Ackerbegleitflora (STEIN, 2007).

Beim Anbau von Energiepflanzen und der Nutzung von pflanzlichen Reststoffen muss verstärkt auf eine ausgeglichene Humusbilanz und die Begrenzung von Stickstoffdüngungen geachtet werden (FRITSCHE et al.. 2006). Gerade bei Raps und

<sup>3</sup> Definition Energiepflanzen: Land- oder forstwirtschaftliche Produkte, die im Gegensatz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion zur Erzeugung von erneuerbarer Energie produziert und eingesetzt werden (nach HARTMANN & KALTSCHMITT 2002 und ECKEL et al., 2006).

Mais verbleiben oft große Mengen des ausgebrachten Stickstoffs mit den Ernterückständen im Boden, welches die Gefahr der Auswaschung in Grund- oder Oberflächengewässer birgt (SRU, 2007). Durch Zwischenfruchtanbau und Untersaaten kann sowohl die Gefahr des Nährstoffaustrags als auch der Bodenerosion erheblich gesenkt werden (BECKMANN, 2007).

## 1.2 Zusammenhang zwischen Biogaserzeugung und Abfallwirtschaft

Seit dem Jahr 2005 beschäftigen sich Abfallentsorgungsgesellschaften vermehrt mit unterschiedlichen Konzepten für eine Deponiefolgenutzung. So zum Beispiel auch mit energetisch ausgerichteten Nutzungen in Form von Biogaserzeugung, Windrädern oder Photovoltaikanlagen. Der Grund für die Überlegungen sind die seit 1993 geltenden und seit 2005 verbindlichen, erhöhten Anforderungen an die Beschaffenheit von Abfällen zur Ablagerung gemäß der Technischen Anleitung für Siedlungsabfall (TASi). Auf Grund fehlender technischer Möglichkeiten zur Erfüllung der Anforderungen kam es daher seit 2005 zur Beendigung vieler Deponiebetriebe. Diese Deponien befinden sich zurzeit in der Stilllegungs- oder Nachsorgephase.

Die gesetzlich vorgeschriebene Nachsorgephase für Deponien der Klassen 1 und 2 (Siedlungsabfalldeponien) beträgt gemäß § 19 Abs. 3 DepV mindestens 30 Jahre und ist mit hohen finanziellen Aufwendungen für Langzeitsicherungsmaßnahmen und Kontrollen des Deponieverhaltens verbunden. Aus diesem Grund stellt sich seit 2005 vermehrt die Frage nach wirtschaftlichen Nachnutzungen der stillgelegten Deponiestandorte. Die Nutzungsmöglichkeiten, die beispielsweise von der Abfallentsorgungsgesellschaft Ruhrgebiet (AGR) in einem internen Workshop in Betracht gezogen wurden umfassen:

- ökologisch ausgerichtete Nutzungen, wie natürliche Sukzessionsflächen oder Waldanpflanzungen,
- wirtschaftlich ausgerichtete Nutzungen, wie z.B. die Ansiedlung von Industrie,
- Nutzungen für Erholung und Freizeit und
- energetisch ausgerichtete Nutzungen, wie z.B. Biogasanlagen, Windräder oder Photovoltaikanlagen.

### 1.3 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit betrachtet die Energiegewinnung durch eine Biogasanlage als Folgenutzung eines stillgelegten Deponiestandortes. Als Standort wurde die Deponie Rheinberg-Winterswick gewählt, da hier mehrere Aspekte besonders große Synergieeffekte für die Biogaserzeugung versprechen. Ein wesentlicher Faktor ist, dass am Deponiestandort Rheinberg-Winterswick bereits die Technik zur Deponiegasgewinnung und -verstromung installiert, aber nicht mehr ausgelastet ist.

Da Deponiegas, genau wie Biogas, durch den anaeroben Abbau von organischen Substanzen entsteht, kann die Technik zur Deponiegasverstromung (Gasverdichterstation, Blockheizkraftwerk (BHKW) und Netzeinspeisung) ebenso für die Verwertung von Biogas eingesetzt werden.

Die Deponie Rheinberg-Winterswick wird im Kreis Wesel von der Abfallentsorgungsgesellschaft Ruhrgebiet (AGR) betrieben und ist 1996 in die Stilllegungsphase übergegangen.

Für eine Biogaserzeugung sowie für die Nachsorge der Deponie würden am Standort Rheinberg-Winterswick folgende Synergieeffekte wirksam:

1. Gegenwärtig sind zwei funktionstüchtige BHKW-Motoren mit einer Einzelleistung von 430 kW installiert. Von diesen beiden Motoren ist zurzeit nur noch ein Motor mit 300 bis 350 kW durch das Deponiegas ausgelastet, Tendenz sinkend. Synergieeffekte entstünden hier in Form von Investitionseinsparungen bei der Biogasanlagentechnik. An dieser Stelle sei angemerkt, dass BHKW-Motoren und die dazugehörige Gastechnik ein zentraler und kostenintensiver Bestandteil der Biogasanlagentechnik sind. Des Weiteren besteht die Möglichkeit der Auslastung der installierten Gesamtleistung von 860 kW. Laut der Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), 2005 waren im Jahre 2005 für ein Biogas-BHKW mit einer Leistung von 430 kW rund 260.000 € Anschaffungskosten anzusetzen.
2. Der Methananteil im Deponiegas ist seit der Installation der BHKW-Motoren (1994) von 53 – 55% auf ca. 40 – 42 % (Deponieschwachgas) gesunken. Da die BHKW-Motoren Gas mit einem Methananteil unter 40% nicht mehr wirtschaftlich verarbeiten können, bietet eine Mischung mit dem methanhaltigeren Biogas (durchschnittlich 50 – 70 %) die Möglichkeit, das Deponiegas länger zu nutzen.

3. Der Arbeitsaufwand für die rechtlich vorgeschriebene Deponienachsorge (zum Beispiel Betreuung sowohl der Gasbrunnen, als auch der technischen Anlagen, etc) kann mit dem Biogasanlagenbetrieb kosten- und zeitsparend kombiniert werden.
4. Qualifiziertes Personal mit Fachwissen zur Verstromung von Methangas ist durch langjährige Erfahrungen mit der Deponiegasverstromung geeignet, um auch eine Biogasanlage zu betreuen.
5. Die dezentrale Lage der Deponie Rheinberg-Winterswick (s. Anlage 1) bietet verschiedene Möglichkeiten der Versorgung mit Biogassubstraten. Als Varianten kommen nachwachsende Rohstoffe sowie Rest- und Abfallstoffe aus der Kommune in Frage.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die zentralen ökologischen Spannungsfelder im Zusammenhang mit der Biogaserzeugung eingegangen. Darauf aufbauend wird ein Konzept entwickelt, welches die ökologischen Gegebenheiten der Region Rheinberg in dem Maße berücksichtigt und integriert, wie es durch Umweltverbände gefordert wird. Die Erreichung des Ziels wird vor dem Hintergrund der zuvor genannten Nachhaltigkeitskriterien verfolgt.

Das Ergebnis soll zum einen zeigen, welche Potentiale sich an dem besonderen Standort einer stillgelegten Abfalldeponie für die Biogaserzeugung entfalten können und zum anderen wie sich ökologische Ansprüche und ökonomische Voraussetzungen gut verbinden lassen.

Neben dem Bezug zum konkreten Standort Rheinberg-Winterswick lässt das Konzept Rückschlüsse auf die ökologische Einbettung der Biogaserzeugung an anderen Standorten zu.

## 2. Grundlagen der Biogaserzeugung

### 2.1 Fermentationsprozess

Biogas ist ein Stoffwechselprodukt beim biochemischen Abbau organischer Substanzen (= Fermentation). Dabei sind verschiedene Bakteriengruppen daran beteiligt, die organischen Substanzen, vorwiegend Wasser, Fett, Eiweiß, Kohlehydrate und Mineralstoffe in ihre ursprünglichen Bestandteile Kohlendioxid, Mineralien und Wasser zu zerlegen (EDER & SCHULZ, 2006). In Abbildung 3 ist der Fermentationsprozess in vier Stufen dargestellt. Der Prozess beginnt im aeroben Milieu und endet mit der Methanbildung im anaeroben Milieu. Die Dauer der einzelnen kontinuierlich ablaufenden Prozessstufen ist von der Zusammensetzung und Vorbehandlung der organischen Substanz abhängig.

Prozessstufen	Produkte	Dauer	Milieu
1. Hydrolyse	Einfachzucker, Aminosäuren, Fettsäuren	aerobe Bakterien 20min-10h	pH 4,5....6
2. Versäuerung	Cx-C6 langkettige Carbon-/Fettsäuren C5 Valeriansäure C4 Buttersäure C3 Propionsäure	fakultativ anaerobe Bakterien (verbrauchen verbleibenden Sauerstoff 1-48h)	pH 6....7,5
3. Essigsäurebildung	C2 Essigsäure C1 Ameisensäure	Essigsäurebildende Bakterien 3-10 Tage	Wasserstoffredu- zierende Bakterien, sehr temperaturemp- findlich
4. Methanbildung	Methan ( $\text{CH}_4$ ) Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{N}_2$	streng anaerobe methanbildende Bakterien 48h-5 Tage	pH 6,6....8 optimaler Wert: 7

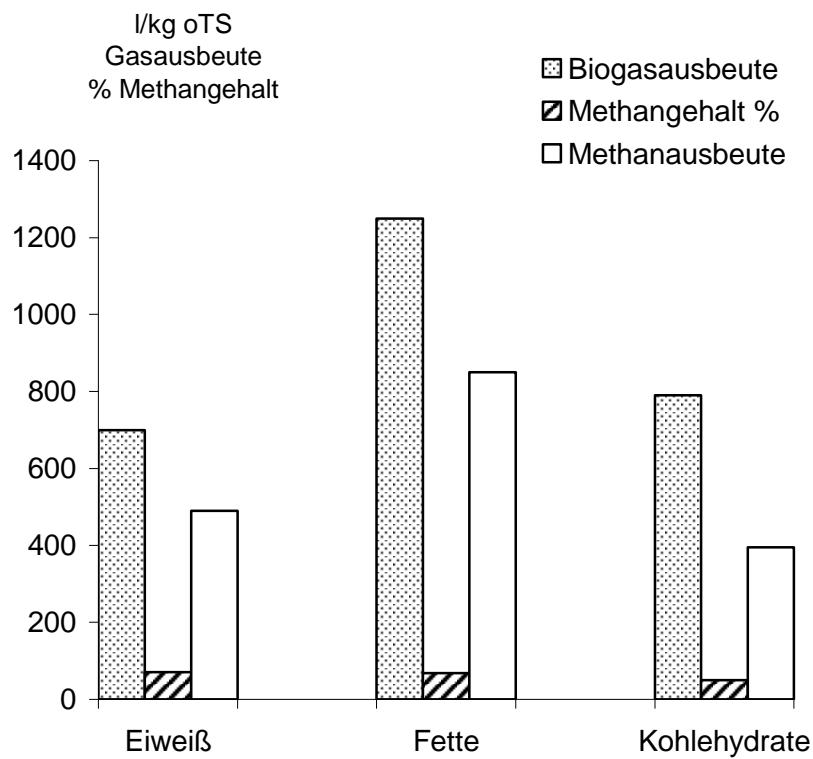
Abbildung 3: Stufen eines biochemischen Abbauprozesses organischer Substanzen

Quelle: frei nach EDER & SCHULZ, 2006

### 2.2 Substrate

Biogassubstrate haben zwei maßgebliche Merkmalsunterschiede, die den Biogasprozess beeinflussen. Sie unterscheiden sich zum einen durch den Anteil der organischen Trockensubstanz (oTS) pro Gewichtseinheit und zum anderen durch die Stoffgruppenzusammensetzung des Organikanteils. Der Anteil der oTS im Substrat ist ausschlaggebend für die Eignung zur Biogaserzeugung, da nur aus diesem Anteil das Biogas entstehen kann. Die oTS setzt sich aus Proteinen, Fetten und

Kohlehydraten zusammen, die wiederum unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich ihrer Abbaubarkeit und Methanerträge haben. In Abbildung 4 ist der Einfluss der Stoffgruppenzusammensetzung des Organikanteils auf die Gasmenge und -qualität dargestellt.



**Abbildung 4: Einfluss der Stoffgruppen auf Menge und Qualität des Biogases**  
Quelle: EDER & SCHULZ, 2006

Die biologische Abbaugeschwindigkeit und somit die technisch notwendige Verweilzeit im Fermenter hängt ebenfalls von der Zusammensetzung der Stoffgruppen eines Substrates ab. Je komplexer die Struktur der Stoffgruppen, umso länger dauert der Abbauprozess.

Kurzkettige Kohlenstoffverbindungen wie Zucker und Stärke werden während des Fermentationsprozesses am schnellsten zu Methan abgebaut. Die Grenze der technisch-ökonomischen Verweilzeit liegt bei langkettigen Celluloseverbindungen. Cellulose kommt in stark verholztem Material vor und benötigt neben einer langen Verweildauer ein sehr großes Fermentervolumen, um zu Methan abgebaut zu werden. Demzufolge macht das Fermentieren von stark verholztem Material aus ökonomischer Hinsicht keinen Sinn und wird daher nicht praktiziert (EDER & SCHULZ, 2006).

Biogassubstrate können neben ihren biologischen Eigenschaften auch anhand ihrer Art und Herkunft charakterisiert werden. In Tabelle 1 werden die Biogassubstrate nach ihrer Herkunft den verschiedenen gesellschaftlichen Branchen zugeordnet sowie gemäß § 8 Abs. 2 Nr.1 des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG 2004) in nachwachsende Rohstoffe und gemäß Biomasseverordnung (BiomasseV) in sonstige Biomasse zur Biogaserzeugung unterteilt. Der gesetzliche Status regelt die vorgeschriebene Mindestvergütung des Stromes aus den unterschiedlichen Substraten sowie die Anforderungen an Hygienisierung und Entsorgung des Gärrestes.

**Tabelle 1: Art und Herkunft der verschiedenen organischen Substratgruppen**

Landwirtschaft	Lebensmittelindustrie / -vertrieb	Kommunalentsorgung	Landschaftspflege
<b>Brauereischlempe aus landwirtschaftlichen Brennereien</b>	Extraktions- Destillations- und Prozessrückstände (beispielsweise aus gewerblichen Brauereien, Schlachtereien, etc)	Organische Anteile des Hausmülls	<b>kommunales Landschaftspflege material**</b> (Grünschnitt von städtischen Grünanlagen)
<b>Gülle*</b>	Speisereste / -abfälle	Bioabfall	Straßenbegleitgrün <b>Grünschnitt von Naturschutzflächen**</b>
<b>Festmist</b>		Klärschlamm	
<b>landwirtschaftliche Reststoffe**</b>		Klär- und Deponiegas	
<b>Energiepflanzen</b>			

Quelle: frei nach EDER & SCHULZ (2006) und HARTMANN & KALTSCHEIM (2002)

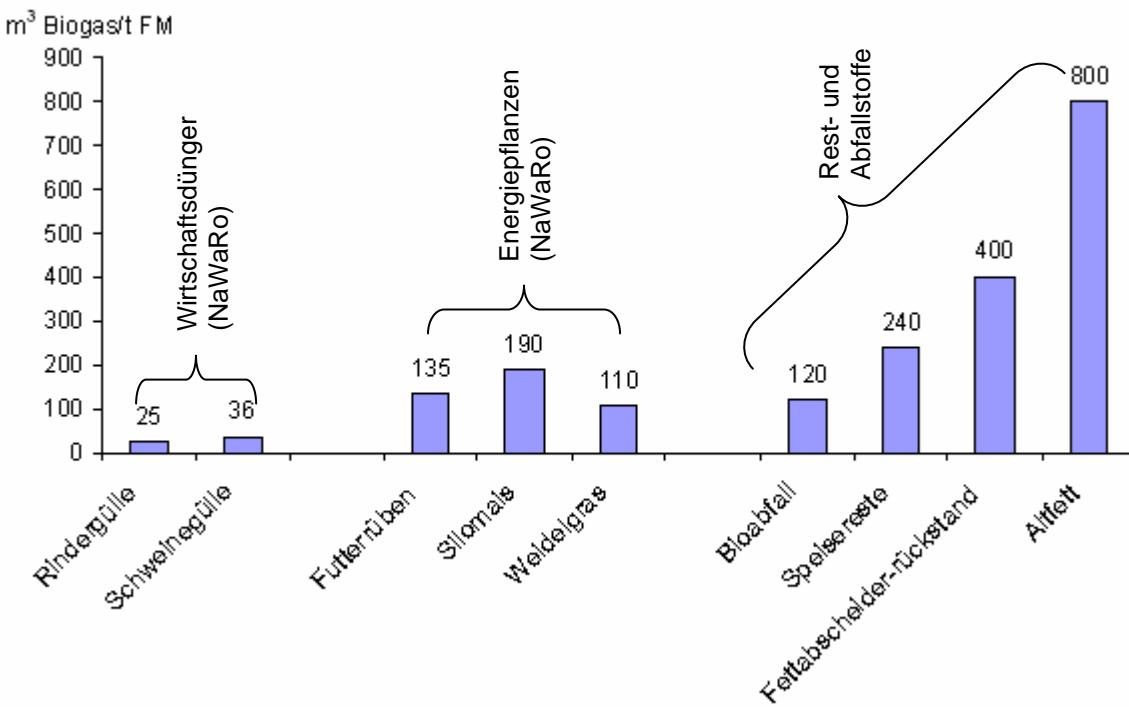
**kursiv:** nachwachsende Rohstoffe gemäß EEG 2004

**nicht kursiv:** sonstige Biomasse

\*: Gülle im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1774 / 2002 (Hygieneverordnung)

\*\*: Nur soweit diese keiner weiteren als der zur Ernte, Konservierung oder Nutzung in der Biomasseanlage erfolgten Aufbereitung oder Veränderung unterzogen wurden (gem. § 8 EEG)

Die Gruppen der nachwachsenden Rohstoffe und der biogenen Rest- und Abfallstoffe unterscheiden sich außerdem in den meisten Fällen in ihrem Energiegehalt bzw. der Stoffgruppenzusammensetzung des Organikanteils. Wie in Abbildung 6 dargestellt, bringen typischerweise Reststoffe aus der lebensmittelverarbeitenden Branche einen um ein Vielfaches höheren Biogasertrag als nachwachsende Rohstoffe.



**Abbildung 5: Biogasausbeute unterschiedlicher Substrate**

Quelle: Rode et al. (2005) (in Anlehnung an WEILAND, 2000)

### 2.3 Verfahrenstechnik

Die Technik der Biogaserzeugung ist im Wesentlichen durch sieben typische Verfahrensmerkmale gekennzeichnet (EDER & SCHULZ, 2006). Diese können mittlerweile in vielen technischen Varianten umgesetzt werden und bieten so vielfältige Möglichkeiten, um den Biogasprozess für unterschiedliche Substrattypen anzupassen. Die kennzeichnenden Verfahrensmerkmale für Biogaserzeugung sind:

- *Art der Beschickung* (diskontinuierlich oder kontinuierlich),
- *Art der Mischung*,
- *Trennung der Prozessstufen* (ein- oder mehrstufige Fermentation),
- *Konsistenz des Substrates* (TS-Gehalt der Substrate),
- *Fermentertemperatur* (mesophil oder thermophil),
- *Bauformen* (liegender oder stehender Fermenter),
- *Baustoffe* (Stahl oder Beton)

(EDER & SCHULZ, 2006).

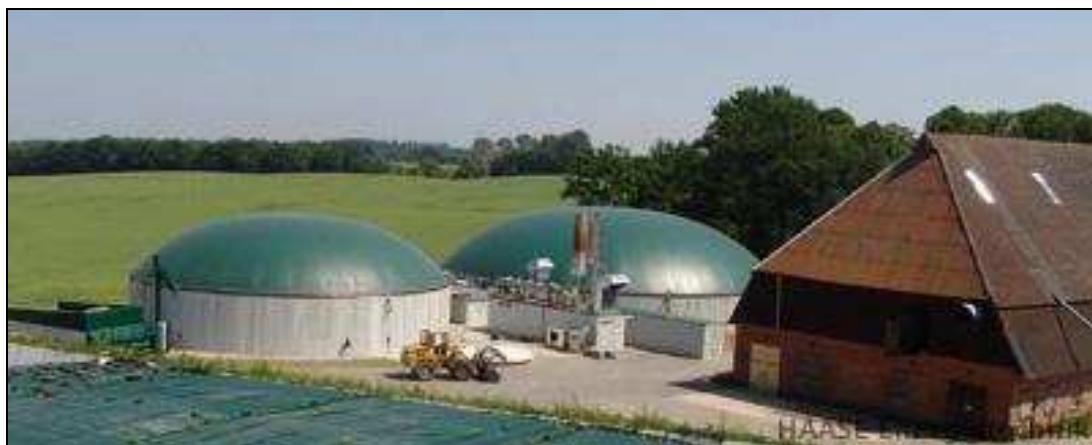
Den größten Unterschied im Prozess bedingt die Konsistenz des Substrates. Man unterscheidet zwischen der Flüssig- bzw. Nassfermentation und der Feststoff- bzw. Trockenfermentation. Als Näherungswerte für die Unterscheidung der Verfahren wird in der Praxis die Fermentation von Organik mit einem Trockenmasseanteil unter

15 % als Nassfermentation und mit einem Trockenmasseanteil über 25 % als Trockenfermentation bezeichnet (EDER & SCHULZ, 2006).

Da die Trockenfermentation nach dem EEG durch den so genannten „Technologiebonus“ gesondert gefördert wird, gibt es diesbezüglich eine amtliche Begründung zu den Unterscheidungskriterien. In der Begründung zu § 8 Abs. 4 EEG heißt es: „Bei Trockenfermentationsverfahren werden im Gegensatz zu Nassfermentationsverfahren keine pumpfähigen, sondern stapelbare Substrate eingesetzt. Die eingesetzten organischen Stoffe haben dabei in der Regel einen Wassergehalt von unter 70 Prozent.“ (Deutscher Bundestag, 2004).

### 2.3.1 Nassfermentation

Für die Nassfermentation ist die Pump- und Rührfähigkeit des Substrates kennzeichnend. Für die Beschickung der / des Fermenter(s) bieten sich drei verschiedene Möglichkeiten an. Es wird zwischen dem Batch-Prinzip, dem Wechselbehälter-Prinzip und dem Durchfluss-Prinzip unterschieden. In Abbildung 6 ist eine landwirtschaftliche Biogasanlage mit dem Verfahren der Nassfermentation abgebildet.

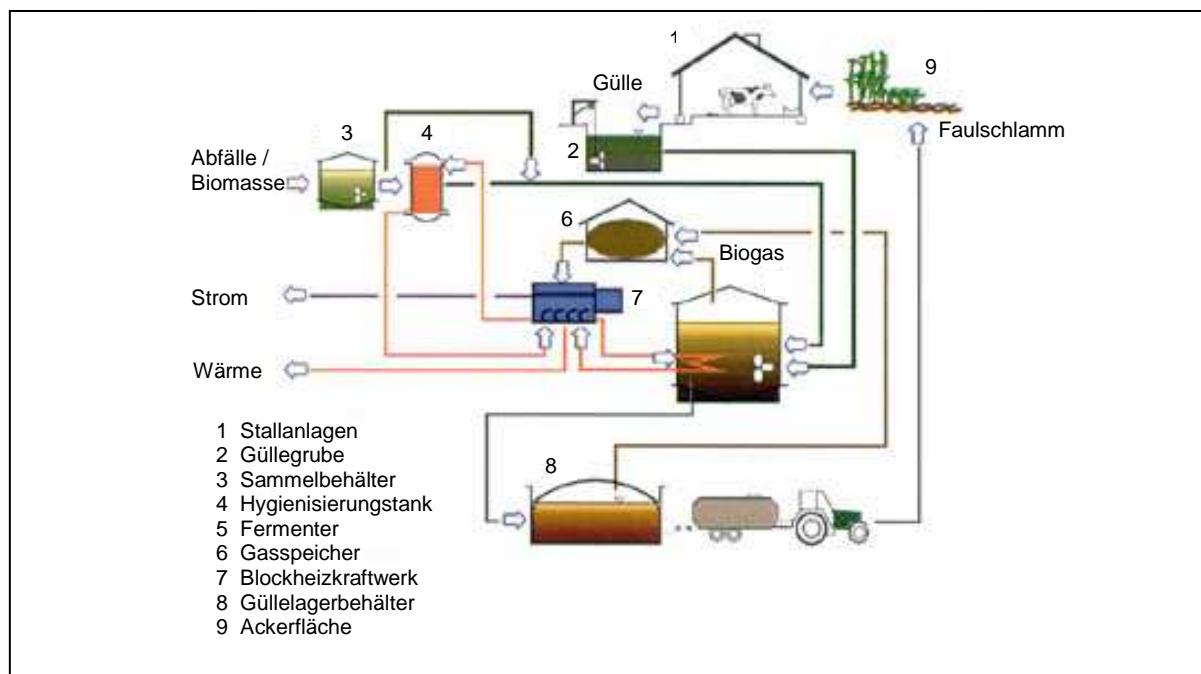


**Abbildung 6: Landwirtschaftliche Biogasanlage als Nassfermentation**  
Quelle: HAASE Energietechnik Gruppe

Das Batch-Prinzip ist gleich dem Wechselbehälter-Prinzip ein diskontinuierliches Verfahren. Das Substrat wird dem Fermenter hierbei nicht regelmäßig, sondern Schubweise zugeführt. Der Fermenter wird aus einem Vorbehälter vollständig gefüllt und zum Ende der gewählten Verweilzeit in einen Lagerbehälter entleert. Die Gasproduktion setzt nach der Befüllung langsam ein, erreicht dann ein Maximum und nimmt danach wieder ab.

Beim Wechselbehälter-Prinzip wird im Gegensatz zum Batch-Prinzip mit zwei Fermentern gearbeitet. Ein Fermenter ist immer vollständig gefüllt und faul aus, während der andere langsam aus einer Vorgrube nachbeschickt wird. Ist der zweite Behälter voll, wird der erste entleert und aus der Vorgrube wieder nachgefüllt. Der Vorteil dieses Verfahrens, wie auch des Batch-Verfahrens, ist eine sehr gleichmäßige Gasproduktion und eine gute Hygienisierungswirkung, da während der gesamten Faulzeit kein Frischsubstrat nachgefüllt wird.

Das Durchfluss-Prinzip ist ein kontinuierliches Verfahren, welches heute weltweit am häufigsten angewandt wird. Der Behälter wird bei diesem Verfahren mit der Geschwindigkeit einer berechneten mittleren Verweilzeit kontinuierlich befüllt und entleert. Die Gasproduktion ist hierdurch sehr gleichmäßig und die Faulraumbelastung kann optimal eingestellt werden. Die Bauweise ist gegenüber den diskontinuierlichen Verfahren kostengünstiger und Platz sparer. Lediglich bei der Hygienisierungswirkung müssen hier Abstriche gemacht werden, da sich das frische Substrat durch die Rührtechnik ständig mit dem ausgefaulten Substrat vermischt (HARTMANN & KALTSCHMITT, 2002). In Abbildung 7 ist eine Verfahrensskizze einer Nassfermentation in kontinuierlichem Betrieb mit Gülle und Kosubstraten<sup>4</sup> abgebildet.



**Abbildung 7: Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit Verwendung von Kosubstraten als Nassfermentation**  
Quelle: FNR, 2006 (Schema: B. LINKE)

<sup>4</sup> Kosubstrate werden alle Substratbeimischungen zur Gülle als ursprüngliches Biogassubstrat bezeichnet.

### 2.3.2 Trockenfermentation

Bei der Trockenfermentation im Batch-Betrieb wird das Substrat in der Regel in stapelbarer Form in den Fermenter eingebracht oder zu einer Miete aufgesetzt und ohne weitere Materialbewegung vergoren.

Auch für die Trockenfermentation ist an kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahren geforscht worden. Es gibt hier viele unterschiedliche Ansätze für die Verfahrenstechnik. Typische Varianten sind zum Beispiel das so genannte Ppropfenstrom-Verfahren und das Silo-Verfahren. Die Durchmischung des Fermenterinhals erfolgt bei diesen Verfahren entweder mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch. Im Ppropfenstrom-Verfahren wird das frische Substrat nicht perkoliert, sondern mit ausgefaultem Material vermischt, um es mit den methanbildenden Bakterien anzuimpfen. Die Mischung des frischen und des ausgegorenen Materials geschieht entweder bevor es in den Fermenter eingebracht wird oder direkt im Fermenter. Beim Silo-Verfahren wird das frische Substrat zunächst mit ausgefaultem gemischt und von oben in einen stehenden, zylindrischen Fermenter eingebracht. Das Substratgemisch durchwandert dann den Fermenter nach unten und wird währenddessen abgebaut (Universität Rostock, 2007).

Da für diskontinuierliche Verfahren keine maschinentechnischen Eintrags- und Austragssysteme erforderlich sind, zeichnen sich diese durch eine einfache verfahrenstechnische Gestaltung des Fermenters aus. Daraus ergeben sich ein geringer Wartungsaufwand sowie Unempfindlichkeit gegenüber Störstoffen und faserigen Substraten. Alle Bestandteile des Gärsubstrates haben die gleiche Verweilzeit im Fermenter, weswegen eine gleichmäßige Ausnutzung des Substrates gewährleistet ist. Dies ist jedoch nur solange der Fall, wie keine Inhomogenitäten bezüglich der Bioaktivität und der Milieubedingungen (Temperatur, pH-Wert, Feuchte) im Fermenter vorliegen (WEILAND, 2001).

Die Aktivierung des anaeroben Abbaus geschieht entweder mit Perkolationsflüssigkeit (mit biologisch aktiven Bakterien angereichert), mit der das Substrat periodisch berieselte wird (zum Beispiel 3-A-Verfahren mit Perkolationkreuzlaufführung), durch Überstauung mit Prozessflüssigkeit (Aufstauverfahren) oder durch Vermischung des frischen Gärsubstrates mit biologisch aktivem Gärückstand (WEILAND, 2001). In Abbildung 8 ist eine

schematische Darstellung der Trockenfermentation mit dem Einsatz von Perkolationsflüssigkeit dargestellt.

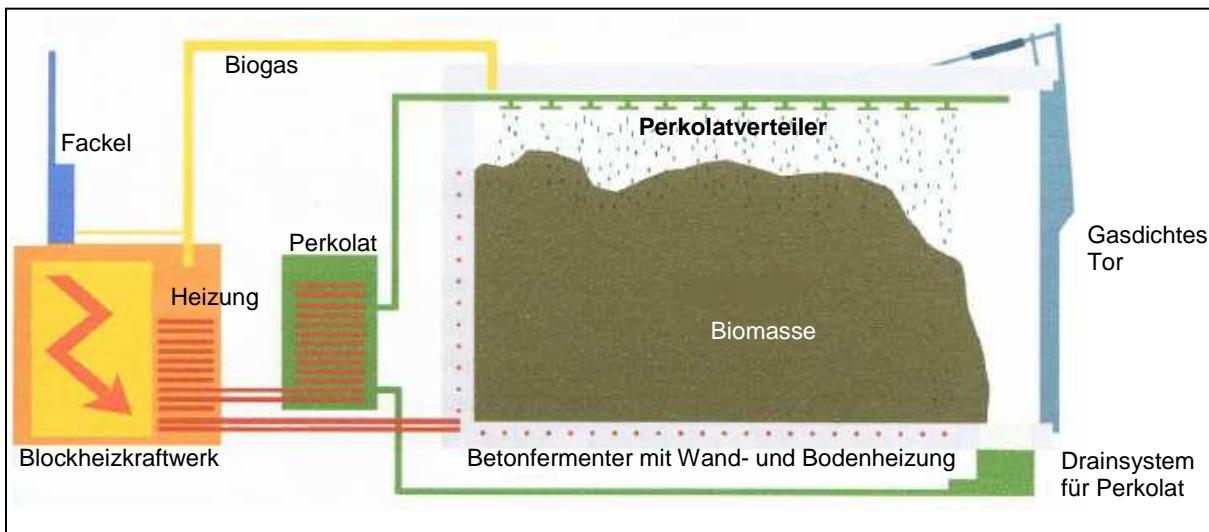


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Container- / Garagenverfahrens (BEKON)

Quelle: Universität Rostock, 2007

Das Arbeitsvolumen eines einzelnen Fermenters beträgt in der Regel maximal 150 m<sup>3</sup> (WEILAND, 2006), kann jedoch grundsätzlich beliebig dimensioniert werden. Wie in Abbildung 9 dargestellt, können die Fermenter in Containerbauweise in Reihe angelegt werden.



Abbildung 9: Trockenfermenter in Containerbauweise

Quelle: BEKON Energie Technologies

### 2.3.3 Kraft-Wärme-Kopplung

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme mittels eines Blockheizkraftwerkes (BHKW). Ein Blockheizkraftwerk ist eine

modular aufgebaute Anlage aus einem oder mehreren Verbrennungsmotoren, einem darauf abgestimmten Generator, einem Wärmetauschersystem zur Rückgewinnung der Wärmeenergie aus Abgas, einem Kühlwasser- und Schmierölkreislauf, einer hydraulischen Einrichtung zur Wärmeverteilung und einer elektrischen Schalt- und Steuereinrichtung zur Stromverteilung und zur BHKW-Steuerung (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2006).

Damit der Generator kontinuierlich elektrische Energie bereitstellen kann, die zur Netzfrequenz kompatibel ist, müssen die Motoren konstant mit einer Drehzahl von 1500 U/min laufen. Als Motoren können neben den üblichen Zündstrahl- und Gas-Otto-Motoren auch Mikrogasturbinen, Stirlingmotoren oder Brennstoffzellen eingesetzt werden (FNR, 2006). Die drei letzteren werden durch das EEG über den „Technologie-Bonus“ gefördert, da sie sich noch weitestgehend in der Entwicklungs- und Prototyp-Phase befinden.

Um die bei der Stromproduktion anfallende Wärme nutzen zu können, ist es notwendig eine Auskopplung mittels Wärmetauscher zu installieren. Wärme, die über den Kühlwasserkreislauf anfällt, kann dem Wasser über Plattenwärmetauscher entzogen werden und über einen Verteiler an die einzelnen externen Heizkreisläufe abgegeben werden. Das Abgas der Verbrennungsmotoren ist ca. 460 – 550 °C heiß und kann über Abgaswärmetauscher aus Edelstahl ausgelagert werden. Ein Rest wird als Strahlungswärme frei und bleibt meist ungenutzt (FNR, 2006). Der schematische Aufbau eines BHKW und die Abwärmequellen sind in Abbildung 10 dargestellt.

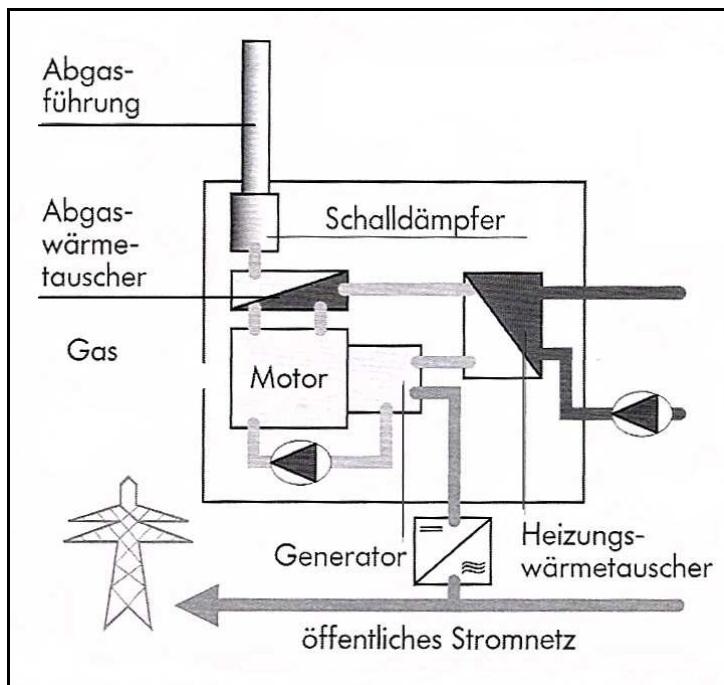


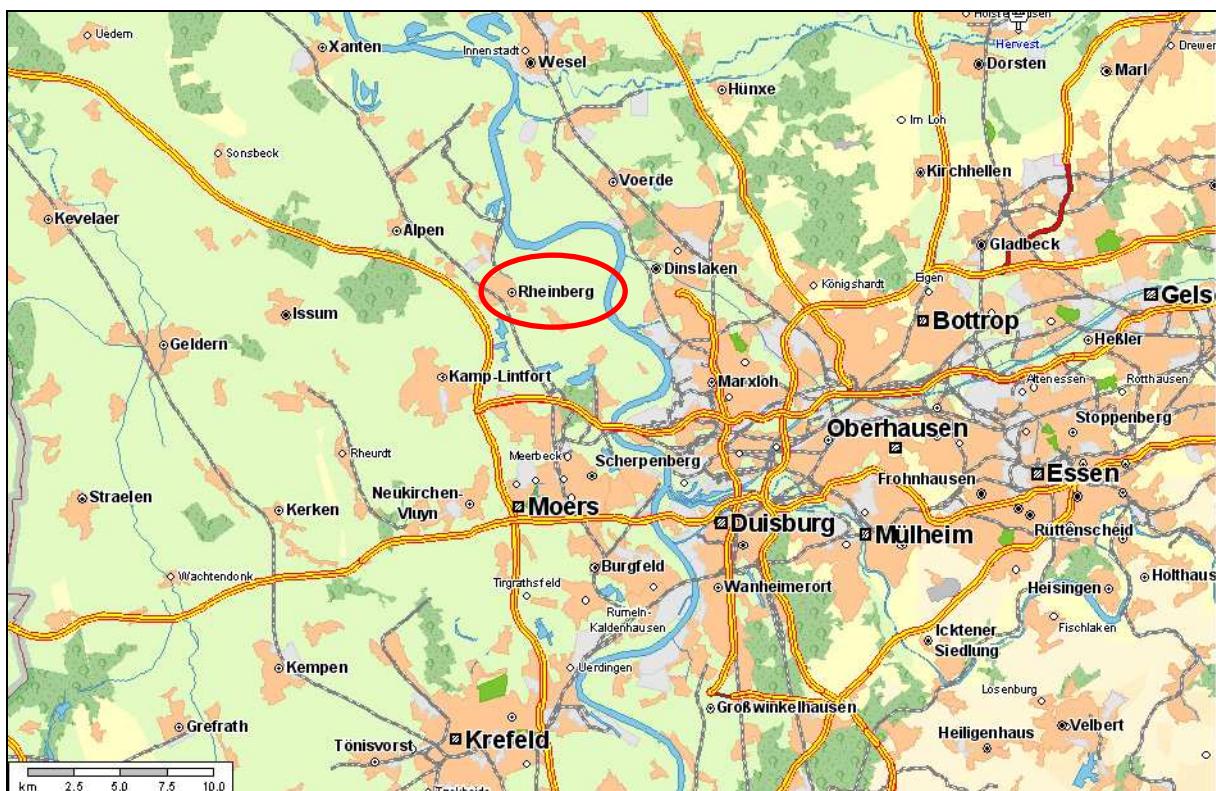
Abbildung 10: Schematischer Aufbau eines BHKW

Quelle: FNR, 2006

Der thermische Wirkungsgrad eines BHKW ist meist größer als der elektrische und erreicht je nach Motorenbauart und Grad der Wärmerückgewinnung bis zu 55 % (EDER & SCHULZ, 2006). Bei der Berechnung der extern nutzbaren thermischen Energie ist allerdings die Wärmemenge abzuziehen, die anlagenintern für die Beheizung des Fermenters sowie den Betrieb des Notkühlers benötigt wird. Der Nutzung der Motoren-Abwärme wird erst seit der Förderung durch das EEG 2004 größere Bedeutung beigemessen, da der so genannte KWK-Bonus maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage beiträgt (FNR, 2006).

### 3. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst Rheinberg, welches zum Kreis Wesel gehört und ca. 10 km südlich von Wesel und ca. 7 km westlich von Dinslaken liegt (s. Abbildung 11). Mit 51°34' nördlicher Breite und 6°36' östlicher Länge befindet sich Rheinberg am nordwestlichen Rand der Ballungsgebiete des Rheinlandes und des Ruhrgebietes. Demografisch wird die Region mit 435,7 Einwohnern / km<sup>2</sup> als ländlich dichter besiedelt eingestuft (Informationsplattform Abfall NRW (AIDA)).



**Abbildung 11: Übersichtsplan Rheinberg am Niederrhein**

Quelle: Map & Guide, Kartenerstellungs-Software

#### 3.1 Naturräumliche Gliederung und Schutzgüter von besonderer Bedeutung (Vorrang und Ausschlussgebiete)

Das Untersuchungsgebiet liegt im Landschaftsraum Niederrheinische Bucht und wird geographisch bereits dem Niederrheinischen Tiefland zugeordnet (SAHALA, 2001). Es ist in weiten Teilen durch Stromtäler und deren Stromtallandschaften gekennzeichnet. Im Nordosten und Südosten, entlang der rezenten Rheinaue sowie entlang des Rheinaltarms süd- und nördlich von Rheinberg, befinden sich großflächige Naturschutzgebiete, welche zum Teil gleichzeitig Fauna-Flora-Habitat- (FFH-) und / oder Vogelschutzgebiete sind. Vorrangiges Ziel dieser Schutzgebiete, welche

in Anlage 2 dargestellt sind, ist der Erhalt der natürlichen Auebereiche mit ihrer typischen Vegetation sowie der schlammigen, teils sandig-kiesigen Flussufer. Diese Biotope bieten vielfältige Lebensräume, vor allem für brütende und rastende Wat- und Wasservögel, Wassernähe bevorzugende Raubvögel und schilfbewohnende Arten (Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV), 2007).

Die Naturschutzgebiete von nationaler und internationaler Bedeutung sind für die konventionelle Landwirtschaft nicht, oder nur in beschränktem Umfang zulässig.

Etwa 3 km südöstlich der Deponie Rheinberg-Winterswick beginnt die Trinkwasserschutzzone III / IIIA des Trinkwasserschutzgebietes Binsheimer Feld (s. Anlage 2). Diese Zone soll vor weitreichenden Beeinträchtigungen, besonders durch schwer abbaubare chemische Verbindungen, bewahrt werden. Die konventionelle landwirtschaftliche Nutzung ist auch in diesem Bereich zugelassen. Zum Schutz des Grundwassers werden in diesem Bereich zweimal jährlich die Stickstoffgehalte in den obersten 90 cm der Bodenschicht genommen. Bei kontinuierlichen, unzulässigen Überschreitungen einer Höchstgrenze von ca. 100 kg N / ha können dadurch Schutzmaßnahmen getroffen werden (ROSEMANN, mündliche Mitteilung, 2007).

### 3.2 Klima

Das Klima in der Region ist maritim beeinflusst und zeichnet sich durch milde Winter und vergleichsweise kühle Sommer aus. Der langjährige Durchschnitt der Lufttemperatur beträgt nach Daten des Deutschen Wetterdienstes 10,2 °C und der durchschnittliche Jahresniederschlag liegt bei 783 mm (GELLERMANN, 2006).

### 3.3 Geologie

Rheinberg liegt im Bereich der Auen und Niederterrassen des Niederrheins. Seine landschaftlichen Formen wurden hauptsächlich während des Quartärs gebildet. Das Liegende der quartären Ablagerungen bilden die marin und limnisch-terrestrischen Sedimente des Tertiärs. Das Oberflächenrelief wurde während der Weichseleiszeit glazial überformt und ist mit seinen Terrassen, Stauchendmoränen, Löss- und Flugsandablagerungen sehr heterogen (SHALA, 2001).

Die Übersichtskarte zu der kleinräumigen Gliederung des Untersuchungsgebietes befindet sich in Anlage 3. Im Bereich östlich von Rheinberg, im so genannten Orsoyer Rheinbogen, ist der Untergrund durch quartäre junge Auenlehme und -kiese

des Holozäns sowie stellenweise ältere tonige bis feinsandige Auenlehme des Mittel- und Altholozän geprägt. Die Altarme des Rheins, die sich im Süden Rheinbergs (Winterswick) und nordöstlich von Lintfort erstrecken, sind durch fluviatile Ablagerungen aus Tonen und Sanden gekennzeichnet und von Auenlehmen flankiert. In den Bereichen südlich und westlich von Rheinberg um die Ortsteile Winkel, Bornheim, Millingen und Alpsray liegen alte Niederrterassensande (Fein- bis Mittelsande mit Schluff und Tonlagen) unter verschwemmten bis zu 3 m mächtigen sandigen Flugsanddecken oder 1 - 2 m mächtigen Hochflutlehmen des Spätglazials bis Holozäns.

Das Inlandeis der letzten Vereisung (Weichseleiszeit) stieß in diesem Raum bis Kamp-Lintfort und westlich von Millingen vor und hinterließ dort Endmoränenmaterial, wie zum Beispiel die Süchtelner Höhen und den Stauchwall von SchaephuySEN (s. Anlage 3). Außerdem wurden Sanderflächen aufgeschüttet, die anschließend von pleistozänen und zum Teil holozänen Flugsanden und Lössanden überdeckt wurden (STEINBERG, mündliche Mitteilung, 2007).

### 3.4 Boden

Die Böden im Untersuchungsgebiet untergliedern sich in terrestrische, semiterrestrische und anthropogene Böden. Eine Übersichtskarte der Bodentypen in der Region Rheinberg befindet sich in Anlage 4. Die anthropogenen stark veränderten Böden befinden sich in unmittelbarer Nähe zum Rhein. Es sind ehemalige Kiesabbaufächen, die mit Bergematerial des Steinkohlebergbaus oder Abraum von Sand- und Kiesgruben verfüllt sind. Da die Bereiche regelmäßig überflutet werden, stehen oberflächlich Auelehme mit Mächtigkeiten von 4 – 12 dm an (Geologisches Landesamt NRW, 1974).

Im Bereich der jüngeren und älteren holozänen Aueflächen, die sich vom Orsoyer Rheinbogen bis an die Grenzen des Stadtgebietes Rheinberg ausbreiten, liegen semiterrestrische braune Aueböden vor. Diese gehörten vor dem Deichbau zum natürlichen Überflutungsbereich des Rheins. Die Böden sind teilweise vergleyt und leisten mittlere bis hohe Erträge (Wertzahlen 65 – 80 Punkte) für die Landwirtschaft.

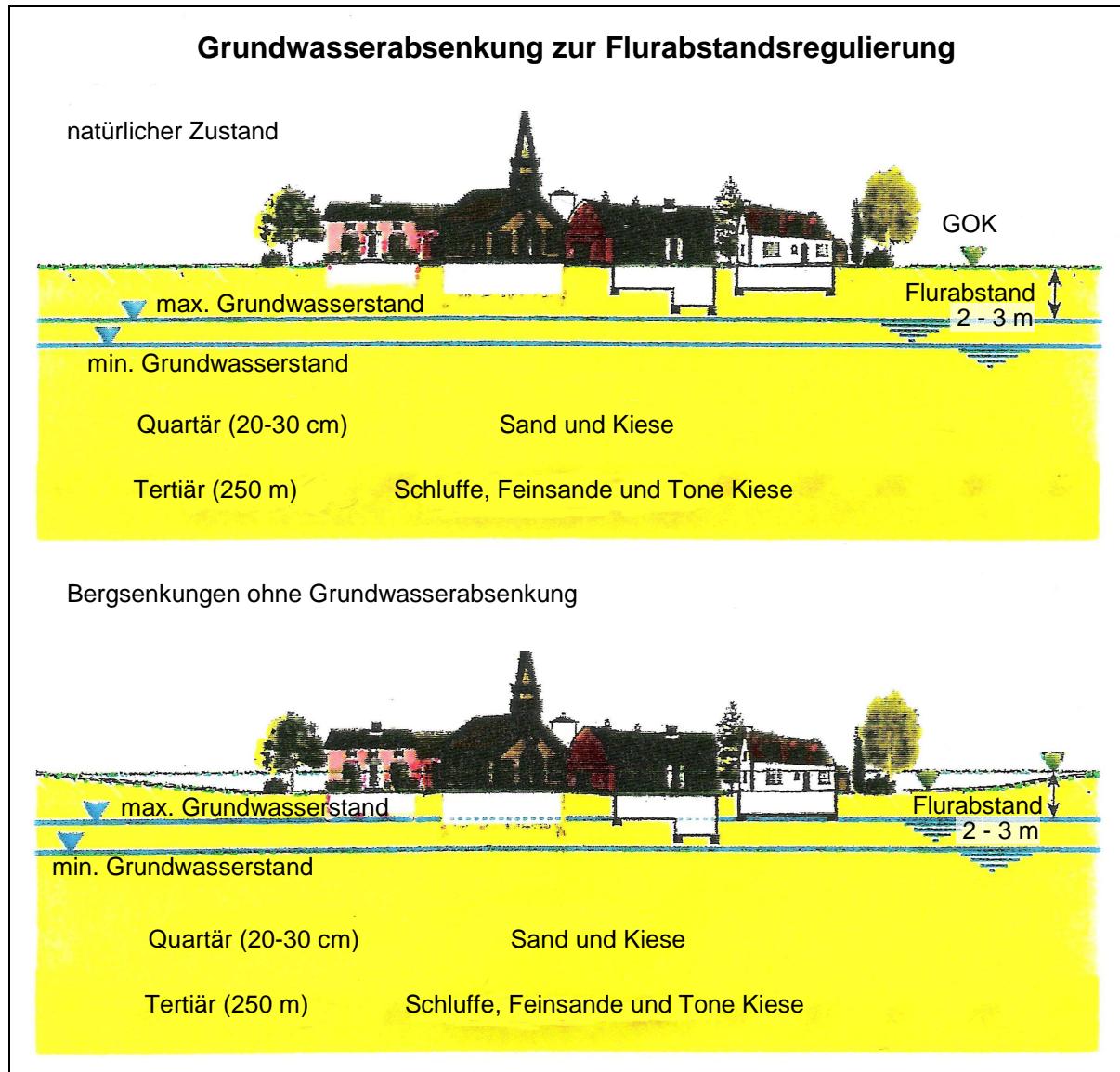
Im Rheinhinterland, welches den Rhein westlich von Rheinberg in Nordostrichtung begleitet, hat sich auf der quartären Niederterrasse ein Mosaik von Braunerden über Parabraunerden und Gley-Parabraunerden aus sandigen bis lehmigen Hochflutablagerungen sowie Flugsanden entwickelt. Die Bodenarten variieren zwischen

sandigen bis stark sandigen Lehmböden bis hin zu Feinsandböden. Die Bodenwertzahlen weisen eine Bandbreite von 30 – 70 Punkten auf (Geologisches Landesamt (GLA) NRW, 1972).

### 3.5 Hydrologie

Die natürlichen Gegebenheiten des Grundwasserleiters in dem Gebiet um Rheinberg werden durch kaltzeitliche Sedimente ab der Elster-Eiszeit gebildet. Darunter liegen mächtige marine Sedimente des Tertiärs, die wegen ihrer geringen Durchlässigkeit einen Grundwasserhemmer bilden (GELLERMANN, 2006).

Das natürliche Abflussgeschehen wird im Versorgungsgebiet der LINEG (Linksniederrheinische Entwässerungs-Genossenschaft), zu welchem auch Rheinberg gehört, seit ca. 90 Jahren bezüglich Fließrichtung und Grundwasserstände anthropogen gesteuert. Das LINEG-Gebiet erstreckt sich linksrheinisch von Xanten-Vlynen im Norden über Issum und Rheudt im Westen bis Krefeld im Norden. Die LINEG besteht aus Vertretern der Kreise, Eigentümern der Bergwerke, Unternehmen der öffentlichen Wasserversorgung und gewerblichen Unternehmen. Sie ist dafür zuständig, die Grundwasserstände im Versorgungsgebiet so zu regulieren, dass durch bergwerksbedingte Bodensenkungen und damit verringerte Grundwasserflurabstände keine Schäden an bestehender Bebauung auftreten (s. Abbildung 12). Die Grundwasserstände werden durch moderne Pumpensysteme in den Bereichen, in denen Bodensenkungen durch Bergbauaktivitäten auftreten, künstlich unter 2 – 3 m u. Geländeoberkante (GOK) gehalten (STEINBERG, 2007). Über die Fossa Eugeniana, eine in den Jahren 1626 bis 1630 angelegte Schifffahrtsverbindung zwischen Rhein und Maas, werden seit Beginn der 1920er Jahre bergbauliche Grubenwässer in Richtung Rhein entwässert.



**Abbildung 12: Natürlicher Grundwasserflurstand (oben) und Veränderung durch den Bergbau (unten)**

Quelle: Exkursionsführer der LINEG, 2007

### 3.6 Situation der Landwirtschaft

Rheinberg besitzt eine Fläche von rund 751.400 ha ([www.rheinberg.de](http://www.rheinberg.de)). In den Tabellen 2 und 3 ist eine Aufstellung der rein landwirtschaftlich genutzten Flächen und der Naturschutzflächen zu entnehmen. Die landwirtschaftlich genutzte Fläche beträgt 3.481 ha, wovon 2.384 ha Ackerfläche sind und 1.096 ha Grünland. Auf insgesamt 1.066 ha sind Naturschutzflächen ausgewiesen.

Gemäß der letzten Agrarstukturserhebung 2003 wird der Ackerbau in Rheinberg von fünf Hauptfrüchten dominiert (in der Reihenfolge der Anbauflächengröße): Winterweizen, Gerste, Grün- und Silomais, Triticale und Zuckerrüben. Dabei nimmt

die Zuckerrübe nach Angaben von Herrn Paessens (2007, persönliche Mitteilung, Landwirt und Ansprechpartner für die Landwirtschaft in Rheinberg) zurzeit stark ab, da sich der Markt für diese Frucht durch Änderungen in der Zuckerrübenordnung deutlich verschlechtert hat. Auch der Winterhaferanbau befindet sich auf dem Rückgang, wohingegen die Braugerste in den letzten Jahren verstärkt angebaut wurde. Als Zwischenfrüchte werden überwiegend Feldgras, Senf und Phacelia zur Gründüngung angebaut (PAESSEN, 2007). Insgesamt ist der landwirtschaftliche Anbau in Rheinberg im Vergleich zum Kreis Wesel überdurchschnittlich vielfältig.

**Tabelle 2: Betriebsfläche der landwirtschaftlichen Betriebe 2003 nach Hauptnutzungs- und Kulturarten in Rheinberg**

Flächennutzung	Flächengröße [ha]
Betriebsfläche insgesamt	3.893
<b>Landwirtschaftlich genutzte Flächen insgesamt</b>	<b>3.480</b>
<b>Acker</b>	<b>2.384</b>
<b>Grünland</b>	<b>1.096</b>
davon Gärten	3
davon Obstplantagen	1
davon Dauergrünland	1.092
davon Wiesen	104
davon Mähweiden	849
davon Weiden	137
davon Streuwiesen	2
Wald, Forsten, Holzungen	318
Sonstige Flächen	92

Quelle: Landwirtschaftskammer NRW

Wie in Anlage 5 zu entnehmen, befinden sich die fruchtbarsten Böden um Rheinberg angrenzend zur östlichen Grenze des Stadtgebietes bis in den Orsoyer Rheinbogen hinein. In diesen Bereichen werden Bodenwertzahlen zwischen 65 und 80 Punkten erreicht. Dort befinden sich große zusammenhängende Ackerflächen. Diese fruchtbaren Bereiche sind jedoch nicht einseitig dominiert, sondern bilden ein Mosaik aus Äckern, großen Dauergrünlandflächen und Naturschutzgebieten.

**Tabelle 3: Naturschutzflächen der Stadt Rheinberg 2007**

	Flächengröße [ha]
<b>Naturschutzflächen insgesamt</b>	<b>1.066</b>
Naturschutzgebiete	912 <sup>1)</sup>
Vertragsnaturschutzflächen	137 <sup>1)</sup>
Grünland	
Obstwiesen	
Ackerrandstreifen	
Heckenpflege	
Kompensationsflächen	17 <sup>2)</sup>

1) Herr Spickermann, ULB Kreis Wesel, 2007

2) Frau Morsch, Stadt Rheinberg, 2007

Eine Übersicht der Viehhaltungen und Veredelungsbetriebe in Rheinberg ist in Tabelle 4 dargestellt. Die Rinderhaltung ist mit 55 Betrieben vor Schweine- und Geflügelhaltung der dominierende Betriebszweig.

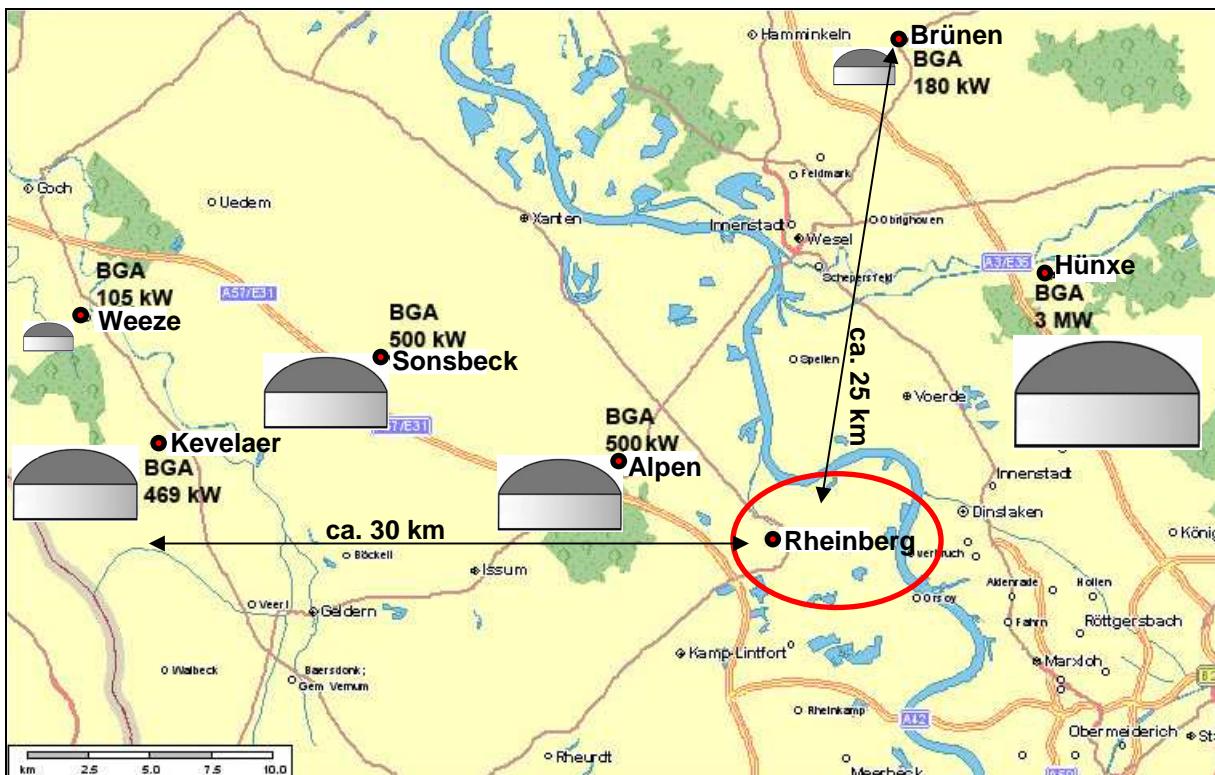
**Tabelle 4: Betriebsstrukturen der Viehhaltungsbetriebe in Rheinberg (Betriebsfläche > 5 ha)**

	Anzahl	in %
<b>Betriebe insgesamt</b>	104	100
<b>Betriebe &gt; 5 ha Landwirtschaftliche Fläche</b>	83	79,8
<b>Tierhaltungen</b>		
Rinder	55	
davon Milchkühe	25	
Mutterkühe	25	
Schweine	27	
Geflügel	20	
Pferde	32	
Schafe	5	

Quelle: Kreis Wesel, 2007 (Landschaftsplan Alpen / Rheinberg - Erläuterungen zum Vorentwurf)

### 3.7 Biogasanlagen in der Umgebung von Rheinberg

Innerhalb eines Radius von ca. 30 km um Rheinberg befinden sich sechs Biogasanlagen, die zwischen 105 kW und 3 MW Anlagenleistung variieren (s. Abbildung 13). Die Anlage in Alpen, einem Nachbarort von Rheinberg, wurde erst 2006 in Betrieb genommen und wird ausschließlich mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben.



**Abbildung 13: Übersicht der Biogasanlagen in der Umgebung von Rheinberg**

Quelle: Hintergrundkarte Map & Guide, Kartenerstellungssoftware  
Inhalt: Eigene Nachforschungen

## 4.      Methoden

### 4.1    Potentialanalyse der Region Rheinberg

#### 4.1.1    Rohstoffe für die Biogaserzeugung

Um eine umfassende Übersicht über die potentiell zur Verfügung stehenden Substrate für eine Biogaserzeugung in der Region Rheinberg zu bekommen, werden Daten über die landwirtschaftlichen Erzeugnisse, biogene Rest- und Abfallstoffe sowie anfallendes Landschaftspflegematerial für Rheinberg aus verschiedenen Quellen zusammengestellt. Quellen sind die Landwirtschaftskammer (LWK) NRW, die untere Landschaftsbehörde Kreis Wesel und die Stadtverwaltung Rheinberg. Den Substraten werden in einer Tabelle folgende relevante Parameter für die Biogaserzeugung aus der Literatur zugeordnet:

- Flächenertrag oder Jahresaufkommen
- Gehalt an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz
- Biogasertrag
- Methangehalt

#### 4.1.2    Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung

Bei einer angenommenen Auslastung der zur Verfügung stehenden 860 kW-Anlagenleistung (8.000 h/a) kann bei einem thermischen Wirkungsgrad von 56 % und einem jahresdurchschnittlichen Wärmeverbrauch von 40 % für die Beheizung des Fermenters plus 15 % Wärmeabfuhr über den Notkühler (FELLER, 2005) noch 5.096.000 kWh<sub>th</sub>/a extern genutzt werden. Für diese Wärmemenge muss in Rheinberg ein Abnehmer gefunden werden, bei dem dadurch entweder die Grundlast abgedeckt wird oder der einen ganzjährig konstanten Wärmeverbrauch in dieser Größenordnung hat.

Blockheizkraftwerke (BHKWs) sind mit der üblichen Heiztechnik voll kompatibel und leicht an einen externen Heizkreislauf anzuschließen (FNR, 2006). Als Wärmeabnehmer bzw. zur Abwärmenutzung kommen hauptsächlich drei Varianten in Frage:

- Versorgung eines zentralen Wärmeabnehmers mit Heizwasser
- Einspeisung von Heizwasser in ein Fernwärmennetz
- Nutzung der thermischen Energie zu Trocknungszwecken

Als zentrale Wärmeabnehmer kommen vorzugsweise größere soziale Einrichtungen wie Altenwohn- und -pflegeheime oder Einrichtungen mit einem hohen Wärmebedarf wie beispielsweise Schwimmbäder, Gewächshäuser oder Aquakulturen in Frage.

Die Wirtschaftlichkeit einer Heizwasserbereitstellung für eine zentrale Einrichtung oder eine Fernwärmeleitung hängt maßgeblich von der benötigten Länge der Wasserleitung ab. Die Kosten für ein Doppelrohr mit Verlegung liegen etwa zwischen 180 – 210 € / m (Mitarbeiter der EnerPipe GmbH, mündliche Mitteilung). Darum ist je nach Entfernung des Wärmeabnehmers vom Deponiegelände auch über den energietechnisch sinnvollsten Standort für das BHKW nachzudenken.

Die Nutzung der Abwärme als Prozesswärme wird aller Wahrscheinlichkeit nach ab dem EEG 2009 nur noch für industrielle Zwecke nach Maßgabe der Nummern 2 bis 6, 7.2 bis 7.34 sowie 10.1 bis 10.10, 10.20 bis 10.23 der Anlage der 4. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) zulässig sein. Diese sind:

- Abbauen und bearbeiten von Steinen und Erden, Glas, Keramik und Baustoffen
- Herstellung und Verarbeitung von Stahl, Eisen und sonstige Metallen
- Herstellung und Weiterverarbeitung von chemischen Erzeugnissen, Arzneimitteln und Weiterverarbeitung von Erdöl oder Erdölerzeugnissen in Mineralölraffinerien
- Behandlung von Oberflächen mit organischen Stoffen, Herstellung von bahnenförmigen Materialien aus Kunststoffen, sonstige Verarbeitung von Kunststoffen
- Gewinnung und Verarbeitung von Zellstoff aus Holz
- Herstellung und Verarbeitung von Nahrungs-, Genuss- und Futtermitteln sowie landwirtschaftlichen Erzeugnissen, Halten und Aufzucht von Geflügel- oder Pelztieren, Rindern und Schweinen mit bestimmten Obergrenzen
- Herstellung, Bearbeitung oder Verarbeitung von explosionsgefährlichen Stoffen, Vulkanisieren von Natur- und Synthesekautschuk, Vorbehandlung oder Färben von Stoffen

Die Recherche nach möglichen Wärmeabnehmern findet in dieser Arbeit lediglich in begrenztem Umfang statt. Sie beschränkt sich auf die Lokalisation von potentiellen Wärmeabnehmern.

#### 4.2 Erstellen einer Treibhausgasanalyse für ausgewählte Biogassubstrate anhand einer Lebenszyklusanalyse

Die Treibhausgasanalyse dient der Bilanzierung von Treibhausgasemissionen, die im Zuge des Energiebereitstellungssystems „Energie aus Biogas“ pro Einheit erzeugter, nutzbarer Energie entstehen. Im Folgenden wird auch von der Treibhausgasbilanz gesprochen. Sie wird zur Überprüfung der Einhaltung des Grenzwertes von 0,216 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen / kWh<sub>el</sub> angewandt.

Die Analyse wird mit dem Instrument der Lebenszyklusanalyse (LZA), nach der internationalen Norm ISO 14040:2006 auch Ökobilanz genannt, durchgeführt.

##### Begriffsdefinition „Lebenszyklus“:

Der Begriff „Lebenszyklus“ bezeichnet aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen eines Produktionssystems von der Rohstoffgewinnung oder -erzeugung bis zur endgültigen Beseitigung (ISO 14040:2006).

In diesem Fall ist das „Produkt“ nutzbare Energie und das „Produktionssystem“ ist die Rohstoffbereitstellung bzw. -produktion bis hin zur Umwandlung in nutzbare Energie.

Die Studie beschränkt sich auf die Bilanzierung der drei wichtigsten Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) und analysiert die Energiebereitstellung durch die ausgewählten Biogassubstrate:

- Silomais
- Zuckerrüben
- Zuckerrüben-Reste
- Gülle

Um die Treibhausgasbilanz der Energiebereitstellung aus Biogas mit anderen Energiebereitstellungssystemen vergleichbar zu machen, werden die Methan- und Distickstoffoxidemissionen anhand der Wichtungsfaktoren in Tabelle 5 in CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen / kWh<sub>el</sub> umgerechnet und zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen addiert. Die Wichtungsfaktoren spiegeln das Global Warming Potential (GWP) der Stoffe wider, welches ein Maß für die Klimawirksamkeit eines Treibhausgases ist (WEGENER et al., 2006).

**Tabelle 5: Global Warming Potential wichtiger Treibhausgase zur Quantifizierung des anthropogenen Treibhauseffektes bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren**

Global Warming Potential in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent / kg THG		
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	1
Methan	CH <sub>4</sub>	23
Distickstoffoxid	N <sub>2</sub> O	296

Quelle: SCHOLWIN et al., 2006

Die Lebenszyklusanalyse gemäß ISO 14040:2006 besteht aus einer festgelegten Vorgehensweise und wird in vier Schritten ausgeführt:

1. Zieldefinition und Untersuchungsrahmen
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Auswertung

#### 4.2.1 Zieldefinition und Untersuchungsrahmen

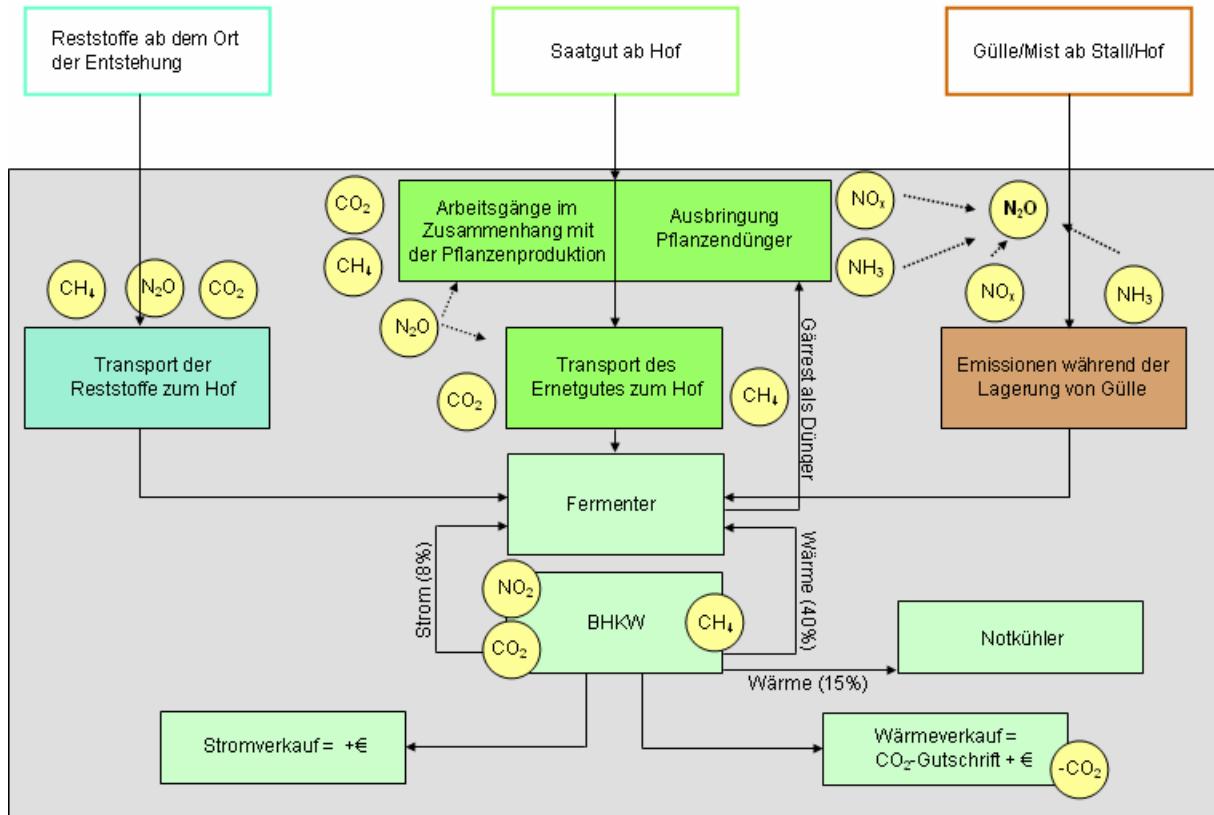
Das Ziel der Analyse ist die Überprüfung der Einhaltung des Emissions-Grenzwertes von 0,216 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen pro kWh erzeugte Energie. Die Emissionen entstehen im Zusammenhang mit der Energiebereitstellung durch Biogas am Standort Rheinberg-Winterswick.

Die Ergebnisse ermöglichen sowohl einen Vergleich verschiedener Biogassubstrate als auch mit der Energieerzeugung aus fossilen Energieträgern.

Der Untersuchungsrahmen wird von den Hauptemissionsquellen der Biogaserzeugung gebildet, die anhand von Ergebnissen aktueller Studien (SCHOLWIN & FRITSCHE, 2007, SCHOLWIN et al., 2006 und HARTMANN & KALTSCHMITT, 2001) für die Produktion und Umwandlung von Biogas erkannt wurden. Die zu bilanzierenden Hauptemissionsquellen hängen mit folgenden Aktivitäten zusammen:

- Rohstoffbereitstellung bzw. -anbau
- Transport des Biogassubstrates
- Umwandlung in elektrische und thermische Energie

In Abbildung 14 sind der Untersuchungsrahmen für die LZA und die Emissionsquellen, die in der Berechnung berücksichtigt sind, dargestellt. Das Fließschema beinhaltet zusätzlich Informationen über Stoffströme und Energieflüsse.



**Abbildung 14: Darstellung des Untersuchungsrahmens und der THG-Emissionsquellen des Energiebereitstellungssystems „Energie aus Biogas“**  
Eigene Darstellung

Die Bilanzierung von erzeugten Emissionen (kg) pro erzeugter Energieeinheit (kWh) wird zum einen für die externe Nutzung von Strom ohne Wärme und zum anderen für externe Nutzung von Strom und Wärme durchgeführt. Im Falle einer Abwärmenutzung wird eine  $\text{CO}_2$ -Gutschrift von 232 g  $\text{CO}_2$  / kWh<sub>th</sub><sup>5</sup> nutzbare Energie erteilt.

#### 4.2.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz umfasst eine modellhafte Beschreibung der anthropogenen Aktivitäten, die mit der Energiebereitstellung aus Biogas zusammenhängen und im Zuge derer die Treibhausgase  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  direkt oder indirekt entstehen. In

<sup>5</sup> Wert für eine kWh substituierte fossile Wärme durch erneuerbare Energien (BMU, 2007)

Tabelle 6 sind die ausgewählten Biogassubstrate mit den spezifischen Emissionsquellen für Treibhausgase zusammengefasst.

**Tabelle 6: Repräsentative Substrate für die Lebenszyklusanalyse**

Substrat	Spezifische Emissionsquelle für Treibhausgase				
	Feldbearbeitung	Düngung	Lagerung	Transport (der Ernte bzw. der Reststoffe)	Abgase des BHKW
<b>Kategorie Energiepflanzen</b>					
Silomais	X	X		X	X
Zuckerrüben	X	X		X	X
<b>Kategorie Landwirtschaftliche Reststoffe</b>					
Zuckerrüben-Reststoffe				X	X
Gülle			X	X	X

Die Annahmewerte, die der Berechnung der THG-Emissionen durch die anthropogenen Aktivitäten zugrunde liegen, sind in Anlage 2 aufgeführt. Die anthropogenen Aktivitäten, bei denen Treibhausgase freigesetzt werden, werden in Kapitel 4.2.2.1 erläutert.

#### 4.2.2.1 Anbau von nachwachsenden Rohstoffen

Die Emissionsquelle „Anbau von nachwachsenden Rohstoffen“ umfasst die Saatbettvorbereitung, die Einsaat, das Ausbringen des Düngers inklusive die vorherige Lagerung von Gülle als Wirtschaftsdünger und die Ernte der Feldfrucht. Bei den meisten dieser Arbeitsschritte sind landwirtschaftliche Maschinen im Einsatz, für die ein bestimmter Dieselverbrauch angesetzt wird.

Der Dieselverbrauch ist abhängig von der Größe der landwirtschaftlichen Fläche und den Bodeneigenschaften der Anbaufläche. Die Flächengröße für den Anbau von Energiepflanzen wird auf 100 ha festgesetzt, der sandig-lehmige Boden im Niederrheinischen Tiefland kann als mittelschwer eingestuft werden. Der angenommene pro-hektar-Dieselverbrauch für den Anbau der Energiepflanzen ist der Datensammlung des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (ECKEL et al., 2006) entnommen.

Für die Summe des Diesel-Verbrauches in Liter werden nach Tabelle 7 entsprechende CO<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen berechnet. Die Datengrundlage hierfür bildet eine Studie von Borken, Patyk und Reinhardt (1999) (in: KALINSKI, 2003), in der Untersuchungen zur exakten Erfassung der Schadgasemissionen durch den Landwirtschaftssektor durchgeführt wurden.

**Tabelle 7: Schadgasemissionen der Vorkettenenergie und des Endenergiegehaltes von Diesel in g / l Diesel**

CO <sub>2</sub> g / l Diesel	CH <sub>4</sub> g / l Diesel	N <sub>2</sub> O g / l
2930	0,610	0,284

Quelle: KALINSKI, 2003

Durch den Düngereinsatz beim Anbau von Energiepflanzen entstehen THG-Emissionen in Form von Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O). Der Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-Bericht) 2006 unterteilt die N<sub>2</sub>O-Emissionen aus der Landwirtschaft in *direkte* und *indirekte* Emissionen. Beide entstehen durch biogene Umwandlungsprozesse (Nitrifikation und Denitrifikation) von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) im Boden. *Direkte* Emissionen entstehen aus dem Anteil des direkt auf die Flächen ausgebrachten stickstoffhaltigen Düngers, der im Boden versickert. Der IPCC-Bericht (Kapitel 11.2.1) geht davon aus, dass 1% des gesamten ausgebrachten Stickstoffs im Boden durch biogene Prozesse in N<sub>2</sub>O umgewandelt wird, welches anschließend in die Atmosphäre ent gast.

Die *indirekten* Emissionen entstehen durch den Prozentsatz an NH<sub>3</sub> und NO<sub>x</sub>, der sich während der Lagerung und Ausbringung von Pflanzendünger verflüchtigt und erst nach der Redeposition im Boden zu N<sub>2</sub>O umgewandelt wird. Es wird angenommen, dass bei organischem Dünger (Wirtschaftsdünger) 20% und bei synthetischem Dünger 10% des Gesamtstickstoffs während der Lagerung und Ausbringung entweichen. Diese werden wiederum zu 1% im Boden zu N<sub>2</sub>O umgewandelt (IPCC, 2006).

Die Emissionen, die durch die Stickstoffdüngung entstehen, werden auf der Grundlage des spezifischen Stickstoffentzuges einer Pflanze berechnet. Hierzu müssen die spezifischen Nährstoffansprüche der Pflanze und die Bodenbeschaffenheit der Anbauregion ermittelt werden. Beispielsweise kann für Silomais in NRW auf guten Böden ein Ertrag von 65 t / ha erzielt werden. Daraus resultiert ein spezifischer Stickstoffentzug von ca. 260 kg N / ha (Deutsches Maiskomitee e.V.,

2007). Laut § 4 Abs. 3 Düngeverordnung (DüV) dürfen 170 kg N / ha aus Wirtschaftsdünger stammen, der Rest muss durch mineralischen Dünger zugesetzt werden. Um eine Überdüngung zu vermeiden, sind bei der Berechnung der Düngegaben auch die Stickstoffreste aus der Vorfrucht und das Nachlieferungsvermögen des Bodens zu berücksichtigen. In dem etwa 3 km südöstlich der Deponie Rheinberg-Winterswick gelegenen Wasserschutzgebiet Binsheimer Feld werden jährlich die  $N_{min}$ -Werte (in mineralisierter Form vorliegender Stickstoff im Boden) gemessen. Die Messungen werden für die Tiefenbereiche 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und 60 – 90 cm durchgeführt. Im Mittel liegen die Werte dort bei etwa 80 kg N / ha von 0 bis 90 cm (Daten durch Herrn ROSEMANN bereitgestellt, LWK NRW 2007). Zur Vereinfachung der Rechnung und da keine genauen Werte für Rheinberg allgemein vorliegen, wird die Menge an Stickstoffdünger, die für eine Energiepflanze ausgebracht werden muss, nur über den spezifischen Stickstoffentzug einer Pflanze berechnet. Bei der Auswertung der Ergebnisse muss dies jedoch beachtet werden.

#### 4.2.2.2 Transport

Die Grundlagendaten des Dieselverbrauchs durch den Erntetransport von nachwachsenden Rohstoffen bzw. Transport von organischen Reststoffen umfassen die angenommene Transportdistanz, die pflanzenspezifische Schütteldichte, das Volumen des Ernteanhängers sowie die Leistung, die Geschwindigkeit und den Dieselverbrauch der Zugmaschine pro km. Die Tabellen mit den Annahmewerten befinden sich in Anlage 6.

#### 4.2.2.3 Anlagenbetrieb

Neben den „normalen“ Emissionen während der Lagerung und Ausbringung von Gülle kann sich das Emissionsverhalten der Gülle vor und nach der Fermentation deutlich unterscheiden.

Untersuchungen zu einem veränderten Methan-Emissionsverhalten von unvergorener zu vergorener Gülle kommen zum Teil zu gegensätzlichen Ergebnissen. In einer Studie von EDELMANN et al.. (2001) wird die These vertreten, dass die vergorene Gülle während der Lagerung höhere Methan-Emissionen verursacht als die unvergoren gelagerte Gülle. Als Gründe hierfür werden höhere Temperaturen in der Biogasgülle und die Tatsache, dass die Biogasgülle optimal mit anaeroben Bakterien angeimpft ist, angeführt. Eine Emissionsminderung kann laut EDELMANN jedoch erreicht werden, wenn derendlagerbehälter abgedeckt wird und

die Gase aus der Nachgärung aufgefangen werden. Der Einsatz eines so genannten Nachgärters als zweiten Fermenter und zur Trennung der Prozessstufen wird heute bei der Nassfermentation ohnehin meist praktiziert (EDER & SCHULZ). Die Studien von AMON et al.. (2002) und WULF (2003) kommen zu dem Ergebnis, dass durch den Fermentationsprozess in der Regel eine Verminderung von CH<sub>4</sub>-Emissionen bei der vergorenen Gülle bewirkt wird. Die Verminderung wird mit dem Abbau von organischer Trockensubstanz um ca. 24 - 80 % während des Fermentationsprozesses erklärt, wodurch den Bakterienkulturen der Reaktionsbaustein Kohlenstoff zur Methanerzeugung nicht mehr in vollem Umfang zur Verfügung steht. Eine Ausnahme bildet die Fermentation mit sehr kurzer Verweildauer. Das Substrat ist durch eine kurze Fermentationsphase optimal mit Methanbildnern angeimpft, ohne jedoch ausgeregnet zu sein und emittiert folglich außerhalb des Reaktors mehr CH<sub>4</sub> als bei unbehandelter Gülle (CLEMENS et al., 2002). Für Rindergülle wird daher eine Mindestverweilzeit von 28 - 35 Tagen, für Schweinegülle > 25 Tage und für Kofermente 41 - 44 Tage bzw. Kleegras 45 - 47 Tage Verweilzeit im Fermenter empfohlen (FNR, 2006).

Bezüglich der Berechnung der Emissionen in der Lebenszyklusanalyse werden die Angaben nach EDELMANN (2001) für die Variante eines Fermenters mit nachgeschaltetem Nachgärtner zugrunde gelegt. Dadurch wird ein CH<sub>4</sub>-Minderungspotential von 4,05 kg / (m<sup>3</sup> Fermenter • a) bewirkt.

CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in der gelagerten Gülle durch den Abbau organischer Substanzen entstehen, bleiben in der Lebenszyklusanalyse ebenfalls unberücksichtigt, da das CO<sub>2</sub>, welches dem Gärsubstrat entweicht, während der Wachstumsphase der Pflanzen aus der Atmosphäre aufgenommen wurde.

Eine deutliche Zunahme der Emissionen ist demgegenüber bei Ammoniak zu verzeichnen. Durch den Anstieg des pH-Wertes während des Fermentationsprozesses kommt es zu einer Verschiebung des Gleichgewichtes von Ammonium und Ammoniak hin zum Ammoniak. Bei einem pH-Wert von 7 liegt das Ammonium-Ammoniak-Verhältnis etwa bei 99 : 1. Ein pH-Wert-Anstieg auf pH = 9 verändert das Verhältnis auf 70 : 30 (EDER & SCHULZ). Es besteht dabei ein großer Zusammenhang mit der Temperatur. Wie Untersuchungen von Amon et al.. (2002) zeigen, können die NH<sub>3</sub>-Emmissionen von vergorener Gülle im Sommer (223 g / m<sup>3</sup>) um mehr als das Dreifache höher liegen als im Winter (62 g / m<sup>3</sup>). Andere

Untersuchungen weisen wiederum verminderte Emissionswerte von vergorener Gülle nach. Für die Berechnung im Rahmen der LZA werden für die Fermentation von Gülle Mehremissionen von 2,21 kg Mehremissionen / (m<sup>3</sup> Fermenter • a) gegenüber unvergoren gelagerter Gülle nach EDELMANN et al.. (2001) angenommen.

Die Treibhausgasemissionen, die durch die Verstromung des Biogases im Blockheizkraftwerk entstehen, betreffen die Gase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und NO<sub>x</sub>. Diese entstehen bei dem Umwandlungsprozess des Biogases in Strom und Wärme mittels eines Gas-Otto- oder eines Zündstrahl-Motors. Die spezifischen Emissionswerte, die in Tabelle 8 dargestellt sind, stammen aus einer Studie des Institutes für Energetik und Umwelt gGmbH, in der eine ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen durchgeführt wurde.

**Tabelle 8: Unterstellte THG-Emissionswerte für die Verbrennung von Biogas im Gas-Otto- und -Zündstrahl BHKW**

	g / kg Biogas
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Gas-Otto-BHKW	CH <sub>4</sub> : 0,07 NOx: 0,53
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Zündstrahl-BHKW (Emissionen des Zündöls sowie aus dem Biogases)	CO <sub>2</sub> **: 155 CH <sub>4</sub> : 0,056 NOx: 1,15

\*\* Der Emissions-Wert für CO<sub>2</sub> bezieht sich nur auf die Emissionen des Zündöl des BHKW, die Emissionen aus dem Biogas bleiben unberücksichtigt

Quelle: SCHOLWIN et al., 2006.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen aus den BHKW-Abgasen werden in der Lebenszyklusanalyse zu *indirekten* N<sub>2</sub>O-Emissionen, nach Maßgaben des IPCC-Berichtes 2006, umgerechnet. Nach der Redeposition wird davon ausgegangen, dass 1 % des Gesamtstickstoffs im Boden zu N<sub>2</sub>O umgewandelt wird.

#### 4.2.3 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung beinhaltet die Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren oder Modellen, die eine Klassifizierung der Ergebnisse zulassen (MARHEINEKE, 2002). In dieser Studie werden die Ergebnisse auf die Einhaltung des Grenzwertes für Treibhausgas-Emissionen durch Bioenergieerzeugung überprüft. Da die Anzahl der analysierten Substrate zu gering ist, um eine Klassifizierung durchzuführen, werden die Ergebnisse nur den Emissionswerten der

Energieerzeugung aus fossilen Energiequellen als Bewertungsgrundlage gegenübergestellt.

#### 4.2.4 Auswertung

Die Auswertungsphase der Lebenszyklusanalyse dient der Ableitung von Schlussfolgerungen bezüglich der Emissionsquellen, zum Vergleich der analysierten Biogassubstrate untereinander sowie zum Vergleich mit der Erzeugung von nutzbarer Energie aus fossilen Energieträgern (s. Kapitel 6).

## **5. Ergebnisse**

### 5.1 Potentiell verfügbare Rohstoffe für die Biogaserzeugung

#### 5.1.1 Nachwachsende Rohstoffe

In Tabelle 9 sind die landwirtschaftlichen Erzeugnisse im Gebiet Rheinberg dargestellt, die sich mit Bezug auf ihre energetischen Eigenschaften grundsätzlich für die Vergärung in einer Biogasanlage eignen. Von besonderem Interesse ist neben der energetischen Eignung der Substrate vor allem auch der Kosten-Nutzen-Vorteil der Stromerzeugung gegenüber dem Verkauf am Agrarmarkt.

**Tabelle 9: Für die Vergärung relevante Feldfrüchte in Rheinberg und ihr Flächenertrag sowie der potentielle Biogasertrag**

Fruchtart	Anbaufläche [ha] <sup>1)</sup>	mittlerer Ertrag [t FM/ha] <sup>2)</sup>	Biogasertrag [m <sup>3</sup> /t FM] <sup>2)</sup>	potentieller Methanertrag [m <sup>3</sup> ] <sup>3)</sup>	typische Reststoffe	mittlerer Ertrag [tFM/ha] <sup>2)</sup>	potentieller Methanertrag [m <sup>3</sup> ] <sup>3)</sup>
<b>Brotgetreidearten insgesamt</b>	<b>593</b>						
Winterweizen	497						
Körner		5,9 - 10	597*	<b>1.171.140</b>	Stroh	7-11	<b>529.380</b>
GPS		50	171**	<b>1.802.210</b>	-		
Roggen (Korn)	52	4,5 - 6	597*	<b>68.950</b>	Stroh	ca. 7	<b>43.044</b>
GPS		40	171**	<b>188.520</b>	-		
<b>Futtergetreide insgesamt</b>	<b>628</b>						
Gerste insgesamt	351						
Körner		5,63 <sup>4)</sup>	597*	<b>625.240</b>	Stroh	6	<b>249.190</b>
GPS		30	171**	<b>936.310</b>	-		
Wintergerste	267						
Sommergerste	84						
Hafer	68	k.A.					
Triticale	210						
Korn		3,8 - 7		<b>358.800</b>	Stroh	ca. 7	<b>173.900</b>
GPS		36	171**	<b>672.260</b>	-		
<b>Hackfrüchte insgesamt</b>	<b>205</b>						
Speiskartoffeln	62	25 - 75	134 <sup>5)</sup>	<b>216.000</b>			
Zuckerrüben	168	70***	170 - 180 <sup>5)</sup>	<b>1.090.740</b>	Blätter, frisch	ca. 24-42	<b>317.520</b>
<b>Futterpflanzen insgesamt</b>	<b>402</b>						
Grasanbau auf dem Ackerland (zum Abmähen oder Abweiden)	84	35	172	<b>272.700</b>			
Grünmais, Silomais	315	45-55	202	<b>1.473.680</b>			
<b>Dauergrünland</b>	<b>953</b>						
Wiesen	104	20-34	172	<b>289.760</b>			
Mähweiden	849	20	172	<b>1.577.070</b>			
Total				<b>10.743.380</b>			<b>1.313.030</b>

1) LWK NRW, 2007 (Stand der Daten: letzte Agrarstrukturerhebung 2003)

2) ECKEL et al.. (2006)

3) Errechnet nach Tabellen in Anlage 7

4) Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik NRW, 2007

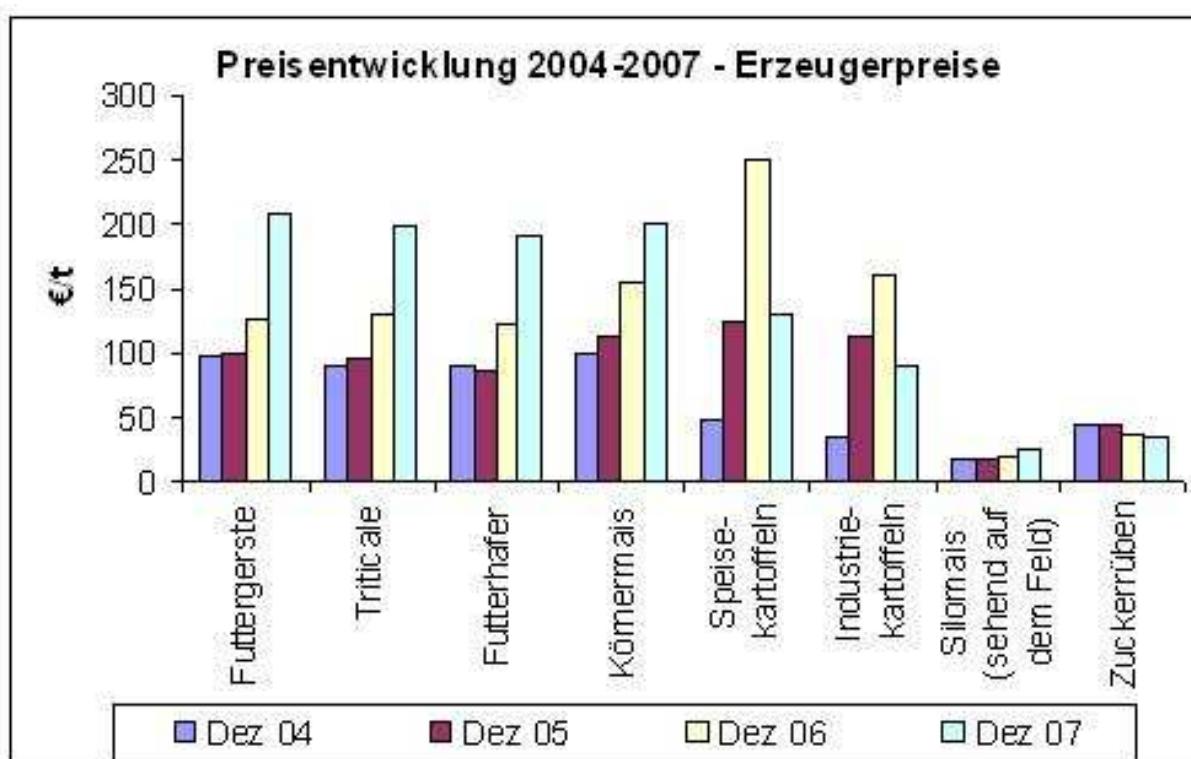
5) FNR, 2006

\* Mittelwert für Körnertrag

\*\*Mittelwert für Getreide-GPS

\*\*\* höchsten Ertrag für gute Böden am Niederrhein eingesetzt

Die Entwicklung der Erzeugerpreise von landwirtschaftlichen Produkten ist in Abbildungen 15 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Erzeugerpreise bei den meisten landwirtschaftlichen Anbauprodukten in den letzten Jahren zum Teil stark angestiegen sind. Lediglich bei Kartoffeln und Zuckerrüben sind die Erlöse im Jahr 2007 gesunken.



**Abbildung 15: Erzeugerpreise ausgewählter Feldfrüchte für NRW**

\*\* Angabe für Silomais beziehen sich auf die Tonne Mais stehend auf dem Feld  
Quelle: LWK NRW

Die dargestellte Preisentwicklung von Silomais beruht auf Angaben der LWK NRW. 24 € / t Mais „stehend auf dem Feld“ entsprechen bei einem Flächenertrag von ca. 60 t / ha 1.440 € / ha. Eigenen Recherchen zufolge lag der Wert 2007 sogar bei maximal 30 € / t.

Die Preisentwicklung der Zuckerrübe ist auf konkrete Änderungen an der EU-Zuckermarktordnung zurückzuführen. Nach der neuen Gesetzgebung sollen die Zuckerrübenpreise bis 2009 in vier Schritten um insgesamt 40 % abgesenkt werden. Dadurch verliert der Zuckerrübenanbau einen Markterlös von über 1.000 € pro ha, so dass die Rentabilität neu bewertet werden muss (HÖLZMANN, 2006).

Die Attraktivität der Rübenvergärung wird somit größer, während die Wirtschaftlichkeit anderer Energiepflanzen für die Biogaserzeugung stark sinkt.

Für die Wirtschaftlichkeit eines Betriebes ist es zentral, dass die angebaute Energiepflanze einen ähnlichen Gewinn erwirtschaftet wie die Konkurrenzfrüchte am spezifischen Standort. Im Falle von guten Böden am Niederrhein ist die Feldfrucht mit der es zu konkurrieren gilt, der Winterweizen. Auf diesen Böden besteht beim Winterweizen eine hohe Ertragssicherheit bei guter Winterhärte (LWK NRW, 2007 / 1).

Für die Entwicklung einer Energiepflanzen-Fruchtfolge sind aus ökologischer Sicht folgende Kriterien entscheidend:

- Erhalt möglichst großer biologische Diversität
- Schonung des Bodenhaushaltes

Für eine möglichst hohe biologische Diversität und die Gesunderhaltung des Bodens ist es wichtig, verschiedene Pflanzenfamilien und Wurzelsysteme in der Fruchtfolge zu kombiniert (KLÖBLE, 2007). Auch die ganzjährige Bodenbedeckung und der sparsame Umgang mit Pestiziden trägt dazu bei, den Boden in einem gesunden Gleichgewicht gehalten.

Die folgenden Energiepflanzen-Nahrungsmittelpflanzen-Fruchtfolgen (s. Tabelle 10 und 11) können für einen Biogasanlagenbetrieb angebaut werden.

**Tabelle 10: Dreigliedrige Fruchfolge aus Energiepflanzen und Pflanzen für den Verkauf**

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	
	Silomais	Winterweizen	Feldgras-Zwischenfrucht	Feldgras (oder Wiesengras)
Verwendung	Biogas	Verkauf	Biogas / Viehfutter	Biogas
Produktionskosten <sup>1)</sup> [€ / ha]	1.530	1.020	-	1.560*
Erzeugerpreise <sup>2)</sup> [€ / ha]	1.560 - 2.000**	8.000	-	-
Erlös durch Stromverkauf <sup>3)</sup> [€ / ha]	3.000	2.100	860	1.760
Ertrag [t FM / ha]	65 <sup>6)</sup>	50*** <sup>1)</sup>	20 <sup>1</sup> Schnitt	40 <sup>1)</sup>
Biogasertrag**** [m <sup>3</sup> / ha]	12.100 <sup>4)</sup>	8.500	3.400	6.800
Methanertrag <sup>5)</sup> [m <sup>3</sup> / ha]	6.300	4.400	1.800	3.700
kWh <sub>el</sub> / ha*****	19.600	13.700	5.600	11.550

1) ECKEL et al., 2006

2) Daten der Landwirtschaftskammer NRW für Dezember 2007

3) Errechnet, basierend auf der Grundvergütung + NaWaRo-Bonus für eine 500 kW Anlage (15,32 ct / kWh<sub>el</sub>)

4) FNR, 2006

5) Errechnet nach Literaturwerten in Anlage 7

6) ECKEL et al., 2006, höchstes Ertragsniveau für gute Böden am Niederrhein eingesetzt

\* Vier Schnitte im Hauptnutzungsjahr

\*\* Preis für Mais stehend auf dem Feld / im Jahr 2007 30 € / ha (korrigierter Preis)

\*\*\* Ertrag bezogen auf GPS

\*\*\*\* ohne Abzug der Silierverluste

\*\*\*\*\* errechnet, bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 34% und einem Eigenbedarf von 8%, ohne Abzug von Lager- und Silierverlusten

Mais ist eine optimale Vorfrucht für Getreidepflanzen, da er eine „Gesundungsfrucht“ hinsichtlich Getreidefuß- und Halmbruchkrankheiten sowie Schwarzbeinigkeit darstellt (MEINERT & MITTNACHT 1992). Die Ernte findet bei Silomais Ende Oktober statt und wird von der Aussaat des Winterweizens gefolgt. Dadurch ist der Boden über den Winter vor Erosion und Auswaschung geschützt. Der Winterweizen hat in der Anfangsphase ein sehr schnelles Wurzelwachstum und ein insgesamt hohes Nährstoffaneignungsvermögen (CLASSEN, 1993). Ein Austrag von Nährstoffen in das Grundwasser kann somit weitestgehend unterbunden werden. Direkt nach der Ernte des Winterweizens wird ein einjähriges oder zweijähriges ertragsreiches Feldgras als

---

Zwischenfrucht eingesät, welches im Mai bereits das erste Mal gemäht werden kann. Das Feldgras kann entweder als Zwischenfrucht vor Getreide stehen oder bis zum nächsten Jahr stehen bleiben. Als Zwischenfrucht würde nur ein Schnitt Anfang / Mitte Mai, als Hauptfrucht vier Schnitte über das gesamte Jahr, geerntet werden. Im Anschluss folgt wieder der Silomais.

Eine alternative, fünfgliedrige Fruchtfolge ist in Tabelle 11 dargestellt. Da die Zuckerrübe bei zu hohem Anteil an der Fruchtfolge sehr anfällig für Pflanzenkrankheiten ist, sollte sie auch unter guten Standortbedingungen nicht öfter als alle 4 Jahre angepflanzt werden (CLAASSEN, 1993). Durch den Anbau von Wintergetreide nach Zuckerrüben kann der Stickstoff, der bei der Rübenernte durch die intensive Bodendurchmischung vermehrt freigesetzt wird, optimal ausgenutzt werden. Der Anbau von Winterweizen zwischen Silomais und Zuckerrüben dient als Gesundungsmaßnahme, da Mais eine schlechte Vorfrucht für die Zuckerrübe ist. Dies liegt an der extremen Anfälligkeit von Zuckerrüben gegenüber Pflanzen-Nematoden (wie z. B. Stengelälchen), welche den Mais bei kühl-feuchter Witterung in den ersten zwei Monaten nach der Saat und darauf folgendem, kühlem Sommer ebenfalls leicht befallen können (MEINERT & MITTNACHT, 1992).

**Tabelle 11: Fünfgliedrige Fruchfolge aus Energiepflanzen und Pflanzen für den Verkauf**

	1. Jahr Zucker- rüben	2. Jahr Winter- weizen	3. Jahr Feldgras- Zwischenfrucht	4. Jahr Feldgras (oder Wiesengras)	5. Jahr Silomais	Winter- weizen
Verwendung	Verkauf/ Biogas	Verkauf	Viehfutter/ Biogas	Biogas	Biogas	Verkauf
Produktionskosten <sup>1)</sup> [€ / ha]	2.608	1.020	-	1.562*	1.530	1.020
Erzeugerpreise <sup>2)</sup> [€ / ha]	2.415	8.000	-	-	1.560- 2.000**	8.000
Erlös durch Stromverkauf <sup>3)</sup> [€ / ha]	3.000	2.100	960	1.760	3.000	1.760
Ertrag <sup>1)</sup> [t FM / ha]	70 <sup>6)</sup>	50***	20 <sup>1</sup> Schnitt	40	60 <sup>6)</sup>	40***
Biogasertrag <sup>5)****</sup> [m <sup>3</sup> / ha]	12.200	8.500	3.400	6.800	12.100	6.800 <sup>1)</sup>
Methanertrag <sup>1)</sup> [m <sup>3</sup> / ha]	6.500	4.400	1.800	3.700	6.300	3.700
kWh <sub>el</sub> / ha *****	20.100	13.700	5.600	11.550	19.600	11.500

1) ECKEL et al., 2006

2) Landwirtschaftskammer NRW, Stand Dezember 2007

3) Errechnet, basierend auf der Grundvergütung + NaWaRo-Bonus für eine 500 kW Anlage

4) FNR, 2006

5) Errechnet nach Anlage 7

6) ECKEL et al., 2006, höchstes Ertragsniveau für gute Böden am Niederrhein eingesetzt

7) FNR, 2006

\* Vier Schnitte im Hauptnutzungsjahr

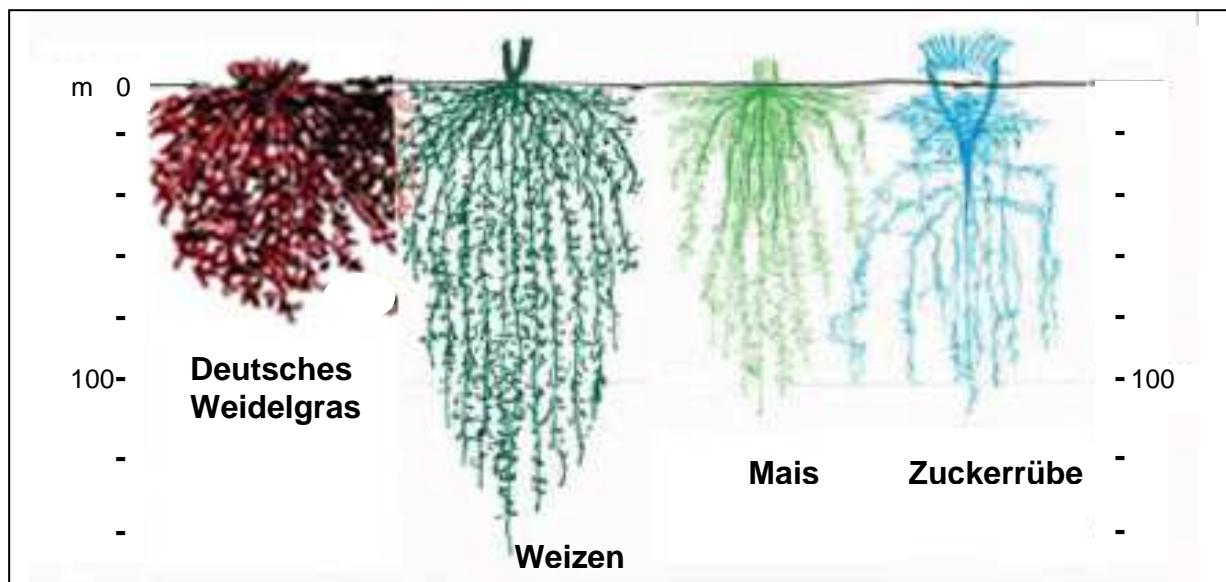
\*\* Preis für Mais stehend auf dem Feld / 30 € / t für das Jahr 2007 (korrigierter Preis)

\*\*\* Ertrag bezogen auf GPS

\*\*\*\* ohne Abzug der Silierverluste

\*\*\*\*\* Errechnet, bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 34% und einem Eigenbedarf von 8%, ohne Abzug von Lager- und Silierverlusten

Die verschiedenen Wurzelsysteme, die in diese beiden Fruchfolgen integriert sind, sind in Abbildung 16 dargestellt. Weizen besitzt mit bis zu 1,5 m die größte vertikale Wurzelausdehnung. Das Deutsche Weidelgras, welches hohe Erträge bei einer einjährigen intensiven Schnitt-Nutzung produziert, hat im Gegensatz dazu ein kompaktes, dichtes Wurzelwerk, das bis zu 90 cm tief reicht.



**Abbildung 16: Verschiedene Wurzelsysteme innerhalb der vorgeschlagenen Energiepflanzen Marktfrucht-Fruchtfolge**  
Quelle: PELLMEYER, 2007.

Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen sollte, wenn möglich, als Konservat, das heißt in Verbindung mit Wirtschaftsdünger, stattfinden. Durch die guten Puffereigenschaften von Gülle wird die Prozessstabilität erhöht, während gleichzeitig der Methanertrag steigt. Als Wirtschaftsdünger werden organische Substanzen bezeichnet, die in der Landwirtschaft anfallen und zur Düngung eingesetzt werden. In Bezug auf Gärsubstrate wird damit in der Regel Gülle gemeint. Wie in Tabelle 12 dargestellt, fallen sowohl in Rheinberg, als auch in dem benachbarten Ort Alpen (ca. 5 km Entfernung) jedes Jahr größere Mengen Wirtschaftsdünger an. Je nach den Betriebsstrukturen und der aktuellen Verwertung des Wirtschaftsdüngers kommt dieser als Gärsubstrat in Frage.

**Tabelle 12: Viehbesatz in Rheinberg und Alpen nach Großviecheinheiten und durchschnittliche jährliche Biogaserträge der Gülle bzw. des Kotes**

Tierart	n Tiere entspr. 1 GVe <sup>1)</sup>	mittlerer Biogas- ertrag <sup>2)</sup> [m <sup>3</sup> /GVe•a]	Methan- gehalt <sup>3)</sup> [%]	Rheinberg [n] <sup>4)</sup>	mittlerer Biogas- ertrag <sup>5)</sup> [m <sup>3</sup> /a]	Alpen [n] <sup>4)</sup>	mittlerer Biogas- ertrag <sup>5)</sup> [m <sup>3</sup> /a]
<b>Legehennen</b>		1.368	65				
Legehennen insgesamt (6 Monate und darüber)	0,0044			3.432	20.700	111.615	671.800
<b>Legehennen insgesamt</b>				3.383	<b>20.700</b>	111.399	<b>671.800</b>
<b>Schweine</b>		321	60				
Ferkel unter 20 kg	0,02			2.068	13.300	2.480	15.900
Jungscheine 20 bis unter 50 kg	0,06			1.405	27.000	1.790	34.500
Mastschweine Schweine ab 50 kg	0,16			1.696	87.100	4.052	208.100
Zuchtsauen ab 50 kg	0,3			708	68.200	774	74.500
Zuchteber	0,3			12	1.150	13	1.250
<b>Schweine insgesamt</b>				5.889	<b>196.750</b>	9.109	<b>334.250</b>
<b>Rinder</b>		402	55				
Kälber bis unter ½ oder unter 220 kg	0,3			509	61.400	783	94.400
Jungrinder über 6 Monate bis 1 Jahr	0,3			466	56.200	772	93.100
Rinder 1 bis 2 Jahre	0,7			807	227.100	715	201.200
Rinder über 2 Jahre							
davon männlich	1,0			52	20.900	94	37.800
davon Färsen	1,0			235	94.500	256	102.900
davon Milchkühe	1,0			946	380.300	1.292	519.400
davon Ammen- und Mutterkühe	1,0			423	170.000	320	128.600
davon Schlacht- und Mastkühe	0,7			55	15.500	40	11.300
<b>Rinder insgesamt</b>				3.493	<b>872.900</b>	4.940	<b>1.188.700</b>
<b>Methanbildungspotential gesamt:</b>					<b>611.600</b>		<b>1.004.256</b>

1) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg ([www.statistik-portal.de/Landwirtschaft/Erlaeuterungen.asp](http://www.statistik-portal.de/Landwirtschaft/Erlaeuterungen.asp))

2) WETTER & BRÜGGING, (2005)

3) EDER, B. & SCHULZ, H. (2006)

4) Landwirtschaftskammer NRW, 2007

5) Errechnet

## 5.2.2 Außerlandwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffe

Zu den außerlandwirtschaftlichen Reststoffen in Rheinberg (Tabelle 13) zählt der Grünschnitt von kommunalen Grünflächen und Naturschutzflächen. Weitere Reststoffe, die sich für die Fermentation eignen, sind zum Beispiel Lebensmittelabfälle aus Industrie und Gewerbe. In Rheinberg ist derzeit keine lebensmittelverarbeitende Industrie angesiedelt. Eine Recherche bei Bäckerei- und Fleischerei-Gewerben ergab, dass Abfälle gegenwärtig restlos einer weiteren stofflichen Verwertung zugeführt werden. Brotreste werden an karitative Einrichtungen abgegeben und Fleisch- und Knochenabfälle werden von Tierkörperbeseitigungsunternehmen abgenommen und weiterverarbeitet. Um eine Übersicht der Gesamtlebensmittelabfallmengen zu erhalten, ist es notwendig alle Betriebe einzeln zu befragen. Dieses wurde im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt.

**Tabelle 13: Grünschnittmengen und mittlere Biogaserträge von Naturschutzflächen der Stadt Rheinberg**

Reststoffe	Flächen-größe [ha]	Ertrag [t FM/ha]	mittlerer Biogasertrag [m <sup>3</sup> /t FM]	Methan-gehalt [%]	mittlerer Methan-ertrag <sup>1)</sup> [m <sup>3</sup> /a]
Grünschnitt aus der kommunalen Pflege (einschl. Friedhöfe und Sportanlagen)	150 <sup>2)</sup>	20-34 <sup>3)</sup>	170 <sup>3)</sup>	53 <sup>3)</sup>	365.000
Grünschnitt von Naturschutzflächen (Kompensationsflächen mit Obstwiesen (einschübrig) und Extensivwiesen (einschübrig))	16,52 <sup>4)</sup>	0,84 <sup>5)</sup>	74 <sup>5)</sup>	50 <sup>5)</sup>	500
Vertragsnaturschutzflächen (einschübrig)	137 <sup>6)</sup>	0,84 <sup>5)</sup>	74 <sup>5)</sup>	50 <sup>5)</sup>	4.260
<b>insgesamt</b>	<b>303,52</b>				<b>369.800</b>

1) Errechnet

2) Internetplattform der Stadt Rheinberg ([www.findcity.de/47495a/?p=00000002](http://www.findcity.de/47495a/?p=00000002))

3) Eckel, 2006

4) Stadt Rheinberg, Frau Morsch

5) RÖSCH et al., 2007

6) Untere Landschaftsbehörde Kreis Wesel, Herr Spickermann

Laut Aussagen des Grünflächenamtes wird Grünschnitt aus der kommunalen Pflege nicht zentral registriert und verbracht. Das Schnittgut verbleibt oft auf den Flächen

liegen. Das bedeutet, dass das Material abgeholt werden muss, um es in der Biogasanlage einsetzen zu können.

Die Naturschutzflächen werden nach Angaben der Stadtverwaltung einmal im Jahr gemäht und das Grüngut wird abtransportiert. Das Material muss anschließend kostenpflichtig entsorgt werden. Eine Nutzung des Grüngutes als Gärsubstrat kann für die Stadt demnach eine kostenlose Variante zur Entsorgung darstellen oder sogar zusätzliche Einnahmen für den Biogasanlagenbetreiber bringen. Dabei ist zu beachten, dass Grünschnitt von Naturschutzflächen einen Rohfaseranteil von mehr als 350 g / kg TS und einen geringen Energiegehalt (Stärkegehalt < 100 g / kg oTS und Proteingehalt < 82 g / kg oTS) (RÖSCH et al., 2007) hat. Bezuglich des Fermentationsprozesses eignet sich dieses Substrat jedoch möglicherweise als Strukturmaterial in einer Trockenfermentation. Der Fermenterraumbedarf und die Verweilzeit würden bei einer Nassfermentation die technisch-ökonomische Verweilzeit überschreiten.

Vetragsnaturschutzflächen werden von den jeweiligen Eigentümern gepflegt und das Schnittgut wird dezentral entsorgt oder auf der Fläche belassen. Die Flächen sind relativ weit voneinander entfernt und kleinflächig (s. Anlage 1).

**Tabelle 14: Organische Abfallarten und Mengen der Stadt Rheinberg und deren mittlere Biogaserträge**

Abfallarten	Aufkommen <sup>1)</sup> [kg / a]	TS [%]	oTS [% TS]	Biogas-ertrag [m <sup>3</sup> / t FM]	Methan-gehalt [%]	Methan-ertrag [m <sup>3</sup> / a]
Hausmüll (Anschlusszwang)	200-350 kg / Einwohner <sup>*) a</sup>	-	-	-	-	-
Gewerbliche Abfälle (frei handelbar)	ca. 500.000 kg / a für den Kreis Wesel	-	-	-	-	-
Bioabfall**) (Bestellung einer Biotonne gegen Gebühr möglich)	ca. 1.310 t / a (ca. 0,04 t / Einwohner <sup>**) a</sup> )	40-75 <sup>2)</sup>	50-70 <sup>2)</sup>	80-120 <sup>2)</sup>	56-65 <sup>2)</sup>	78.600 <sup>3)</sup>

1) Quelle: AIDA Informationsplattform Abfall NRW ([www.abfall-nrw.de/aida/reports/snapshots/siebilanz/restabfallaufkommen.htm](http://www.abfall-nrw.de/aida/reports/snapshots/siebilanz/restabfallaufkommen.htm))

2) Quelle: FNR, 2006

3) Errechnet

\*) Einwohner: 32.752 (Stand 2003), Internetauftritt der Stadt Rheinberg

\*\*) Bioabfälle sind einerseits strukturarme und feuchte Küchenabfälle, andererseits wird auch strukturreicher Grünschnitt aus dem Garten bzw. dem Balkon über die Biotonne entsorgt

In Tabelle 14 sind die organischen Abfallarten zusammengefasst, die zum kommunalen Abfall zählen. Hausmüll unterliegt dem Anschlusszwang (JESSNER, Kreis Weseler Abfallgesellschaft mbH & Co. KG, mündliche Mitteilung), kann also nur von den zuständigen Abfallwirtschaftsunternehmen entsorgt werden. Die gewerblichen Abfälle differenziert zu erfassen war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Da, wie zuvor beschrieben, kein größeres lebensmittelverarbeitendes Gewerbe in Rheinberg angesiedelt ist, wird diese Abfallart für eine Biogaserzeugung hier außer Acht gelassen.

Bioabfall aus der braunen Tonne besitzt einen durchschnittlichen Organikanteil von 33 % der Trockensubstanz (FNR, 2006) und einen mittleren Biogasertrag von 80 - 100 m<sup>3</sup> / t FM. Problematisch für den Biogasprozess ist die Inhomogenität und die hygienische Bedenklichkeit des Substrates sowie die geringen Chargen, in denen diese Abfallart in ländlichen Gebieten anfällt. Zusätzlich müssen Erfassung und Transport mit Kosten in Höhe von ca. 410 € / t TS (LEIBLE et al., 2003) berechnet werden.

## 5.2 Treibhausgasbilanzen ausgewählter Biogassubstrate

Die Forderung der Umweltverbände bezüglich eines Grenzwertes für die Treibhausgas-Produktion von erneuerbaren Energien liegt bei 60 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent / GJ (0,216 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent / kWh). Die Ergebnisse in den Tabellen 16 - 19 repräsentieren Näherungen bezüglich der tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Äquivalenzbilanz. Sie beruhen auf Annahme- und Literaturwerten, die in Anlage 6 aufgeführt sind.

Die Lebenszyklusanalysen wurden in der vorliegenden Arbeit für unterschiedliche Randbedingungen durchgeführt. Diese Randbedingungen bzw. Varianten sind in Tabelle 15 aufgeführt.

**Tabelle 15: Varianten der Treibhausgasanalysen**

<b>Die unterschiedlichen Varianten der THG-Bilanzen</b>		
Gas-Otto BHKW	mit Abwärmenutzung	ohne Abwärmenutzung
Zündstrahl-BHKW	mit Abwärmenutzung	ohne Abwärmenutzung

### 5.2.1 Silomais

**Tabelle 16:** Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas auf der Basis von Silomais (Werte gültig für die Stromerzeugung aus 100 ha Silomais / a). Für CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O berechnen sich die CO<sub>2</sub>-Äquivalente durch Multiplikation der Masse-Emissionen (kg) mit dem GWP (Tabelle 5). Die Präzision der Zahlenangaben spiegelt nicht die Genauigkeit wieder, mit der sie bekannt sind.

<b>Sachbilanz</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub>-Äqu.-Emissionen</b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Äqu.-Emissionen</b>	<b>Summe der CO<sub>2</sub>-Äqu.-Emissionen</b>
	kg	kg	kg	kg	kg	kg
1 direkte + indirekte N <sub>2</sub> O-Emissionen durch Stickstoffdüngung	-	-	-	315	93.329	93.329
2 Dieselemissionen durch Maschineneinsatz während der Pflanzenproduktion	30.765	6	147	3	888	31.800
3 Dieselemissionen durch den Transport des Erntegutes zum Hof	12.900	3	62	1,25	370	13.332
4 Mehremissionen und Emissionseinsparungen für die Fermentation von Gülle	-	-377	-8.671	0,8	234	- 8.437
5 Zwischensumme der Zeilen 1 bis 4	43.665	- 368	- 8.461	320	94.821	130.024
<b>Gas-Otto-BHKW</b>						
6 Emissionen aus Abgasen der BHKW-Motoren	-	110	2.530	8,4	2.486	5.016
7 Emissionsgutschrift für die externe Wärmenutzung	- 404.400	-	-	-	-	- 404.400
8 Summe ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 5 und 6)	43.665	- 258	- 5.931	329	97.307	135.040
9 Summe mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung Summe aus Zeilen 5, 6 und 7)	-360.735	- 258	- 5.931	328	97.307	- 269.360
<b>Zündstrahl-BHKW</b>						
10 Emissionen aus Abgasen der BHKW-Motoren	244.200	90	2.070	18	5.328	251.598
11 Emissionsgutschrift für die externe Wärmenutzung	- 432.700	-	-	-	-	- 432.700
12 Summe ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 5 und 10)	287.865	- 278	- 6.391	338	100.149	381.622
13 Summe mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 5, 10 und 11)	- 144.835	- 278	- 6.391	338	100.149	51.078
<b>Umrechnung der totalen Treibhausgas-Emissionen in den Vergleichswert: kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh<sub>el</sub> erzeugten Strom</b>						
Zeile 8 (Gas-Otto-BHKW ohne Abwärmenutzung), Summenspalte	0,060 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 9 (Gas-Otto-BHKW mit Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,124 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 12 (Zündstrahl-BHKW ohne Abwärmenutzung), Summenspalte	0,165 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 13 (Zündstrahl-BHKW mit Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,022 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					

## 5.2.2 Zuckerrüben

**Tabelle 17: Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas auf der Basis von Zuckerrüben (Werte gültig für die Stromerzeugung aus 100 ha Zuckerrüben / a).**

<b>Sachbilanz</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub>-Äqu.-Emissionen</b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Äqu.-Emissionen</b>	<b>Summe der CO<sub>2</sub>-Äqu.-Emissionen</b>
	kg	kg	kg	kg	kg	kg
1 direkte + indirekte N <sub>2</sub> O-Emissionen durch Stickstoffdüngung	-	-	-	358	105.820	105.820
2 Dieselemissionen durch Maschineneinsatz während der Pflanzenproduktion	41.000	9	196	4	1.184	42.380
3 Dieselemissionen durch den Transport des Erntegutes zum Hof	4.500	1	22	0,4	130	4.652
4 Mehremissionen und Emissionseinsparungen für die Fermentation von Gülle	-	-377	-8.671	0,8	234	-8.437
5 Zwischensumme der Zeilen 1 bis 4	45.500	- 267	- 8.453	363	107.368	144.415
<b>Gas-Otto-BHKW</b>						
6 Emissionen aus Abgasen der BHKW-Motoren	-	93	2.134	7	2.072	4.206
7 Emissionsgutschrift für die externe Wärmenutzung	- 340.340	-	-	-	-	- 340.340
8 Summe ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 5 und 6)	45.500	- 174	- 6.319	370	109.440	148.621
9 Summe mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung Summe aus Zeilen 5, 6 und 7)	- 294.840	- 174	- 6.319	370	109.440	- 191.719
<b>Zündstrahl-BHKW</b>						
10 Emissionen aus Abgasen der BHKW-Motoren	205.530	75	1.725	15	4.440	211.695
11 Emissionsgutschrift für die externe Wärmenutzung	- 364.140	-	-	-	-	- 364.140
12 Summe ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 5 und 10)	251.030	- 192	- 6.728	378	111.808	356.110
13 Summe mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 5, 10 und 11)	- 113.110	- 192	- 6.728	378	111.808	- 8.030
<b>Umrechnung der totalen Treibhausgas-Emissionen in den Vergleichswert: kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh<sub>el</sub> erzeugten Strom</b>						
Zeile 8 (Gas-Otto-BHKW ohne Abwärmenutzung), Summenspalte	0,082 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 9 (Gas-Otto-BHKW mit Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,105 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 12 (Zündstrahl-BHKW ohne Abwärmenutzung), Summenspalte	0,183 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 13 (Zündstrahl-BHKW mit Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,004 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					

### 5.2.3 Zuckerrüben-Reststoffe

**Tabelle 18: Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas auf der Basis von Zuckerrüben-Resten (Werte gültig für die Stromerzeugung aus Reststoffen von 100 ha Zuckerrüben / a).**

Sachbilanz	CO <sub>2</sub> kg	CH <sub>4</sub> kg	CO <sub>2</sub> -Äqu.-Emissionen kg	N <sub>2</sub> O kg	CO <sub>2</sub> -Äqu.-Emissionen kg	Summe der CO <sub>2</sub> -Äqu.-Emissionen kg
1 Dieselemissionen durch den Transport des Erntegutes zum Hof	4.190	1	20	0,4	120	4.330
2 Mehremissionen und Emissionseinsparungen für die Fermentation von Gülle	-	- 243	- 5.589	0,5	151	- 5.438
3 Zwischensumme der Zeilen 1 und 2	4.190	- 242	- 5.569	1	271	- 1.108
<b>Gas-Otto-BHKW</b>						
4 Emissionen aus Abgasen der BHKW-Motoren	-	18	405	2	474	878
5 Emissionsgutschrift für die externe Wärmenutzung	- 81.800	-	-	-	-	- 81.800
6 Summe ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 3 und 4)	4.190	- 224	- 5.164	3	745	- 230
7 Summe mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung Summe aus Zeilen 3, 4 und 5)	- 77.610	- 224	- 5.164	3	745	- 82.030
<b>Zündstrahl-BHKW</b>						
8 Emissionen aus Abgasen der BHKW-Motoren	39.060	14	322	3	858	40.240
9 Emissionsgutschrift für die externe Wärmenutzung	- 109.610	-	-	-	-	- 109.610
10 Summe ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 3 und 8)	43.250	- 228	- 5.247	4	1.129	39.132
11 Summe mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 3, 8 und 9)	- 66.360	- 228	- 5.247	4	1.129	- 70.478
<b>Umrechnung der totalen Treibhausgas-Emissionen in den Vergleichswert: kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh<sub>el</sub> erzeugten Strom</b>						
Zeile 6 (Gas-Otto-BHKW ohne Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,001 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 7 (Gas-Otto-BHKW mit Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,233 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 10 (Zündstrahl-BHKW ohne Abwärmenutzung), Summenspalte	0,103 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 11 (Zündstrahl-BHKW mit Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,187 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					

### 5.2.4 Gülle

**Tabelle 19: Gesamte Treibhausgas-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas auf der Basis von Rindergülle (Werte gültig für die Stromerzeugung aus Rindergülle von 300 Rindern (0,7 GVe) / a).**

Sachbilanz	CO <sub>2</sub> kg	CH <sub>4</sub> kg	CO <sub>2</sub> -Äqu.-Emissionen kg	N <sub>2</sub> O kg	CO <sub>2</sub> -Äqu.-Emissionen kg	Summe der CO <sub>2</sub> -Äqu.-Emissionen kg
1 Dieselmissionen durch den Transport des Erntegutes zum Hof	540	0,1	3	0,05	15	558
2 Mehremissionen und Emissionseinsparungen für die Fermentation von Gülle	-	-203	-4.669	0,4	124	-4.545
3 Zwischensumme der Zeilen 1 und 2	540	- 203	- 4.666	0,5	139	- 3.987
<b>Gas-Otto-BHKW</b>						
4 Emissionen aus Abgasen der BHKW-Motoren	-	7	163	0,5	160	323
5 Emissionsgutschrift für die externe Wärmenutzung	- 28.140	-	-	-	-	- 28.140
6 Summe ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 3 und 4)	540	- 195	- 4.503	1	299	- 3.664
7 Summe mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung Summe aus Zeilen 3, 4 und 5)	27.600	- 195	- 4.503	1	299	- 31.804
<b>Zündstrahl-BHKW</b>						
8 Emissionen aus Abgasen der BHKW-Motoren	15.700	6	130	2	474	16.304
9 Emissionsgutschrift für die externe Wärmenutzung	- 30.110	-	-	-	-	- 30.110
10 Summe ohne CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 3 und 8)	16.240	- 197	- 4.536	2,5	752	12.317
11 Summe mit CO <sub>2</sub> -Gutschrift durch externe Abwärmenutzung (Summe aus Zeilen 3, 8 und 9)	- 13.870	- 197	- 4.536	2,5	752	- 17.793
<b>Umrechnung der totalen Treibhausgas-Emissionen in den Vergleichswert: kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh<sub>el</sub> erzeugten Strom</b>						
Zeile 6 (Gas-Otto-BHKW ohne Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,024 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 7 (Gas-Otto-BHKW mit Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,211 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 10 (Zündstrahl-BHKW ohne Abwärmenutzung), Summenspalte	0,076 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					
Zeile 11 (Zündstrahl-BHKW mit Abwärmenutzung), Summenspalte	- 0,110 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalentemissionen / kWh <sub>el</sub>					

**Tabelle 20: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Lebenszyklusanalyse**

THG-Bilanz	Sirolmais	Zuckerrübe	Zuckerrüben- Reste	Gülle
Gas-Otto BHKW				
mit Abwärmenutzung	-0,125	-0,105	-0,233	-0,211
ohne Abwärmenutzung	0,062	0,082	-0,001	-0,024
Zündstrahl-BHKW				
mit Abwärmenutzung	-0,022	-0,004	-0,187	-0,110
ohne Abwärmenutzung	0,165	0,183	0,103	0,076

Die Ergebnisse der Bilanzen sind in Tabelle 20 zusammengefasst. Die Spanne liegt für Anlagen mit einem Gas-Otto-BHKW ohne externe Nutzung von erzeugter Wärme bei -0,024 für Rindergülle bis 0,082 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenz / kWh<sub>el</sub> für Zuckerrüben. Bei externer Nutzung der BHKW-Abwärme liegen die Werte zwischen -0,233 für Rindergülle und -0,105 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenz / kWh<sub>el</sub> für Zuckerrüben.

Zündstrahl-BHKWs muss wegen des kontinuierlichen Zündölverbrauchs ein zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu Lasten gelegt werden. Die Energie, die das Zündöl zusätzlich zum Biogas erzeugt, ist jedoch in der Rechnung berücksichtigt. Für einen Anlagenbetrieb ohne Abwärmenutzung liegen die THG-Emissionen zwischen 0,076 für Rindergülle und 0,183 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenz / kWh<sub>el</sub> für Zuckerrüben. Wird die Wärme extern genutzt, so vermindern sich die Emissionswerte auf -0,187 für Zuckerrüben-Reste bis 0,004 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenz / kWh<sub>el</sub> für Zuckerrüben.

### 5.3 Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung

Wie in Abbildung 17 dargestellt, befinden sich in kurzer Distanz zur Deponie Rheinberg-Winterswick mehrere potentielle Wärmeabnehmer. Die BHKW-Motoren, und somit die Wärmequelle, befinden sich auf der Westseite des Deponiegeländes (s. Anlage 8). Die drei Altenwohnheime nördlich der Deponie heizen mit Ergas. In dem Altenwohnheim St. Thekla wohnen etwa 100 Senioren. Genaue Angaben zum Jahres-Verbrauch liegen leider nicht vor.

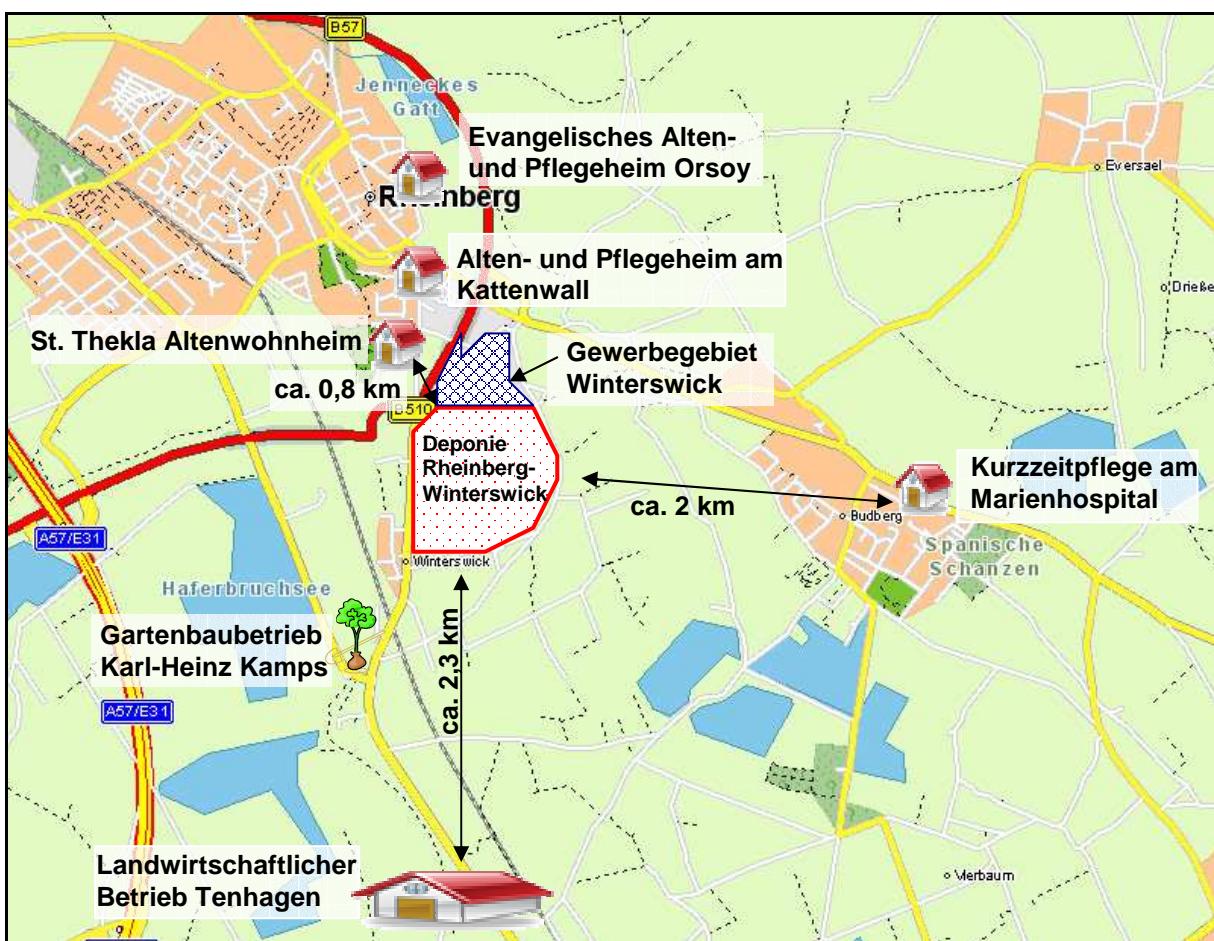


Abbildung 17: Potentielle Wärmeabnehmer um die Deponie Rheinberg-Winterswick

Bei einer Auslastung der zwei BHKW-Motoren mit insgesamt 500 kW elektrischer Leistung ergibt sich eine thermische Leistung von ca. 400 kW (s. Anlage 6). Bei einer angenommenen Auslastung der Anlage von 8.000 h / a ergeben sich demnach 3.200.000 kWh<sub>th</sub> / a.

## 6. Diskussion verschiedener Konzepte zum ökologisch nachhaltigen Betrieb einer Biogasanlage am Deponiestandort Rheinberg-Winterswick

### 6.1 Bewertung der Rohstoffe für die Biogaserzeugung

Um das vorhandene Motorenpotential an der Deponie Rheinberg-Winterswick von 510 kW ausnutzen zu können, wird Substrat mit einem Energiegehalt von etwa 13.043.500 kWh<sub>ges</sub> / a benötigt. Dieser Energiegehalt entspricht beispielsweise etwa:

- 470 ha Feldgras,
- 300 ha Winterweizen als GPS,
- 200 ha Silomais,
- 170 ha Zuckerrüben samt Blättern und Köpfen,
- 21.870 t Bioabfall oder
- Hühnerkot von 409.000 Tieren (entspricht 1.480 GVe)

Abgesehen von dem Energiegehalt der Substrate, ist nicht jedes Substrat gleich gut geeignet für den Biogasprozess. Die Produktionskosten für nachwachsende Rohstoffe können sich pro Flächeneinheit deutlich unterscheiden und die Transportkosten für Abfallstoffe sind durch die, unter Umständen großen Distanzen, sehr kostenaufwendig.

Auch die stofflichen Eigenschaften organischer Substrate sind maßgeblich für die Kosten der Substrataufbereitung, die Stabilität des Fermentationsprozesses, die Höhe des Biogasertrages, das Fermentervolumen und die mittlere Verweilzeit verantwortlich.

Aus ökologischen Gesichtspunkten macht die Biogaserzeugung grundsätzlich nur dann Sinn, wenn sie gegenüber den herkömmlichen Energiebereitstellungssystemen eine deutlich klimaschonende Bilanz aufweist. Zusätzlich sollen die Auswirkungen auf Natur und Landschaft, welches besonders für landwirtschaftliche Biogasanlagen gilt, so verträglich wie möglich gestaltet werden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden diese Aspekte für die in Frage kommenden Biogassubstrate näher behandelt.

### 6.1.1 Nachwachsende Rohstoffe

Um landwirtschaftliche Energiepflanzen für die Biogaserzeugung wirtschaftlich einsetzen zu können, wurde 2004 im Rahmen des novellierten EEG der Bonus für nachwachsende Rohstoffe geschaffen. Damit sollen zum einen die Produktionskosten (Energiepflanzen) und zum anderen die zum Teil niedrigen Energiegehalte (Gülle) ausgeglichen werden.

Ob der NaWaRo-Bonus tatsächlich dazu führt, dass der Einsatz von Energiepflanzen in Biogasanlagen wirtschaftlich ist, hängt zusätzlich von den pflanzenspezifischen Produktionskosten, den Kosten für die Aufbereitung des Substrates für den Fermentationsprozess und die Lagerung ab.

Anhand der Zusammenstellung der landwirtschaftlichen Produktion in Rheinberg (s. Tabellen 9 und 12) wird deutlich, dass ausreichend Potential durch nachwachsende Rohstoffe vorhanden ist um eine Biogasanlage mit 500 kW elektrischer Leistung zu betreiben. Durch die im Jahr 2007 deutlich gestiegenen Erzeugerpreise für Getreide, Körnermais und Silomais bleiben für Rheinberg als wirtschaftlichste Energiepflanzen für die Biogaserzeugung Zuckerrüben, Grassilage und bedingt, das heißt bei einem guten Abwärmenutzungskonzept, Silomais. Die Verwendung der Zuckerrübe für die Biogaserzeugung stellt für den Landwirt einen Mehrerlös von 390 € / ha im Verhältnis zum Verkauf am Agrarmarkt dar. Für Silomais liegt der Mehrerlös lediglich bei 240 € / ha. Von diesem Mehrerlös müssen dann noch die Anschaffungskosten sowie laufende Kosten der Biogasanlage gedeckt werden.

Neben den Energiepflanzen besteht auch ein erhebliches Potential für die Fermentation von Gülle und Mist (s. Tabelle 12). Insgesamt ergibt sich für Gülle und Mist in Rheinberg ein Potential von 1.900.600 kWh<sub>el</sub> und für den Nachbarort Alpen 3.122.500 kWh<sub>el</sub>.

Für eine Trockenfermentation im Batch-Verfahren sind Substrate mit einem TS-Gehalt von > 30 % gut geeignet. Von den Substrateigenschaften ausgehend kommen in Rheinberg folgende nachwachsende Rohstoffe für eine Trockenfermentation in Frage:

- Hühnermist (ca. 32 % TS)
- Landschaftspflegematerial (90,2 % TS)
- Leguminosen-Grassilage (35 % TS)
- Silomais (35 % TS), Körnermais (70 % TS), Mais-CCM (60% TS)

- Körnergetreide (87 % TS), Getreide-GPS (35 % TS), Getreidestroh (86 % TS)

Vorteile der Trockenfermentation sind höhere Energiedichten durch weniger Wasserbeimengung, und eine leichtere Trocknung und Entsorgung der Gärreste. Die folgende Substratkombination stellt einen Vorschlag für die Beschickung einer Trockenfermentationsanlage in Rheinberg dar:

- 7.500 t Hühnermist von etwa 440 GV (50 m<sup>3</sup> Methan / t FM)
- 150 ha bzw. 130 t Naturschutzgrün (40 m<sup>3</sup> Methan / t FM)
- 200 ha bzw. 6.000 t Zuckerrüben-Reste (50 m<sup>3</sup> Methan / t FM)
- 200 ha bzw. 4.000 t Wiesengras (90 m<sup>3</sup> Methan / t FM)

Insgesamt können mit dieser Inputmenge etwa 440 kW Motorenleistung ausgelastet werden. Daneben kann auch anfallendes Getreidestroh eingebracht werden. Das Naturschutzgrün sowie das Getreidestroh wirken sich positiv auf das C:N-Verhältnis der Mischung aus, da Hühnerkot einen sehr hohen N-Gehalt von 32 kg / t aufweist (LWK, 2007 / 2). Insgesamt soll das Verhältnis zwischen 10:1 bis 30:1 liegen, um gute Bedingungen für die Bakterienkulturen zu schaffen (EDER & SCHULZ).

Aus Naturschutzsicht ist diese Substratkombination sehr positiv zu bewerten, da viele Reststoffe verwertet werden, die weder zusätzliche Fläche in Anspruch nehmen noch aufwendig hergestellt bzw. angebaut werden müssen. Die einzige Belastung, die ins Gewicht fällt, ist der Substrattransport. Beim Naturschutzgrün wird davon ausgegangen, dass ein Transport ohnehin notwendig ist, da das Grüngut von den Flächen abtransportiert werden muss (MORSCH, 2007 Stadt Rheinberg, mündliche Aussage). Die Zuckerrüben-Reste müssen zusätzlich transportiert werden, da sie normalerweise auf dem Feld belassen werden (TENHAGEN, 2007, mündliche Mitteilung). Der Hühnermist muss aus der Region Rheinberg und Alpen (etwa 5 km von Rheinberg entfernt) antransportiert werden.

Die Substrate fallen alle unter die juristische Definition der nachwachsenden Rohstoffe, womit eine Vergütung von 15,32 ct / kWh<sub>el</sub> bei Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 2008 gemäß EEG sichergestellt ist. Zusätzlich wird im Jahr 2008, bei Betrieb der Anlage im Trockenfermentations-Verfahren, noch ein Technologie-Bonus von 2 ct / kWh<sub>el</sub> gezahlt.

Die einzigen Produktionskosten, die bei der oben genannten Substratkombination anfallen, sind die für Wiesengras (zwei Schnitte bis Juni). Für einen 200 ha-Schlag

können etwa 40.000 € Produktionskosten berechnet werden (berechnet nach ECKEL, 2006).

Für eine Nassfermentation bieten sich mehrere Möglichkeiten bezüglich des Substrat-Einsatzes an. Als Kofermente zu Rinder- oder Schweinegülle können praktisch alle organischen Materialien in zerkleinerter Form eingebracht werden. Da Gülle sehr gute Puffereigenschaften aufweist, die den Biogasprozess insgesamt stabilisieren, sind etwas höhere Gas- und Methanerträge zu erwarten. In den Tabellen 10 und 11 wurden zwei Fruchtfolgen vorgestellt, die für die Region Rheinberg typisch sind und für eine Biogaserzeugung im Nassfermentations-Verfahren gut geeignet sind. Die Fruchtfolgen bestehen nicht ausschließlich aus Energiepflanzen für die Biogaserzeugung, sondern auch aus Pflanzen für die Nahrungsmittelproduktion. Um die Pflanzenvielfalt, die aus Nahrungsmittel-Energiepflanzen-Fruchtfolgen resultiert, zu erhalten, ist es notwendig auf mindestens zwei unterschiedlichen Ackerflächen abwechselnd Energiepflanzen anzubauen.

Die Aufzählung zu Beginn des Kapitels zu der benötigten Flächengröße für die Erzeugung von etwa 13.043.500 kWh<sub>ges</sub> / a ist ohne die Beimischung von Gülle oder Mist berechnet. Bei einer Beimischung von 10.000 m<sup>3</sup> Rindergülle und 3.500 m<sup>3</sup> Hühnermist, verringert sich die benötigte Maisanbaufläche um ca. 70 ha auf etwa 130 ha. Die Zuckerrübenanbaufläche (Rübe samt Blättern) verringert sich in dem Fall um ca. 50 ha auf 120 ha. Der Einsatz von Naturschutzgrün ist für eine Nassfermentation in der Regel nicht sinnvoll, da durch den hohen TS-Gehalt die Raumbelastung im Fermenter unverhältnismäßig zum Energiegewinn steigt.

Die Zuckerrübe bietet für die Biogaserzeugung sowohl die Möglichkeit der Reststoffverwertung (Zuckerrübenblätter und Kappen), als auch der Verwertung der ganzen Frucht. Wie bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben, verliert die Zuckerrübe durch die drastische Preissenkung in der Zuckermarktordnung für die Zuckerproduktion in den nächsten Jahren weiter an Attraktivität. Für die Biogaserzeugung wird sie jedoch wegen der steigenden Mais und Getreidepreise immer attraktiver. Die Zuckerrübe hat sehr hohe Flächenerträge und bei vorheriger Zerkleinerung gute Abbauraten (FNR, 2006). Zwei Landwirte, Herr Quistorp und Herr Graf, die die Zuckerrübe seit 2005 und 2007 bereits einsetzen, berichten von einer guten Prozessstabilität und einer unproblematischen Lagerung in Edelstahl-Getreidesilos. Laut Herrn Graf hat sich die Prozessstabilität seit dem Rübeneinsatz

verbessert und der Gärrest ist als Wirtschaftsdünger sehr gefragt. Problematisch ist nach wie vor der hohe Erdanteil, der den Rüben anhaftet und wertvollen Gärraum belegt (FNR, 2006). Eine praktikable und wirtschaftliche Lösung für die Säuberung der Rüben ist bisher noch nicht auf dem Markt.

### **6.1.2 Außerlandwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffe**

Organische Reststoffe, die für die Region Rheinberg nach eigenen Recherchen anfallen sind kommunale Bioabfälle. Die Abfallmenge ist mit ca. 1.300 t / a nicht sehr hoch. Das Potential von Bioabfällen, welche zum Teil sehr hohe Methanerträge bringen, muss auch mit dem NaWaRo-Bonus konkurrieren können, da dieser bei dem Einsatz von Abfallstoffen in der Biogasanlage entfällt. Interessant wird es dann, wenn zusätzlich größere Chargen von Lebensmittelresten zur Verfügung stehen, die eine Auslastung der 500 kW Motorenleistung sicherstellen können.

## **6.2 Treibhausgasbilanzen der Strombereitstellung aus verschiedenen Biogassubstraten**

Zur Einordnung der Ergebnisse müssen zunächst ein paar Vorbemerkungen gemacht werden. Die Ergebnisse dieser Studie beziehen sich nicht auf die vollständige THG-Bilanz der Biogaserzeugung aus den hier ausgewählten Substraten, sondern ausschließlich auf die fortschreitenden Emissionen. Das heißt, auf die Substraterzeugung bzw. Beschaffung, die Lagerung sowie die Verstromung der Substrate. Bau und Abriss der Biogasanlage wurden nicht berechnet. Die Samenproduktion und Düngemittelherstellung wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Bezuglich des Anteils der Emissionen, die durch den Bau und Abriss der Anlage entstehen, gelangen verschiedene Treibhausgas-Studien aus der Literatur zu unterschiedlichen Ergebnissen. In der Gesamt-Emissionsbilanz zweier Studien des Institutes für Energetik und Umwelt gGmbH werden die THG-Emissionen durch den Bau und Abriss der Biogasanlage zusammenfassend dargestellt und schwanken zwischen 0,04 und 0,02 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenz / kWh<sub>el</sub>. Es wird allerdings nicht deutlich, woraus die Schwankungen resultieren.

In einer dritten Studie von HARTMANN & KALTSCHMITT (2002) wird der Anteil des Anlagenbaus an den Gesamt-THG-Emissionen mit 59,8 % (20 kW-Anlage mit Wärmenutzung) bzw. 48,2 % (50 KW-Anlage mit Wärmenutzung) berechnet. Im Ergebnis macht dies 0,08 bzw. 0,048 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenz / kWh<sub>el</sub> aus. Der Vergleich

---

mehrerer Lebenszyklusanalysen ist jedoch nicht ohne weiteres möglich. Dies liegt an den Unterschieden bezüglich der betrachteten Sachbilanz. In Tabelle 21 ist eine Übersicht der Sachbilanzen der drei genannten Studien mit der hier vorliegenden Studie zum Vergleich dargestellt. Eine weitere Schwierigkeit besteht in der oft ungenauen Bezeichnung der funktionellen Einheit, in diesem Fall CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh erzeugte Energie. Es wird aus der Zusammenfassung von HARTMANN & SCHMITT zum Beispiel nicht deutlich, ob es sich bei der Bezugsgröße um kWh<sub>el</sub> oder kWh<sub>ges</sub> handelt. Für die Interpretation des Ergebnisses ist dies allerdings von entscheidender Bedeutung. Da in der Studie ein Bonus für die Nutzung der Abwärme erteilt wird, wird an dieser Stelle angenommen, dass es sich um kWh<sub>ges</sub> handelt.

**Tabelle 21: Vergleich der Sachbilanzen verschiedener Lebenszyklusanalysen zu THG-Emissionen von Biogasanlagen**

Sachbilanz	Hartmann & Kaltschnitt (2002)	Scholwin et al.. (2006)	Scholwin & Fritzsche (2007)	Eigene Untersuchung
Bau der Anlage	X	X	X	
Abriss der Anlage	X	X	X	
Betrieb der Anlage	X*	X <sup>1)</sup>		
Methanverlust <sup>2)</sup>			X	
Direkte Emissionen durch das BHKW	X			X
Pflanzenproduktion Betriebsmittel		X <sup>3)</sup>		X
Pflanzenproduktion direkte Emissionen		X <sup>4)</sup>		X
Substrat			X <sup>5)</sup>	
Emissionen Gärresteausbringung			X <sup>6)</sup>	X
Transport			X <sup>7)</sup>	X
Gutschrift Stromerzeugung	X	X	X	X
Gutschrift Gülleverwertung			X <sup>8)</sup>	X
Gutschrift Gärrest			X <sup>9)</sup>	
Gutschrift Wärme	X		X	X
Ergebnisse ohne Gutschriften	0,146 - 0,099 kg CO <sub>2</sub> -Äqu./kWh <sub>ges?</sub>	~ 0,76 kg CO <sub>2</sub> -Äqu./kWh <sub>el</sub>	0,37 kg CO <sub>2</sub> -Äqu./kWh <sub>el</sub>	0,187 - 0,006 kg CO <sub>2</sub> -Äqu./kWh <sub>el</sub>

- 1) Zusätzlich auftretende Belastungen durch Einsatz eines Zündöl-BHKWs (Emissionen durch Zündölherstellung und dessen Verbrennung)
  - 2) Durch Undichtigkeiten im Fermenter, Gasspeicher etc.
  - 3) Emissionen durch den Verbrauch von elektrischer Energie für Fermenter und Leittechnik, Diesel für Maschineneinsatz, Ausbringen der Gärreste auf landwirtschaftlichen Flächen, Herstellung von Mineraldünger, Pflanzenschutzmitteln, Saat- und Pflanzgut sowie Emissionen aus dem Boden nach Applikation von Wirtschaftsdünger
  - 4) Emissionen aus Dieselverbrauch für die Pflanzenproduktion vom Pflügen bis zur Ernte
  - 5) Pflanzenproduktion? Nicht näher beschrieben
  - 6) Substratbeschaffung (LKW-Fahrten)
  - 7) Abtransport von Gärresten
  - 8) nicht näher erläutert
  - 9) Gutschrift für Mineraldüngerersatz durch Einsatz des Gärrestes als Wirtschaftsdünger
- \* Keine genauen Angaben über die Emissionsquelle

Aus Tabelle 21 wird deutlich, dass sich die verschiedenen Lebenszyklusanalysen nur schwer miteinander vergleichen lassen und zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Eine mögliche Erklärung für die niedrigen Werte der vorliegenden Studie sind die nicht berechneten Emissionen aus dem Bau der Anlage. Wenn der Bau bei einer 50 kW-Anlage etwa 48 % der Gesamtemissionen ausmacht (Hartmann &

Kaltschmitt, 2002), so können für eine 500 kW-Anlage deutlich niedrigere Werte angenommen werden, zumal die Gas-Motoren bereits am Standort vorhanden sind. Rechnet man etwa 20 % der Gesamtemissionen für den Bau der Anlage ein, so ergibt sich ein Emissionshöchstwert von 0,224 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh<sub>el</sub> für Zuckerrüben. Der Wert liegt immer noch deutlich unter dem Ergebnis der Studien des Institutes für Energetik und Umwelt gGmbH, die von Scholwin & Fritsche (2006) und Scholwin et al.. (2007) angefertigt wurden. Für einen aussagekräftigen Vergleich der Ergebnisse der Lebenszyklusanalysen müssen der Umfang der Sachbilanz und die Annahmewerte genau bekannt sein.

Die Emissionsbilanz für die unterschiedlichen Biogassubstrate in dieser Studie zeigt dagegen ein relativ einheitliches Bild. Die Fermentation von Gülle (Gülle von 300 Rindern / a) und Zuckerrüben-Resten (Reste von 100 ha Zuckerrübenanbau / a) ergeben durchweg die besten CO<sub>2</sub>-Äquivalenzwerte pro kWh elektrische Energie. Das zweitbeste Resultat erreicht Silomais gefolgt von Zuckerrüben (jeweils bezogen auf den Ertrag von 100 ha / a). Die Emissionen aus dem Zündöl in einem Zündöl-BHKW verursachen die höchsten THG-Emissionen während des Lebenszyklusses von Biogassubstraten. Der zweithöchste Anteil der Emissionen entsteht durch die Lachgasemissionen aus den Stickstoffdüngungen, als direkte und indirekte Emissionen der Pflanzenproduktion aus. Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Düngergaben in Wirklichkeit geringer ausfallen, da ein Teil des Stickstoffbedarfes durch den im Boden vorliegenden Reststickstoff (N<sub>min</sub>) bereits abgedeckt ist. Für den Fall, dass in den landwirtschaftlichen Böden in Rheinberg, ähnlich wie im Wasserschutzgebiet Binsheimer Feld (Gemarkung Vierbaum) durchschnittlich 80 kg N / ha mineralisierter Stickstoff im Boden vorliegen, reduzieren sich die Emissionswerte für Silomais und Zuckerrüben durch die Stickstoff-Dünung um ca. 30 %.

Unter der Annahme, dass der Bau der Biogasanlage 20 % der Gesamtemissionen ausmacht, wird der Grenzwert von 0,216 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh bei allen Substraten mit einer Verstromung des Biogases in einem Gas-Otto-BHKW eingehalten. Bei einer Verstromung des Biogases in einem Zündstrahl-BHKW überschreiten die Treibhausgasemissionen durch die Energiebereitstellung aus Zuckerrüben den Grenzwert leicht. Da der Grenzwert auf kWh<sub>ges</sub> (elektrische und thermische Energie) bezogen ist, verringern sich die Emissionswerte bei einer

Abwärmenutzung um 25 % (bei 56 % thermischem Wirkungsgras und 55% internem Wärmeverbrauch).

Die Negativwerte in den Ergebnistabellen 16 bis 19 erklären sich durch die Anrechnung von CO<sub>2</sub>-Gutschriften für die externe Abwärmenutzung. Sie werden danach berechnet, wie viel kg CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Erzeugung von thermischer Energie durch fossile Energieträger mit der Abwärme aus dem BHKW substituiert werden können.

Vergleicht man die THG-Bilanzen ohne einen CO<sub>2</sub>-Bonus für eine externe Abwärmenutzung, so können mit Gülle die niedrigsten Emissionswerte erzielt werden. Es gibt nur zwei Emissionsquellen, die diesem System zu Lasten gelegt werden können. Der Transport der Gülle (Annahme: maximal 1 km bis zur Biogasanlage und 18 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen des Göllewagens) und die Abgas-Emissionen des BHKW-Motors. Die Sensitivität der Bilanz auf das Volumen des Göllewagens spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Erniedrigt man das Volumen auf 10 m<sup>3</sup>, so ergibt sich eine Mehrbelastung von 0,003 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen pro kWh erzeugten Strom. Auch ohne Abwärmenutzung können mit der Energieerzeugung aus Gülle Negativwerte erreicht werden. Das liegt an den Eingesparten CH<sub>4</sub>-Emissionen die für die Fermentation von Gülle angerechnet werden.

Wenn eine Auskopplung und externe Nutzung der thermischen Energie möglich ist, sind die Emissionswerte für Zuckerrüben-Reste besser als die für Gülle. Da die Zuckerrüben-Reste energiereicher sind als Gülle, wird auch mehr Motoren-Abwärme während der Energieumwandlung erzeugt und somit ein höherer CO<sub>2</sub>-Bonus angerechnet.

Abbildungen 18 und 19 stellen eine Übersicht der Emissionsquellen und -senken für die Erzeugung von nutzbarer Energie aus Gülle dar. Die Abbildungen für die weiteren Substrate befinden sich im Anlage 9.

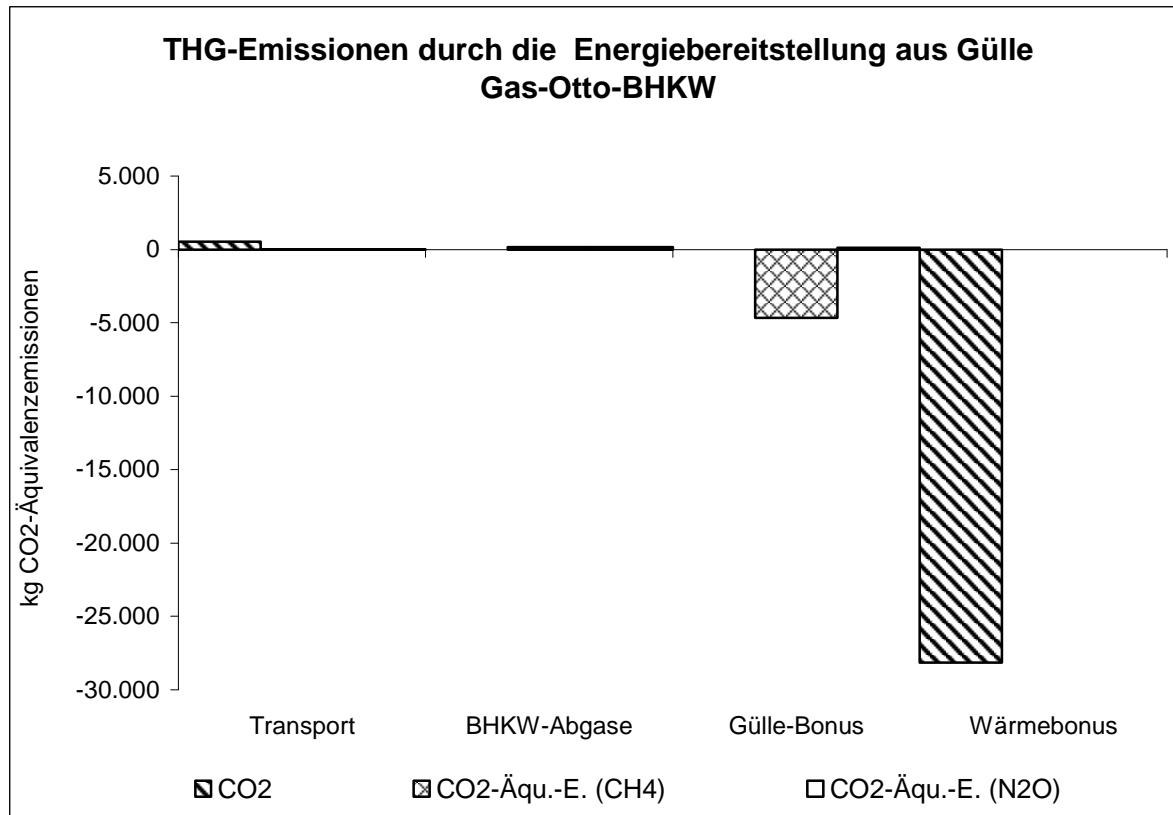


Abbildung 18: THG-Quellen und -senken der Energiebereitstellung aus Rindergülle mittels eines Gas-Otto-BHKWs

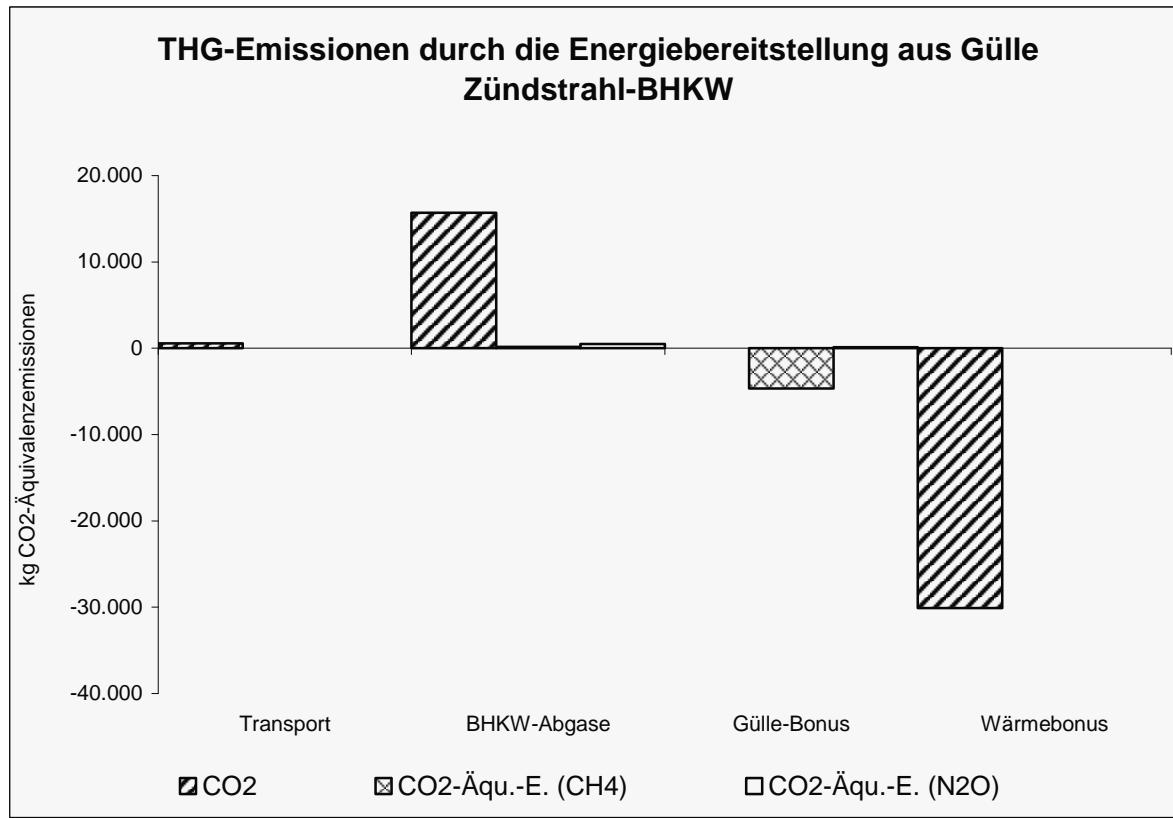


Abbildung 19: THG-Quellen und -senken der Energiebereitstellung aus Rindergülle mittels eines Zündstrahl-BHKWs

Die Erzeugung von Energie aus Zuckerrüben verursacht die höchsten Treibhausgasemissionen im Vergleich zu den anderen untersuchten Substraten. Die Werte liegen jedoch im ähnlichen Wertebereich wie Silomais. Die Ergebnisse für Silomais liegen gegenüber der Zuckerrübe in allen untersuchten Varianten niedriger. Dies hängt mit folgenden Annahmen zusammen:

- Für die Zuckerrübenproduktion wird ein höherer Dieselverbrauch pro ha zu Grunde gelegt
- Zuckerrüben haben einen höheren Stickstoffbedarf pro ha
- Zuckerrüben haben ein geringeres Biogaspotential (ohne Zuckerrübenblätter und -Kappen)

Es können dennoch mit der Energieerzeugung aus Zuckerrüben Negativwerte erreicht werden, wenn die Verstromung mittels eines Gas-Otto-BHKWs betrieben wird und die Abwärme einer externen Nutzung zugeführt werden kann.

Im Ergebnis wird festgestellt, dass die Stromerzeugung mittels eines Gas-Otto-BHKWs aus allen untersuchten organischen Substraten den geforderten Grenzwert von 0,216 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh erzeugten Strom einhält. Dies gilt auch ohne Abwärmennutzung und mit Anrechnung der Emissionen aus dem Anlagenbau mit 20 % der Gesamtemissionen. Kritische Werte, die bei Zuckerrüben und Silomais, als Vertreter der Energiepflanzen auftreten, können durch ein Abwärmennutzungskonzept um maximal 40 % gesenkt werden.

Bei einer Verstromung des Gases im Zündstrahl-BHKW überschreiten die Emissionen des Lebenszyklusses von Zuckerrüben den Grenzwert leicht. Eine Überschreitung kann vermieden werden, wenn eine vollständige Abwärmennutzung erfolgt.

Die bilanzierte Masse der klimaschädlichen Gase durch die Stromerzeugung aus Biogas liegt deutlich unter den Emissionen der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. Diese weisen einen Wert von ca. 0,7 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh auf (KALINSKI, 2003).

Bezüglich des geforderten Energieumwandlungsfaktors von 67 % für erneuerbare Energien, gibt es Grenzen, die durch die Leistung des BHKW und den Eigenenergiebedarf des Systems bedingt sind. Der Ertrag von nutzbarer elektrischer Energie beträgt für die BHKWs am Standort Rheinberg-Winterswick etwa 31 %, die nutzbare thermische Energie etwa 25 %. Zusammen ergibt sich ein Energie-

---

umwandlungsfaktor von 56 %. Bei einer Trockenfermentation besteht die Möglichkeit einer aeroben Vorrotte, bei der bereits eine Vorewärmung des Substrates bewirkt wird, die sich positiv auf die thermische Energiebereitstellung auswirkt.

### 6.3 Mögliche Standorte der Biogasanlagen-Komponenten

Die Komponenten einer Biogasanlage (Fermenter, BHKW, Netzanschluss) müssen nicht zwangsläufig an ein und demselben Ort installiert werden. Für den Standort des Fermenter ist es sinnvoll, möglichst nah an der Quelle der Biogassubstrate zu stehen, da lange Distanzen kosten- und zeitaufwändig sowie emissionsträchtig sind.

Das BHKW sollte möglichst nah an dem geplanten Wärmeabnehmer positioniert sein, da Wasserleitungen extrem teuer sind (ca. 180 – 210 € / m) und auch immer einen Wärmeverlust haben. Zudem wird im Gesetzesentwurf für die EEG-Novelle 2009 ein Wärmeverlust der Wasserleitungen von unter 25 % des Nutzwärmebedarfs des Wärmeabnehmers gefordert. Der Netzanschluss ist sinnvollerweise nahe des BHKW zu installieren.

In dem speziellen Fall, den die vorliegende Arbeit betrachtet, sind zwei BHKWs und der Netzanschluss bereits installiert und befinden sich auf dem Deponiegelände der Deponie Rheinberg-Winterswick. Wie in Abbildung 17 dargestellt, befindet sich in nördlicher Richtung anschließend zum Deponiegelände das Gewerbegebiet Winterswick. Hier sind Handel, Großhandel, Produktionsbetriebe und Unterhaltungsgewerbe angesiedelt. Etwa 800 m vom Deponiegelände entfernt, in nordwestlicher Richtung befindet sich das Altenwohnheim St. Thekla, in dem etwa 100 ältere Menschen betreut werden.

Als potentieller Lieferant der Biogassubstrate hat der Landwirt Heinrich Tenhagen ein Interesse bekundet. Sein landwirtschaftlicher Betrieb liegt südlich der Deponie in etwa 2,3 km Entfernung (s. Abbildung 17).

#### 6.3.1 Fermenter

Für den Standort des Fermenter werden hier zwei Varianten in Betracht gezogen. Entweder der Fermenter steht auf dem Deponiegelände Rheinberg-Winterswick, oder auf einem landwirtschaftlichen Betrieb, z. B. Hof Tenhagen. Nach den Regelungen des BauGB für Vorhaben im Außenbereich sind Biogasanlagen auf einem landwirtschaftlichen Betriebsgelände zulässig, wenn:

- sie eine maximale installierte elektrische Leistung von 500 kW nicht überschreiten,

- sie in einem räumlich funktionalen Zusammenhang mit dem landwirtschaftlichen Betrieb stehen und
- die Biomasse überwiegend aus dem Betrieb oder aus diesem und diesem nahe gelegenen Betrieben stammt.

(§ 35 Abs. 1 Nr. 1 und 6 Baugesetzbuch (BauGB))

Eine Baugenehmigung nach dem BauGB integriert alle zur Anwendung kommenden Vorschriften. Diese sind vor allem baurechtlicher, immissionsschutzrechtlicher, abfallrechtlicher und wasserrechtlicher Natur.

Der Bau einer Biogasanlage auf einem Deponiegelände ist ebenfalls ausnahmsweise zulässig. Die energetische Nutzung von Biomasse ist seit der Novelle des BauGB 2004 als privilegiertes Vorhaben im Außenbereich zulässig, wenn das Vorhaben zur öffentlichen Versorgung mit Elektrizität, [...] Gas, [...] Wärme und Wasser dient (§ 35 Abs. 3 BauGB) und im Zusammenhang mit einem Betrieb gebaut wird, der wegen seiner besonderen Anforderungen an die Umgebung, wegen seiner nachteiligen Umweltauswirkungen oder wegen seiner besonderen Zweckbestimmung nur im Außenbereich ausgeführt werden soll (§ 35 Abs. 4 BauGB).

Sollte die Biogasanlage beispielsweise am Betrieb Tenhagen gebaut werden und die BHKWs am Deponiestandort verbleiben, so muss das Biogas über eine Gasleitung zum Deponiegelände geleitet werden. Ein positiver Effekt, den diese Gasleitung bringen würde, ist die weitestgehende Kondensierung des Gases auf dem Weg zwischen Biogasanlage und BHKW, welches zu einem saubereren Verbrennungsvorgang im BHKW-Motor führt (KAPS, 2007, mündliche Mitteilung).

### 6.3.2 Blockheizkraftwerk

Die feste Konstante in dem logistischen Quadrat: Biogasanlage - BHKW - Netzanschluss - Wärmeabnehmer ist der Netzanschluss. Dieser ist an der Ostseite des Deponiegeländes installiert und soll auch dort bleiben. Sollte das BHKW also näher an einem Wärmeabnehmer positioniert werden, dann muss im Gegenzug die Stromleitungen zurück zum Deponiegelände gelegt werden. Eine mögliche Variante kann zum Beispiel wie in Abbildung 20 aussehen. Ein BHKW bleibt an der Deponie und versorgt einen oder mehrere Wärmeabnehmer im Gewerbegebiet Winterswick, während das andere BHKW zum Beispiel am Marienhospital positioniert wird

(Abbildung 17). Die Biogasanlage steht auf dem Hofgelände des biogasproduzierenden Landwirtes und das Gas wird über Leitungen zu den BHKWs geführt. Somit kann der Synergieeffekt der Deponiegasaufwertung genutzt werden und möglichst viel Abwärme extern verkauft werden. Da Gasleitungen, so genannte Mikrogasnetze, im Vergleich zu Wasserleitungen wesentlich günstiger sind, ist es sinnvoller, das Gas zum BHKW zu leiten als das Wasser zu einem Nutzer, der nicht in direkter Nachbarschaft ansässig ist. Hier sind auch die Neuregelungen im EEG 2009 zu berücksichtigen, die für die Gewährung des KWK-Bonus einen Leitungswärmeverlust von unter 25 % fordern.

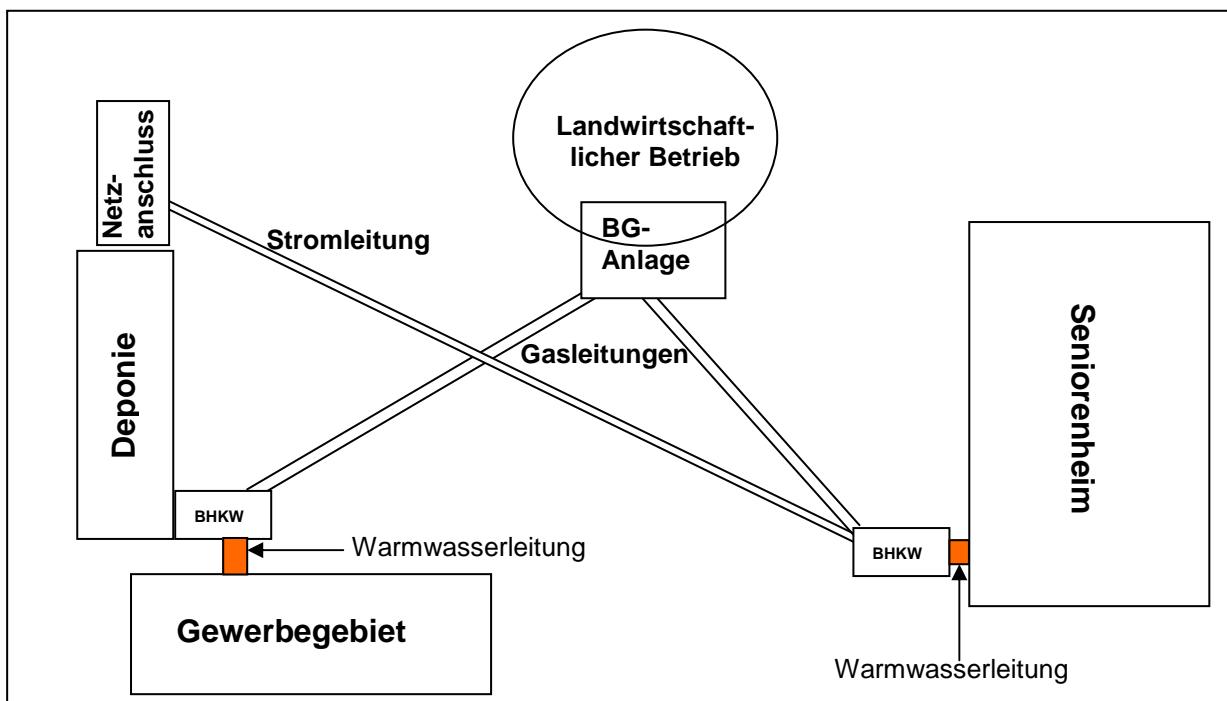


Abbildung 20: Mögliche Standorte für die Komponenten einer Biogasanlage für den konkreten Fall Deponie Rheinberg-Winterswick

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt eine konstruktive Auseinandersetzung mit Kritikpunkten an dem Energiebereitstellungssystem „Energie aus Biogas“ von Seiten öffentlicher und privater Institutionen im Umwelt- und Naturschutzbereich dar.

Die nachfolgenden Aspekte stehen im Fokus der Kritik:

1. Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) durch die Energieerzeugung
2. Ökologisch nachteilige Entwicklungen durch die Flächennutzung für den Energiepflanzenanbau

Aus diesen zentralen Kritikpunkten leiten sich Anforderungen an eine ökologisch nachhaltige Betriebsweise der Biogaserzeugung ab. Die Anforderungen beziehen sich zum einen auf die Anbaupraxis für Energiepflanzen und zum anderen auf die Entstehung von Treibhausgasemissionen in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent / Kilowattstunde erzeugte Energie.

Die geforderte Höchstgrenze für Treibhausgasemissionen durch die Erzeugung von nutzbarer Energie aus Biomasse, liegt bei 0,216 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh. Zur Vermeidung negativer Folgen für die Flächennutzung durch den Energiepflanzenanbau wird neben der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft auch der sparsame Umgang mit den Ressourcen in den Vordergrund gestellt.

Anhand des konkreten Planungsbeispiels Deponie Rheinberg-Winterswick werden die Möglichkeiten der Einhaltung dieser Anforderungen überprüft.

Den Kern der Arbeit bilden zum einen die Zusammenstellung und Bewertung aller in Rheinberg vorhandenen organischen Substrate, die potentiell für eine Biogaserzeugung eingesetzt werden können und zum anderen eine Treibhausgasanalyse des Energiebereitstellungssystems „Energie aus Biogas“ für vier verschiedene repräsentative organische Substrate in Rheinberg.

Daneben werden Vorrang- und Ausschlussgebiete für die Energiepflanzenproduktion in Rheinberg formuliert und Möglichkeiten für eine Abwärmenutzung aufgezeigt.

Als Ergebnis aus der Zusammenstellung der jährlich anfallenden organischen Reststoffe in Rheinberg wird ein Biogaspotential von etwa 23,5 GWh Energie pro Jahr ermittelt. Die Reststoffe bestehen zum überwiegenden Teil aus den tierischen Abfällen Gülle und Mist sowie aus pflanzlichen Reststoffen.

Die ackerbaulich genutzte Fläche in Rheinberg beträgt ca. 3.480 ha. Die Hauptanbaufrüchte sind Brot- und Futtergetreide, Zuckerrüben, Silomais und Dauergrünland. Wegen der seit 2006 stark gestiegenen Erzeugerpreise für landwirtschaftliche Produkte beschränken sich die für die Biogaserzeugung wirtschaftlich einsetzbaren Energiepflanzen auf Zuckerrüben, Wiesengras und bedingt Silomais. Die Entwicklungen am Agrarmarkt machen deutlich, dass ein verstärkter Einsatz von Reststoffen in der Biogaserzeugung nicht nur aus ökologischen, sondern auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten in Zukunft noch wichtiger sein wird. Ein zusätzliches Gewicht bekommt in dem Zusammenhang auch ein gutes Abwärmenutzungskonzept.

Die Treibhausgasbilanzen der Umwandlung von Biomasse in nutzbare Energie wurden für die Energiepflanzen Silomais und Zuckerrüben sowie für die landwirtschaftlichen Reststoffe Gülle und Zuckerrüben-Reste durchgeführt. Als Treibhausgasquellen fließen die Pflanzenproduktion (landwirtschaftliche Fahrzeuge), die Stickstoffdüngung der Energiepflanzen, der Transport der Ernte bzw. der Reststoffe und die Motorenabgase von zwei unterschiedlichen BHKW-Typen (Gas-Otto-BHKW und Zündstrahl-BHKW) in die Berechnung ein.

Im Ergebnis wird deutlich, dass die einzelnen Emissionsquellen ein sehr unterschiedliches Gewicht innerhalb der Gesamttreibhausgasbilanz haben. Die Emissionen aus dem Zündöl, das in einem Zündöl-BHKW konstant mit verbrannt wird, bilden die größte Treibhausgasquelle innerhalb des Energiebereitstellungssystems. Die Emissionswerte liegen für diese Quelle mindestens um das Zweifache höher als die Treibhausgasemissionen aus den restlichen Quellen zusammen.

Die direkten und indirekten N<sub>2</sub>O-Emissionen, die durch die Stickstoffdüngung der Energiepflanzen entstehen, stellen die zweitgrößte Treibhausgasquelle dar. Dieses Ergebnis lässt den Rückschluss zu, dass sich die Treibhausgasbilanz der Energiebereitstellung umso schlechter darstellt, je höher der Stickstoffbedarf der Energiepflanze ist. Da der Biogaserzeugung aus Reststoffen (Pflanzenreste sowie Gülle und Mist) keine N<sub>2</sub>O-Emissionen durch die Stickstoffdüngung angelastet werden, weist die Reststoffvergärung, selbst bei Mehrbelastungen durch größere Transportdistanzen, eine erheblich bessere Treibhausgasbilanz auf.

Als eine Art Treibhausgas-„Senke“ kann die Abwärmenutzung des BHKW-Motors gesehen werden. In der vorliegenden Studie wurden für den Fall, dass die Abwärme

eines BHKWs extern genutzt wird, CO<sub>2</sub>-Gutschriften in Höhe von 232 g CO<sub>2</sub> / kWh thermischer Energie erteilt. Dieser Wert ist dem Erfahrungsbericht zum EEG 2007 entliehen, wonach eine durch erneuerbare Energien substituierte kWh fossile Wärme im Jahr 2007 232 g CO<sub>2</sub> einsparte. Durch diese Gutschrift werden im Ergebnis der Treibhausgasbilanz sogar Negativwerte erreicht. Die Negativwerte spiegeln die Vermeidung von wesentlich höheren Emissionen durch fossile Energieträger wider. Die Wirkungsabschätzung der Treibhausgasbilanzen erfolgt auf der Grundlage des Grenzwertes für die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien von 0,216 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh. Bei einer externen Nutzung der Abwärme wird der Grenzwert von allen Substraten eingehalten. Ohne die Nutzung der Abwärme liegt das Ergebnis für Zuckerrüben bei der Verstromung des Biogases im Zündstrahl-BHKW leicht über dem Grenzwert.

Durch die Fermentation von Gülle wird eine zusätzliche Minderung der Methanemissionen aus der Lagerung und Ausbringung bewirkt.

Zur Einordnung der Ergebnisse im Vergleich zu anderen Energiebereitstellungs-systemen wird der Wert von 0,7 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenzemissionen / kWh für die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern herangezogen.

Die Untersuchungen dieser Studie haben zu Erkenntnissen über die Menge der jährlich anfallenden organischen Reststoffe sowie über die Hauptanbaufrüchte in Rheinberg und ihre Treibhausbilanz bei einer energetischen Nutzung durch eine Biogasanlage gebracht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden Empfehlungen zum ökologisch nachhaltigen Betrieb einer Biogasanlage am Deponiestandort Rheinberg-Winterswick formuliert.

Die ökologisch optimale Variante der Biogaserzeugung besteht in der Ausnutzung der vorhandenen Reststoffe aus landwirtschaftlichen und kommunalen Quellen. Das energetische Potential zur Auslastung eines 500 kW-Biogasmotors ist grundsätzlich vorhanden.

Die Schwierigkeit liegt hier in der logistischen Planung der Substratbeschaffung und der zuverlässigen Verfügbarkeit. Nach den Ergebnissen der Treibhausgasbilanz zu schließen, birgt die Variante der Reststoff-Fermentation die geringsten Treibhausgasemissionen pro erzeugte Energieeinheit. Eine zusätzliche Flächeninanspruchnahme wird nicht benötigt.

Für den Fall, dass die verfügbare Menge organischer Reststoffe in Rheinberg nicht ausreichend ist, um die Anlagenleistung von ca. 510 kW auszulasten, ist der Einsatz von Grassilage, Zuckerrüben oder in Abhängigkeit von den weiteren Entwicklungen des Agrarmarktes Silomais möglich. Bei der Energiepflanzenproduktion muss auf einen sparsamen Umgang mit Düngemitteln geachtet werden, da sie eine entscheidende Quelle für Treibhausgase sind. Eine Kombination von Energiepflanzen und Reststoffen wird den geforderten Emissionsgrenzwert nach den Ergebnissen der durchgeföhrten Analyse in der Regel nicht überschreiten.

Eine abwechslungsreiche Fruchfolge kann durch den abwechselnden Anbau von Energiepflanzen und Nahrungsmittelpflanzen sowie den Einsatz von unterschiedlichen Energiepflanzen in der Biogasanlage gewährleistet werden.

Als Alternative zum Energiepflanzenanbau ist auch die Reduzierung der Anlagenleistung möglich. Die zwei älteren BHKW-Motoren könnten gegen einen neuen Motor mit geringerer kW-Leistung, dafür aber besserem elektrischem und thermischem Wirkungsgrad, ausgetauscht werden. Der Einsatz eines Zündstrahl-BHKWs sollte in jedem Fall vermieden werden.

Die Standorte der Biogasanlagen-Komponenten: Fermenter und BHKW müssen auf die Möglichkeiten der Abwärmenutzung und die Logistik der Anlagenbeschickung und -substratlagerung abgestimmt sein. Innerhalb eines Radius von 2 km befinden sich mindestens vier potentielle Wärmeabnehmer, darunter das Gewerbegebiet Winterswick nördlich anschließend an die Deponie, eine Kurzzeitpflegeeinrichtung ca. 2 km östlich, ein Seniorenwohnheim ca. 800 m nordwestlich und ein Gartenbaubetrieb ca. 1 km südwestlich der Deponie Rheinberg-Winterswick.

Wenn die Anlagenkomponenten an unterschiedlichen Standorten stehen, wird die Distanz über so genannte Mikrogasnetze überbrückt. Auf der Strecke zwischen Biogasanlage und BHKW kann das Gas abkühlen und kondensieren. Das hat den positiven Effekt einer saubereren Verbrennung im BHKW.

Weiteren Forschungsbedarf sehe ich in der klaren Festlegung der Sachbilanz für die Lebenszyklusanalyse von Treibhausgasemissionen, die durch das Energiebereitstellungssystem „Energie aus Biogas“ oder „Energie aus erneuerbaren Energien“ verursacht werden. Die Lebenszyklusanalyse ist eine gute Methode, um Emissionsquellen nach ihrer Wirkung in Kategorien einzuteilen. Durch das Bewusstsein über die Wirkungskategorie einer Emissionsquelle können Emissionsminderungen besser gesteuert werden. Gerade für Technologien, deren Zweck es ist das Klima zu schützen, ist das Einschätzen von Treibhausgasquellen besonders wichtig.

Hinsichtlich der energetischen Verwertung von organischen Reststoffen sehe ich die Organisationen im Umweltbereich in der Pflicht, sich für die Logistik der Substratbeschaffung für Biogasanlagen einzusetzen. Es ist für den einzelnen Landwirt kaum zu leisten, die Reststoff-Potentiale in seiner Region zu erfassen und seine Anlage auf unsichere Rohstofflieferungen aus verschiedenen Quellen zu basieren. Es existieren bereits seit mehreren Jahren Verbände, die zum Zweck der Rohstofforganisation für mehrere Biogasanlagen zusammen gegründet wurden. Diese organisieren ausschließlich die Logistik des „Substratflusses“. Dennoch sind hier auch gerade diejenigen Umweltschutzorganisationen gefordert, die öffentliche Kritik an den Umweltauswirkungen der Biogaserzeugung üben. Es ist natürlich, dass die Biogaserzeugung auch ökologisch negative Folgen mit sich bringt, wenn der Landwirt oder die Vereinigung, der/die eine Biogasanlage plant, primär den Gewinn im Auge haben muss, damit die Anlage wirtschaftlich ist. Negative Umweltauswirkungen werden an dieser Stelle teilweise außer Acht gelassen.

## 8. Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei denjenigen bedanken, die mir die Möglichkeit gegeben haben, dieses Thema zu bearbeiten und die mich hierbei unterstützt haben. Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Otto Klemm, Inhaber des Lehrstuhls für Klimatologie im Institut für Landschaftsökologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, für die wissenschaftliche Beratung und die Annahme des Themas als Erstgutachter.

Ich danke Herrn Dr.-Ing. Burckhard Tscherpel, Geschäftsführer der S.I.G.-DR.-ING. STEFFEN GmbH, für die Annahme des Themas als Zweitgutachter und für die Möglichkeit der Einarbeitung und Bearbeitung des Themas in der Firmenniederlassung Essen. Des Weiteren danke ich Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Rath, Mitarbeiter der S.I.G.-DR.-ING. STEFFEN GmbH und Geschäftsführer der G.E.N.E. mbH für die fachliche Unterstützung bei der Bearbeitung des Themas sowie für konstruktive Kritik.

Ich bedanke mich außerdem bei den Mitarbeitern der Abfallentsorgungsgesellschaft Ruhrgebiet Unternehmensgruppe (AGR) für die Kooperation und die Erlaubnis der konkreten Betrachtung der Abfalldeponie Rheinberg-Winterswick als Planungsobjekt meiner Diplomarbeit. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. Uwe Walter, Mitarbeiter der AGR, für umfangreiche Informationen und die Unterstützung der Diplomarbeit.

Herrn Heimann, Landwirt in Wetter an der Ruhr, danke ich für die bereitwillige Besprechung von landwirtschaftlichen Fragestellungen und die interessanten Gespräche zum Thema der Diplomarbeit.

Ich möchte mich des Weiteren bei den Mitarbeitern der Landwirtschaftskammer NRW für die Bereitstellung von umfangreichen Datengrundlagen bedanken.

Vielen Dank an all diejenigen, mit denen ich fruchtbare Gespräche über das Thema Biogas geführt habe und die mich mit ihrer Hilfsbereitschaft sehr motiviert haben.

## Literatur

- AMON, T., MOITZI, G., SCHIMPL, M., KRYVORUCHKO, V., WAGNER-ALT, C (2002): Methane Nitrous Oxide and Ammonia Emissions from Management of Liquid Manures. In: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2002): Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow.
- BECKMANN, S. (2007): Chancen und Risiken des Biomasseanbaus aus Sicht des Naturschutzes und der Landschaftspflege. Fachgespräch Erneuerbare Energien und Naturschutz. Referate und Grundlagenpapiere. Deutscher Naturschutzzring.
- CLAASSEN, N. (1993): Die Bedeutung des Aneignungsvermögens der Pflanzen für den Nährstoffhaushalt. Band 5 In: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Hamburg • Berlin.
- CLEMENS, J., WOLTER, M., WULF, S., AHLGRIMM, H.-J. (2002): Methan- und Lachgas-Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern. In: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2002): Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow.
- ECKEL , H., DÖHLER, H., FRISCH, J. et al.. (2006): Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (Hrsg.). Bonn.
- EDELMANN, W., SCHLEISS, K., ENHELI, K., BAIER, U. (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- EDER, B. UND SCHULZ, H. (2006): Biogas Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. 3. Aufl. Staufen bei Freiburg.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.) (2006): Handreichung. Biogasgewinnung und -nutzung. 3. Aufl. Gülzow
- FRITSCHE, U. R., HEINZ, A., THRÄN, D. et al.. (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Verbundprojekt, Endbericht. Öko-Institut e.V. (Hrsg.).
- GELLERMANN, R., MICHEL, R., MÜLLER, W.-U., WIEGAND, J. (2006): Radiologische Bewertung der Grubenwässer - Einleitung des Steinkohlebergbaus im Bereich Fossa Eugeniana. Linksniederrheinische Entwässerungsgenossenschaft (Hrsg.), Kamp-Lintfort.
- HARTMANN, H. KALTSCHMITT, M (Hrsg.) 2002: Biomasse als erneuerbarer Energieträger. Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien. 2. Auflage. Münster: Landwirtschaftsverlag. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe 3.

## Literatur

---

- KALINSKI, O. (2003): Externe Kosten der Landwirtschaft. Vergleichende Analyse zwischen konventionellem und biologischem Anbausystem anhand von Treibhausgasemissionen. Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien.
- KALTSCHMITT, M. & HARTMANN, H. (HRSG.) (2001): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin • Heidelberg.
- Kreis Wesel - Der Landrat (Hrsg.) (2007): Erläuterungsband mit integriertem Umweltbericht zum Landschaftsplan des Kreis Wesel. Raum Alpen / Rheinberg - Vorentwurf. Wesel.
- KLÖBLE, U. (2007): Biogaserzeugung im ökologischen Landbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.) - Heft 65. Darmstadt.
- MARHEINEKE, T. (2002): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken. Dissertation, vorgelegt an der Universität Stuttgart.
- MEINERT, G. (Hrsg.) & MITTNACHT, A. (1992): Integrierter Pflanzenschutz. Unkräuter, Krankheiten und Schädlinge im Ackerbau. Stuttgart.
- RODE, R., SCHNEIDER, C., KETELHAKE, G., REISSHAUER, D. (2005): Naturschutzverträgliche Erzeugung und Nutzung von Biomasse zur Wärme- und Stromgewinnung. BfN-Skripten 136, Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.). Bonn • Bad Godesberg.
- WEGENER, J., LÜCKE, W., HEINZEMANN, J. (2006): Potentieller Beitrag der Landwirtschaft zur Verminderung der Treibhausgasemissionen in Deutschland. Georg-August-Universität Göttingen. - In: Agrarwirtschaft (55, 4) 196-203.
- WEILAND, P. (2000): Stand und Perspektiven der Biogasnutzung in Deutschland. - In: FNR (Hrsg.): Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotential. Gützower Fachgespräche (15) 8-28.
- WEILAND, P. (2001): Biogas - ein zukunftsweisender Energieträger. In: M. C. Medenbach: Erneuerbare Energien in der Land(wirt)schaft. Verlag für Land(wirt)schaftliche Publikationen.
- WETTER C., BRÜGGING, E., (2005): Leitfaden zum Bau einer Biogasanlage, Band I. Fachhochschule Münster, Kreis Steinfurt (Hrsg.).
- WULF, S. (2003): Untersuchung der Emissionen direkt und indirekt klimawirksamer Spurengase während der Lagerung und nach der Ausbringung von Kofermentationsrückständen sowie Entwicklung von Verminderungsstrategien. In: Agrarwirtschaft 55 (4): 196 - 203.

## INTERNETQUELLEN

AIDA (Informationsplattform Abfall NRW)

[http://www.abfall-nrw.de/aida/reports/snapshots/siebilanz/2006/  
restabfallaufkommen.htm](http://www.abfall-nrw.de/aida/reports/snapshots/siebilanz/2006/restabfallaufkommen.htm)  
Abgerufen am 15.09.2007

Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.

(ASUE) (2005): BHKW-Kenndaten.

[www.asue.de/veroff/bhkw/image/BHKW-Kenndaten-2005.pdf.](http://www.asue.de/veroff/bhkw/image/BHKW-Kenndaten-2005.pdf)  
Abgerufen am 25.09.2007

BMU (2007): Erfahrungsbericht 2007 zum Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)  
gemäß § 20 EEG.

[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/erfahrungsbericht\\_eeg\\_2007.pdf.](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/erfahrungsbericht_eeg_2007.pdf) Abgerufen am 4.7.2007.

Deutscher Bundestag (DB) (2004): Konsolidierte Fassung der Begründung zu dem  
Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien vom 21. Juli 2004.

[www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg\\_begrueitung.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg_begrueitung.pdf)  
Abgerufen am 25. 08.2007.

Deutsches Maiskomitee e.V. (2007): Nährstoffentzug von Silo- und Körnermais in  
kg/ha. [www.maiskomitee.de/fb\\_fachinfo/02\\_04\\_05\\_01.htm](http://www.maiskomitee.de/fb_fachinfo/02_04_05_01.htm)

Abgerufen am 15.12.2007

FACHVERBAND BIOGAS E.V. (2006): Biogas - das Multitalent für die Energiewende.

[www.biogas.org/datenbank/file/notmember/medien/Fakten\\_Biogas\\_2006\\_03.pdf](http://www.biogas.org/datenbank/file/notmember/medien/Fakten_Biogas_2006_03.pdf)  
Abgerufen am 04.08.2007.

FELLER, B. (2005): Wärme aus Biogas - Strategien zur Nutzung

[http://www.alb-hessen.de/veroeffentlichungen/Vortraege\\_Winter%2004\\_05/20-10-2004/Biogasbetreiberschulung1.pdf.](http://www.alb-hessen.de/veroeffentlichungen/Vortraege_Winter%2004_05/20-10-2004/Biogasbetreiberschulung1.pdf) Abgerufen am 15.06.2007

FRITSCHE, U. R. et al. (2006): Sustainability Standards for Bioenergy. WWF

Deutschland (Hrsg.). Frankfurt am Main.

[http://www.wwf.de/fileadmin/fmw/wwf/pdf\\_neu/Sustainability\\_Standards\\_for\\_Bioenergy.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fmw/wwf/pdf_neu/Sustainability_Standards_for_Bioenergy.pdf)  
Abgerufen am 02.08.2007.

HAASE Energietechnik Gruppe

[http://www.haase-energietechnik.de/de/Products\\_and\\_Services/Waste\\_Treatment/Biogas\\_Engineering/.](http://www.haase-energietechnik.de/de/Products_and_Services/Waste_Treatment/Biogas_Engineering/) Abgerufen am 16.12.2007.

HÖLZMANN, J. (2006): Rüben raus, Hafer rein? Landwirtschaftskammer NRW.

[www.landwirtschaftskammer.de/fachangebot/ackerbau/zuckerrueben/zuckerrueben-kalkulieren.htm.](http://www.landwirtschaftskammer.de/fachangebot/ackerbau/zuckerrueben/zuckerrueben-kalkulieren.htm) Abgerufen am 03.01.2007.

## Literatur

---

IPCC (2006): Leitfaden für eine nationale Treibhausgas-Erfassung / Berechnung. Band 4, Kapitel 11: N<sub>2</sub>O-Emissionen durch die Bodenbearbeitung und CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Düngemitteln. Bereitgestellt auf der Internetseite des IPPC NGGIP (National Greenhouse Gas Inventories Program).  
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>.  
Abgerufen am 05.08.2007.

Landesamt für Datenverarbeitung und Statistik NRW (2007): Vorläufiges Ergebnis der Getreideernte.  
[webshop.lds.nrw.de/webshop/toc/C213%20200700.pdf](http://webshop.lds.nrw.de/webshop/toc/C213%20200700.pdf).  
Abgerufen am 30.09.2007

LEIBLE, L., ARLT, A., FÜRNISS, B. et al.. (2003): Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen. Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft. - Möglichkeiten, Chancen, Ziele -. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Forschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.). Wissenschaftliche Berichte FZKA 6882.  
<http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA6882.pdf>. Abgerufen am 15.08.2007

LOERS, C. (2005): Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die Siliereigenschaften von Mais. Doktorarbeit, vorgelegt an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität. Bonn  
[http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=979606349&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=979606349.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=979606349&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=979606349.pdf). Abgerufen am 31.11.2007.

LWK NRW (2007): mittlere Nährstoffgehalte organischer Dünger.  
<http://www.lk-wl.de/fachangebot/ackerbau/pdf/tabellen-organische-duenger.pdf>  
Abgerufen am 03.08.2007.

Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV) (2007): Umweltdaten vor Ort. Trinkwasserschutzzonen.  
[www.uvo.nrw.de/uvo/uvo\\_main.html](http://www.uvo.nrw.de/uvo/uvo_main.html). Abgerufen am 21.10.2007

OELIGER & SCHÖNE (2007): Biomassenutzung aus Sicht des Natur- und Umweltschutzes. Anforderungen des NABU an die Nutzung biogener Reststoffe und den naturverträglichen Anbau nachwachsender Rohstoffe. Naturschutzbund Deutschland e.V. (Hrsg.). Berlin.  
[http://www.umwelt.schleswig-holstein.de/servlet/is/13812/LNV\\_Biomasse\\_20070305.pdf](http://www.umwelt.schleswig-holstein.de/servlet/is/13812/LNV_Biomasse_20070305.pdf). Abgerufen am 26.05.2007.

PELLMEYER, J (2007): Biogas im Einklang der Ökologie und Ökonomie. Fachverband Biogas e.V.  
[http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/Josef\\_Pellmeyer.pdf](http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/Josef_Pellmeyer.pdf)  
Abgerufen am 05.10.2007

RÖSCH, C., RAAB, K., SKARKA, J., STELZER, V. (2007): Energie aus dem Grünland - Eine nachhaltige Entwicklung? Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Hrsg.).  
[http://www.mlr.baden-wuerttemberg.de/mlr/startseite/energie\\_aus\\_dem\\_gruenland.pdf](http://www.mlr.baden-wuerttemberg.de/mlr/startseite/energie_aus_dem_gruenland.pdf). Abgerufen am 10.10.2007

## Literatur

---

- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2007): Klimaschutz durch Biomasse. Sonderdruck, Hausgutachten.  
[www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/sonderg/SG\\_Biomasse\\_2007\\_Hausdruck.pdf](http://www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/sonderg/SG_Biomasse_2007_Hausdruck.pdf). Abgerufen am 08.08.2007
- SCHOLWIN, F., MICHEL, J., SCHRÖDER, G., KALIES, M. (2006): Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Institut für Energetik und Umwelt GmbH (Hrsg.). Leipzig.  
[www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf\\_273ie%20\(2007\)%20endbericht\\_oekobilanzen\\_final.pdf](http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_273ie%20(2007)%20endbericht_oekobilanzen_final.pdf). Abgerufen am 03.07.2007.
- SCHOLWIN, F. & FRITSCHE, U. R. (2007): Beurteilung von Biogasanlagenparks im Vergleich zu Hof-Einzelanlagen. Darmstadt / Leipzig.  
<http://www.oeko.de/oekodoc/317/2007-007-de.pdf>. Abgerufen am 11.07.2007
- SHALA, B. (2001): Jungquartäre Talgeschichte des Rheins zwischen Krefeld und Dinslaken. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.  
[http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=963831151&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=963831151.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=963831151&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=963831151.pdf). Abgerufen am 06.09.2007
- STEIN, S. (2007): Biomasseproduktion - Ein Segen für die Land(wirt)schaft? Thesenpapier der Tagung des Bundesamtes für Naturschutz: Naturschutz und Landwirtschaft im Dialog.  
[www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/Thesenpapier\\_Webversion.pdf](http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/Thesenpapier_Webversion.pdf). Abgerufen am 13.08.2007
- Universität Rostock in Kooperation mit dem Institut für Energetik und Umwelt GmbH (IE) und der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) (2007): Biogaserzeugung durch Trockenvergärung von organischen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen aus der Landwirtschaft. Abschnitt 1. Forschungsvorhaben der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.  
[http://www.fnr-server.de/pdf/literatur/pdf\\_286index.htm](http://www.fnr-server.de/pdf/literatur/pdf_286index.htm)  
Abgerufen am 11.10.2007
- WEILAND, P. (2006): Stand der Technik bei der Trockenfermentation - Aktuelle Entwicklungen: In: Gülzower Fachgespräche, Band 24: Trockenfermentation - Stand der Entwicklungen und weiterer F&E-Bedarf. Gülzow.  
[http://www.fnr-server.de/pdf/literatur/pdf\\_238le2\\_gfg24.pdf](http://www.fnr-server.de/pdf/literatur/pdf_238le2_gfg24.pdf)  
Abgerufen am 14.08. 2007

### MÜNDLICHE QUELLEN

- EnerPipe GmbH (2007), Produkte für den Anwendungsbereich der Geothermie und Biomasse.
- GRAF, B. (2007), Landwirt, betreibt eine 500 kW-Biogasanlage auf Basis von Zuckerrüben Hühnerkot und Rindergülle.
- JESSNER, U. (2007), Kompostwerk AEZ Asdonkshof, Kreis Weseler Abfallgesellschaft mbH&Co. KG.
- KAPS, P. (2007), ehemaliger Energieberater des Landwirtschaftszentrums Haus Dusse NRW.
- MORSCH, A. (2007), Mitarbeiterin der Stadt Rheinberg, Sachgebiet Stadtentwicklung.
- PAESSENS, V. (2007), Landwirt in Rheinberg. Ansprechpartner bei Fragen zur Landwirtschaft in Rheinberg.
- QUISTORP, B. (2007): Landwirt in Sonsbeck. Betreiber einer 500 kW Biogasanlage auf Basis von Zuckerrüben, Rinder- und Schweinegülle.
- ROSEMANN, K. (2007), Landwirtschaftskammer NRW, Berater für Landbau und Wasserwirtschaft Rheinland Nord.
- STEINBERG, L. (2007), Geologe bei der Linksniederrheinischen Entwässerungsgenossenschaft (LINEG) in Kamp-Lintfort.
- SPICKERMANN, L. (2007), Untere Landschaftsbehörde Kreis Wesel.
- TENHAGEN, H. (2007), Landwirt in Rheinberg, Berater der AGR.

### Karten

(im Text erwähnt)

GLA NRW = Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen (1974): Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1:50.000. Kartenblatt L4505 Moers.

## Gesetzestexte

Baugesetzbuch (BauGB) in der Fassung vom 21. Dezember 2006

Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) in der Fassung vom 21. Juli 2004

Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz) in der Fassung vom 19. März 2002

Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) in der Fassung vom 13. Dezember 2006.

Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngemittelverordnung - DüV) in der Fassung vom 27. Februar 2007

Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (BiomasseV) in der Fassung vom 21. Juni 2001

Richtlinie 2001/77/EG: Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Elektrizitätsbinnenmarkt in der Fassung vom 27. September 2001.

Konsolidierte Fassung der Begründung zu dem Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien in der Fassung vom 21. Juli 2004

Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TASi) in der Fassung von 14. Mai 1993

Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BlmSchV) in der Fassung vom 14. März 1997.

## **Anlagen**

---

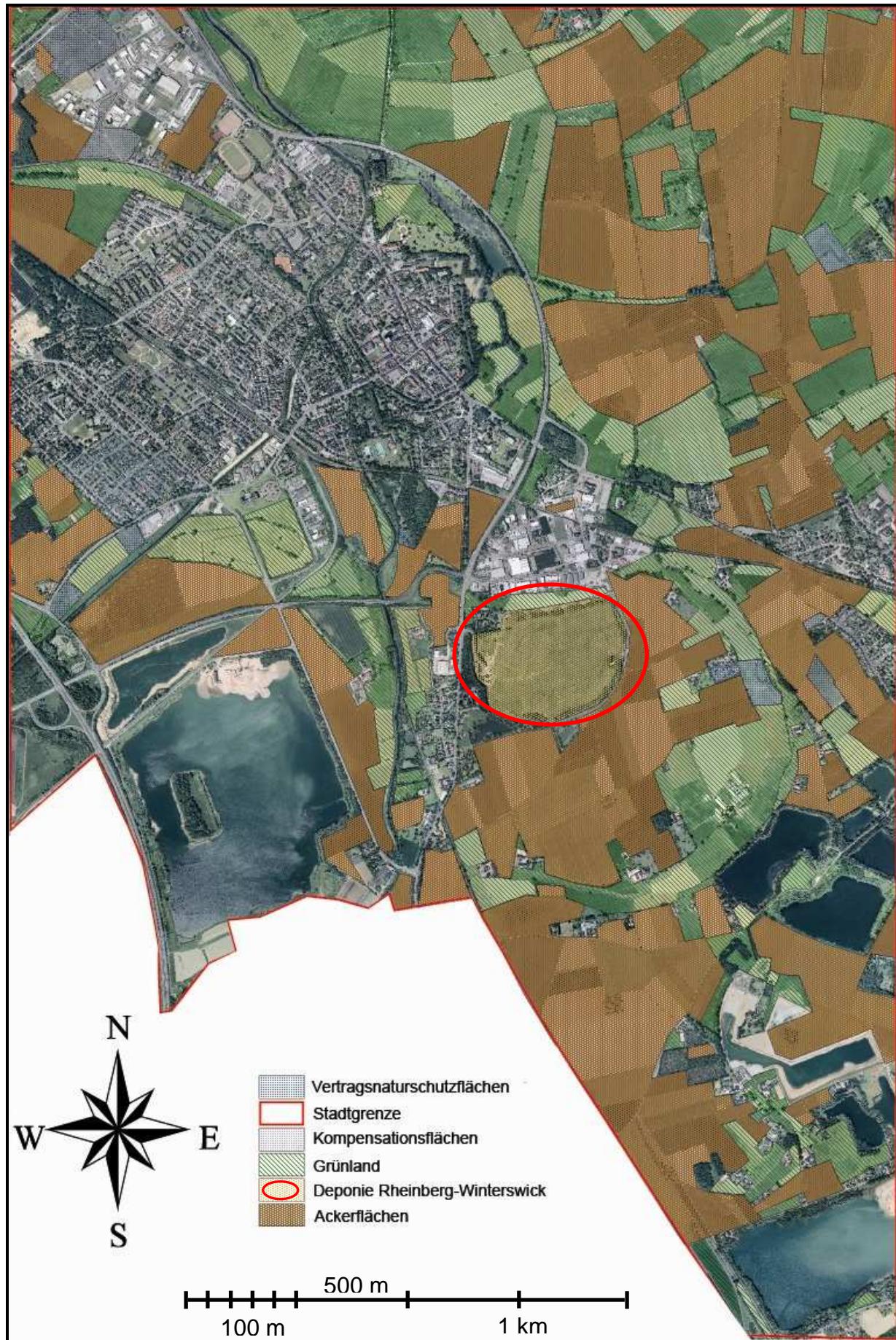
## **Anlagen**

## **Anlage 1**

### **Übersicht der Flächennutzung in Rheinberg Luftbild**

**Auf Grundlage von Luftbildern  
des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen,  
Aufnahmen vom Juni 2006**

## Anlagen



## **Anlage 2**

### **Übersicht der Gebiete mit besonderer ökologischer Bedeutung:**

**Naturschutzgebiete,**

**FFH-Gebiete,**

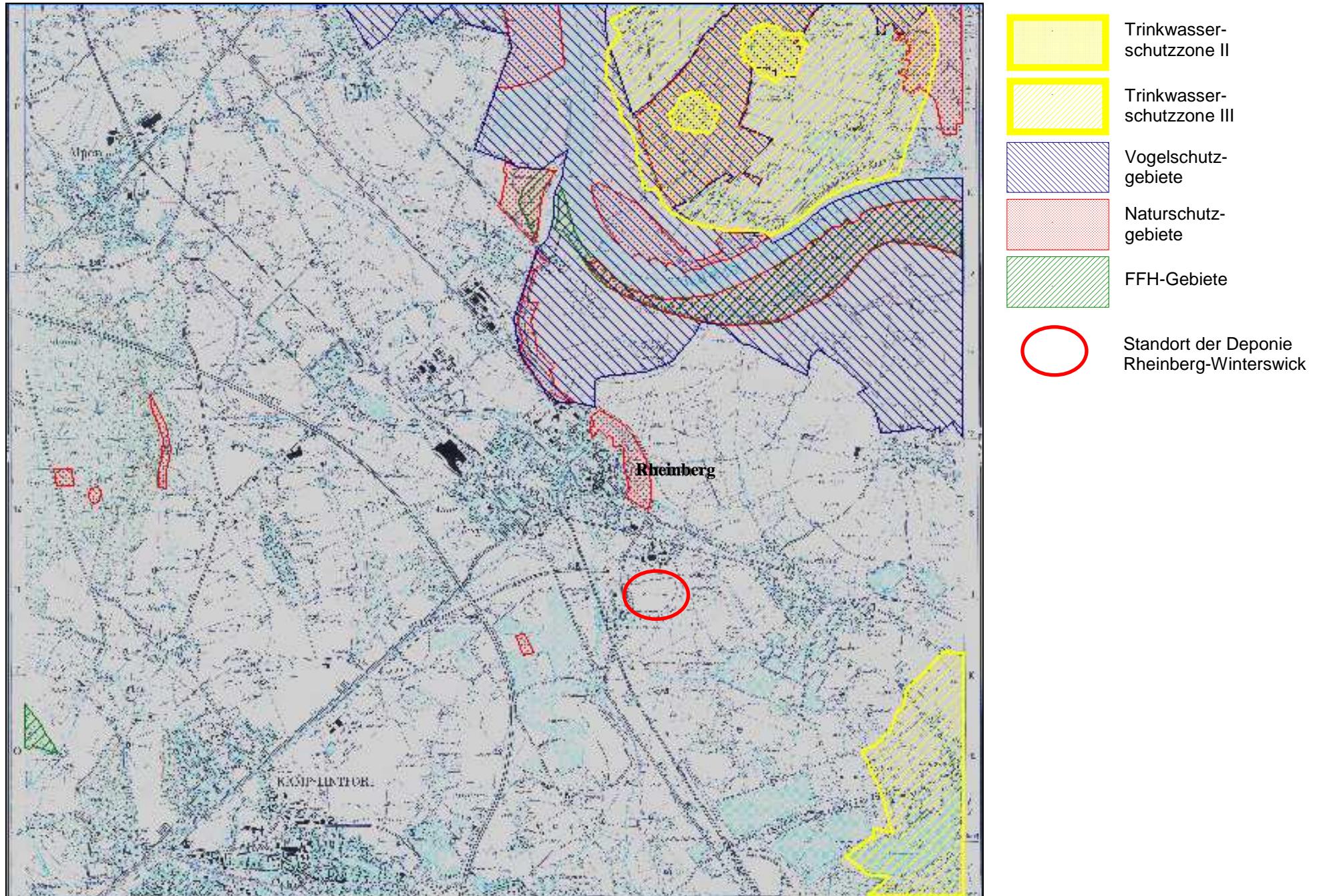
**Vogelschutzgebiete von internationaler Bedeutung und  
Trinkwasserschutzzonen**

**Auf Grundlage der topografischen Karte**

**Blatt 4405 Rheinberg**

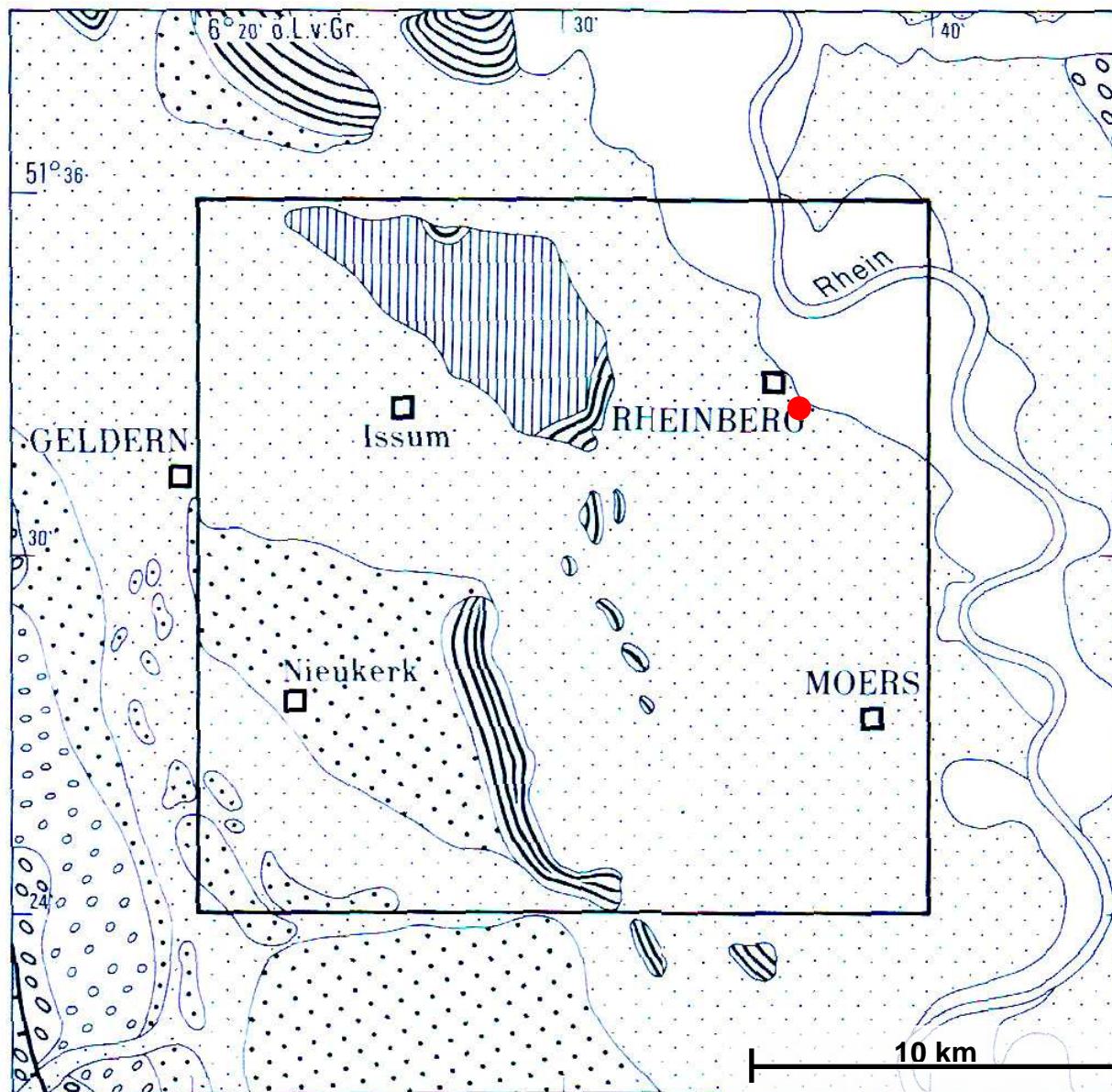
**Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, 1994**

## Anlagen



## **Anlage 3**

**Geologische Übersichtskarte**  
aus der Bodenkarte NRW, Blatt L4504 Moers  
Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, 1968



## Geologische Übersicht

- Holozäne Talaue
- Niederterrasse
- Krefelder Mittelterrasse
- Sanderterrasse
- Stauchmoränenwall
- Obere Mittelterrasse
- Hauptterrasse
- Verwerfung
- Standort Deponie  
Rheinberg-Winterswick

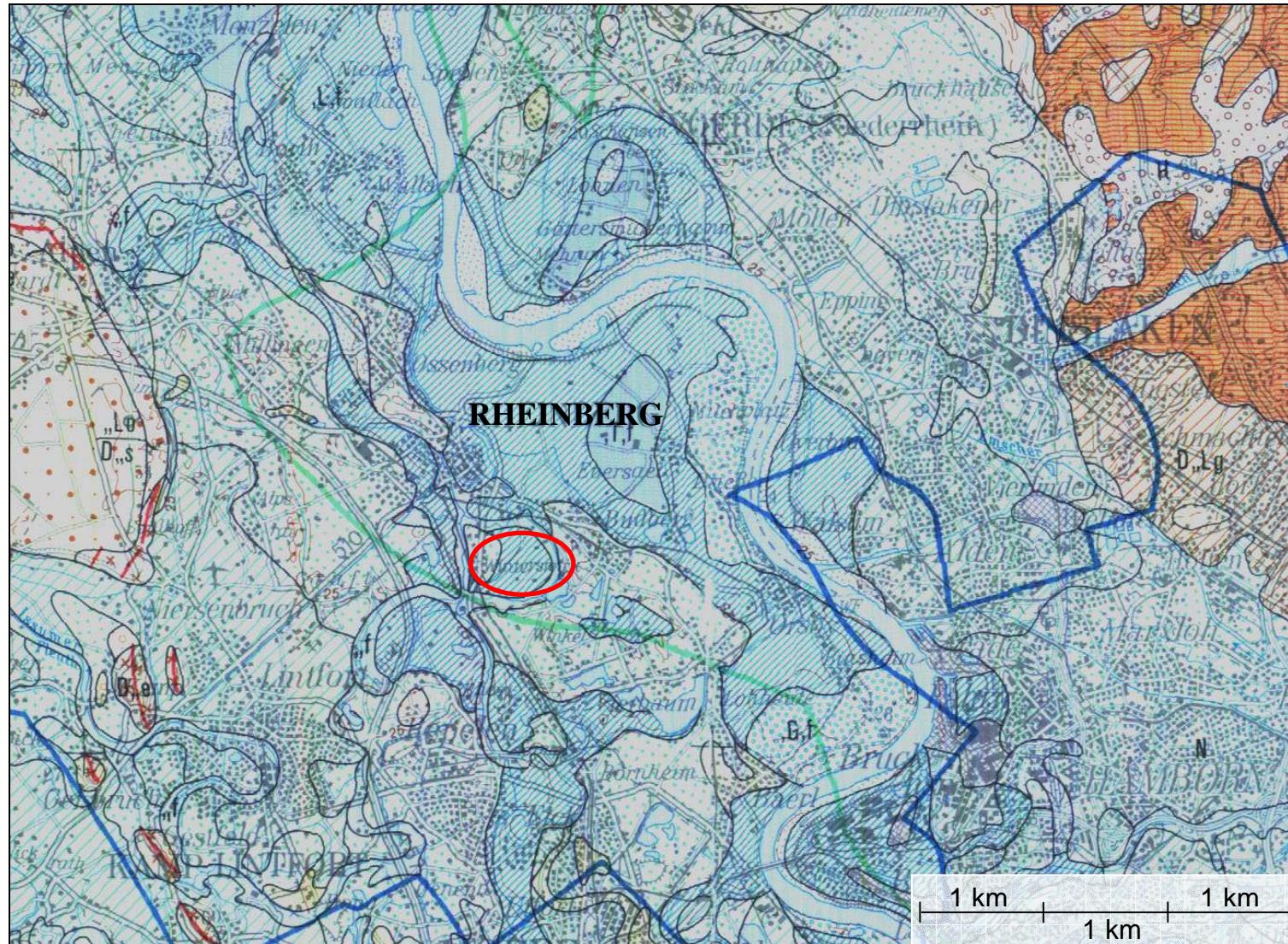
## **Anlage 4**

### **Geologische Übersichtskarte**

**Geologische Übersichtskarte, Blatt CC 4702 Düsseldorf  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe**

## Anlagen

### Quartär



**Hn**

Niedermoor  
fluviale Ablagerungen  
(Auensedimente)

**Lf**    **S,f**    **G,f**  
a) jüngerer Auenlehm  
b) Auensand  
c) Auenkies

**T,f**  
Älterer Auenlehm  
a) vorwiegend sandig

**S,a**  
Flugsand in flächenhafter Verbreitung.  
pleistozän /  
z. T. holozän

**Lo**  
Löß und Sandlöß, äolisch

**N**  
fluviale Ablagerungen, Niederterrasse  
a) unter sandigen Deckschichten  
b) unter Hochflutlehmen

**D,s**  
glazifluviale Ablagerungen, Sander

**D,e**  
Stauch-Endmoräne, meist Untere  
Mittelterrasse, z.T. ältere Ablagerungen

**Mu**  
fluviale Ablagerungen, Untere  
Mittelterrasse

**M**  
fluviale Ablagerungen, Mittelterrasse

**H**  
fluviale Ablagerungen, Hauptterrasse

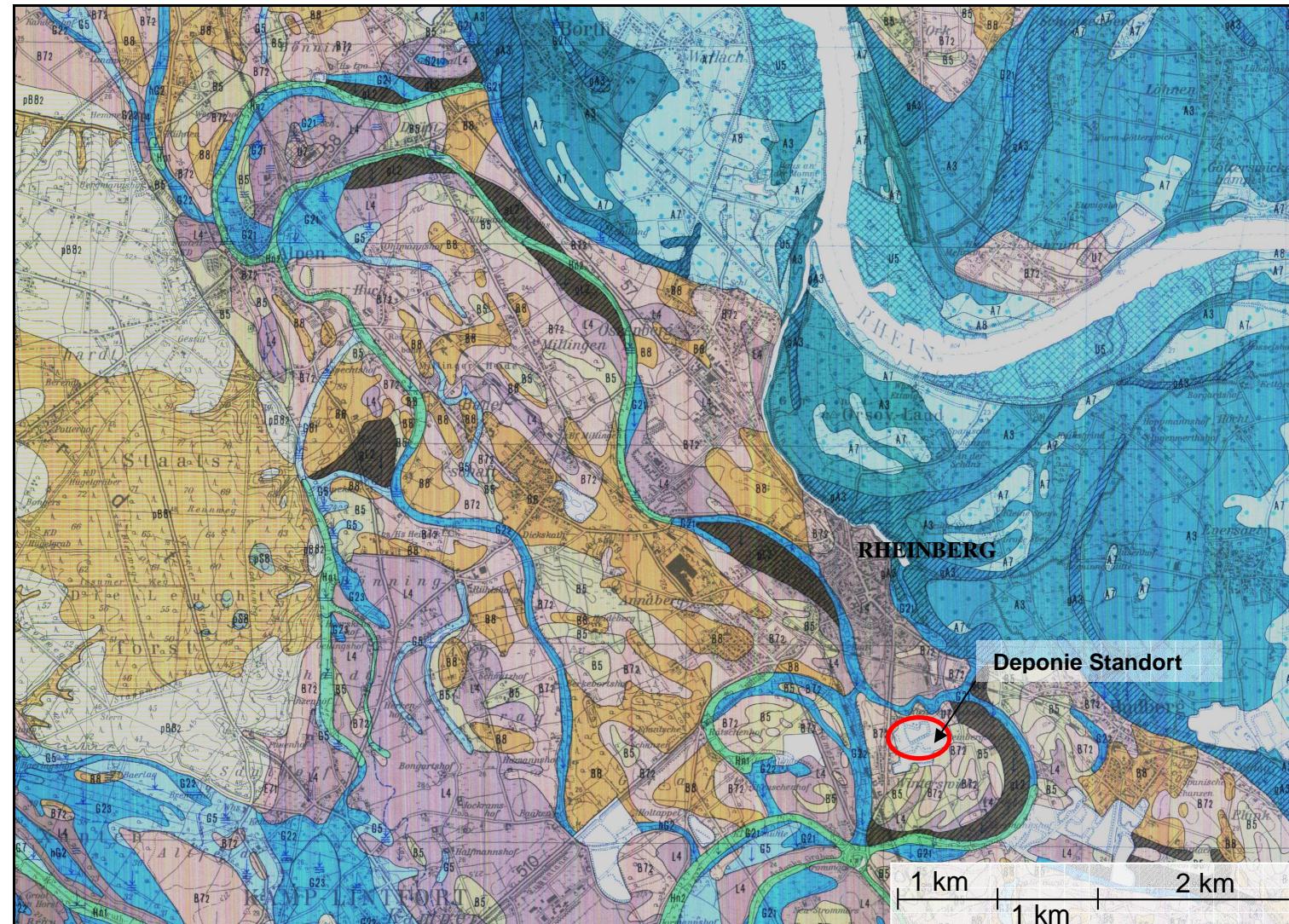
Deponie Rheinberg-Winterswick

## **Anlage 5**

### **Bodentypenkarte NRW**

**Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen, Blatt 4504 Moers,  
Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, 1968**

## Anlagen



## Terrestrische Böden

**L4**  
Parabraunerde, stellenw. Paragley-Braunerde aus Hochflutlehm über Sand und Kies der Niederterasse (Ls4 - Ls2)

**B12**  
Gley-Parabraunerde u. Gley-Braunerde aus Hochflutlehmerungen ü.S. und K. der NT (Lu/Lt2 - Ls2)

**B5**  
Braunerde und Parabraunerde aus sandigem Hochflutlehm über Sand und Kies der NT (Ls4 - Si3)

**B72**  
Braunerde, stellenw. Gley-Braunerde aus sandigem Hochflutlehm über Sand und Kies der NT (Si3 - Si2)

**B8**  
Braunerde, stellenw. Gley-Braunerde aus Flugsand, darunter S. u. K. der NT, stellenw. aus Hochflutsand (fSt2 - fS)

## Semiterrestrische Böden

**A3**  
Brauner Auenboden, stellenw. schwach vergleyt aus Auenlehm ü. Auensand (Lu, c)

**A7**  
Brauner Auenboden aus lehmigem Auensand über Auenlehm, darunter Auensand (fSI2 - fSI4/fSu3, c)

**A8**  
Brauner Auenboden, aus Auensand, stellenw. über Auenlehm, darunter Auensand (sS - fSI2, c)

**gA3**  
Vergleyter Brauner Aueboden aus Auenlehm über Auensand (Lu - Lt/u)

**G21**  
Gley und Auengley aus Auenlehm über Auensand und aus Hochflutlehm ü. S. u. K. der NT (Lt - Lt/u)

**G22**  
Gley, stellenw. Anmoorgley aus tonigen Bachablagerungen oder Hochflutlehm ü. S. u. K. der NT (Lt-Ls2)

**G5**  
Gley, stellenw. Pseudogley-Gley aus sandigem Hochflutlehm ü. S. u. K. der NT (Ls3 - Ls4)

## Anthropogene Böden

**U7**  
Künstlich veränderter Boden aus Lößlehm, Hochflutlehm oder Terassenmaterial (UI2 - SI2, mG)

**U5**  
Künstlich veränderter Boden aus Auenlehm, darunter Bergematerial des Steinkohlebergbaus oder Abraum von Sand- und Kiesgruben (Lu - Ls, mG)

## **Anlage 6**

**Tabellen mit  
Annahmewerten  
für die Lebenszyklusanalyse**

## Annahmen zur Ermittlung der Treibhausgasbilanzen

<b>Allgemeine Annahmen</b>	
N <sub>2</sub> O-Emissionen durch N-Dünung:	1% <sup>1)</sup> des Gesamtstickstoffs emittieren als N <sub>2</sub> O
N <sub>2</sub> O-Emissionen durch NH <sub>3</sub> - und NO <sub>x</sub> -Emissionen (Lagerung und Ausbringung von Gülle):	1% <sup>1)</sup> des gelagerten Stickstoffs emittieren als N <sub>2</sub> O
Pflanzenverfügbarer N/ GVe bzw. m <sup>3</sup> Misch-Gülle	Ø 60 kg N / GVe <sup>2)</sup> bzw. 4,6 kg / m <sup>3</sup> Misch-Gülle
Gasförmige Mehremissionen und Emissionseinsparungen durch die Fermentation von Gülle:	CH <sub>4</sub> : - 4,05 kg / (m <sup>3</sup> Fermentervolumen (Gülle) • a) <sup>2)</sup> NH <sub>3</sub> : 0,85 kg / (m <sup>3</sup> Fermentervolumen (Gülle) • a) <sup>2)</sup> N <sub>2</sub> O: 0
mittlere Verweilzeit im Fermenter:	50 Tage
Transportdistanz von Acker zum Hof/Silo:	10 km
Volumen des landwirtschaftlichen Ladewagens:	2x35 m <sup>3</sup> = 70 m <sup>3</sup> <sup>3)</sup>
Zugmaschine:	150 kW Traktor bei durchschnittlich 20 l/h Dieserverbrauch <sup>3)</sup>
Geschwindigkeit:	40 km/h <sup>3)</sup>
Dieselverbrauch durch die Produktion <sup>4)</sup> von Zuckerrüben:	140 l/ha <sup>4)</sup>
Primärenergieeinsatz und Schadgasemissionen von Diesel:	Primärenergieeinsatz: 39,65 MJ/l CO <sub>2</sub> : 2,93 kg/l <sup>5)</sup> CH <sub>4</sub> : 0,61 g/l <sup>5)</sup> N <sub>2</sub> O: 0,284 g/l <sup>5)</sup>
Wirkungsfaktor in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent/kg Schadstoff:	CO <sub>2</sub> : 1 <sup>6)</sup> CH <sub>4</sub> : 23 <sup>6)</sup> N <sub>2</sub> O: 296 <sup>6)</sup>
Schadgasemissionen der Strombereitstellung durch Kraftwerke:	CO <sub>2</sub> : 0,668 kg/l <sup>5)</sup> CH <sub>4</sub> : 1,46 g/l <sup>5)</sup> N <sub>2</sub> O: 0,025 g/l <sup>5)</sup>
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Gas-Otto-BHKW	CH <sub>4</sub> : 0,07 g/kg Biogas <sup>6)</sup> NO <sub>2</sub> : 0,53 g/kg Biogas <sup>6)</sup>
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Zündstrahl-BHKW (Emissionen des Zündöls sowie aus dem Biogases)	CO <sub>2</sub> **: 155 g/kg Biogas <sup>6)</sup> CH <sub>4</sub> : 0,056 g/kg Biogas <sup>6)</sup> NO <sub>2</sub> : 1,15 g/kg Biogas <sup>6)</sup>
Emissionsgutschrift für die externe Nutzung von Wärme:	-232g CO <sub>2</sub> /kWh <sub>th</sub> <sup>7)</sup>
Dichte von Biogas	1,2 kg/m <sup>3</sup> <sup>8)</sup>
BHKW-Wirkungsgrad:	34% <sup>9)</sup>
interner Stromverbrauch der Biogasanlage:	8%
interner Wärmeverbrauch der Biogasanlage:	40% <sup>9)</sup>
BHKW-Auslastung:	8.000 h/a

1) IPCC 2006

2) EDELMANN et al.. (2001)

3) HEIMANN, 2007 (mündliche Mitteilung)

4) Eckel, 2006

5) KALINSKI, 2003

## Anlagen

---

6) SCHOLWIN et al., 2006

7) BMU, 2007

8) FNR, 2006

9) FELLER, 2005

\*) Alle Vorgänge, die mit dem Anbau- bzw. der Anbaufläche zusammen hängen  
(Saatbettvorbereitung, Saat, Düngen, Ernte)

\*\* der Emissions-Wert für CO<sub>2</sub> bezieht sich nur auf die Emissionen des Zündöls, die Emissionen aus dem Biogas bleiben unberücksichtigt

## Anlagen

---

### Annahmen für die Produktion von Zuckerrüben

Anbaufläche:	100 ha
Ertrag:	65 t FM/ha <sup>1)</sup>
Biogasertrag:	Ø 170 m <sup>3</sup> /t FM <sup>2)</sup>
Methangehalt:	53% <sup>1)</sup>
Energiegehalt von Methan:	9,94 kWh/m <sup>3</sup>
Stickstoffdüngerbedarf / ha bei Ø 4,6 kg Stickstoffentzug / t FM <sup>1)</sup>	300 kg N/ha (maximal 170 kg N / ha aus Wirtschaftsdünger, der Rest muss in Form von Mineraldünger zugegeben werden <sup>3)</sup> )
Wirtschaftsdünger in m <sup>3</sup> : (21.300 kg - 20% Verlust ≈ 17.000 kg N / 100 ha)	21.300 kg N : 4,6 kg N/m <sup>3</sup> Gülle = <b>4.630 m<sup>3</sup> Gülle</b> (= 92,6 m <sup>3</sup> Fermentervolumen)
Mineralischer Dünger in m <sup>3</sup> :	14.500 kg - 10% Verlust ≈ 13.000 kg N / ha
Dieselverbrauch durch die Produktion <sup>*</sup> von Zuckerrüben:	140 l/ha <sup>1)</sup>
Schüttddichte:	0,6 t FM/m <sup>3</sup>

1) Eckel, 2006

2) FNR, 2006

3) Düngeverordnung, Stand 27. Februar 2007

### Grundlagen der Zuckerrübenproduktion zur Ermittlung der Treibhausgas-Bilanz

Zuckerrübenertrag auf 100 ha	<b>6.500 t FM Zuckerrüben</b> (1.105.000 m <sup>3</sup> Biogas)
Energiegehalt von 585.650 m <sup>3</sup> Methan: bei einem elektrischen BHKW-Wirkungsgrad von 34% werden:	5.821.400 kWh <sub>gesamt</sub> 1.979.300 kWh <sub>el</sub> - 8% interner Verbrauch durch die Biogasanlage = <b>1.820.900 kWh<sub>el</sub> erzeugt</b>
bei einem thermischen BHKW -Wirkungsgrad von 56% werden über die Kraft-Wärme-Kopplung:	3.260.000 kWh <sub>th</sub> - 55% interner Wärmeverbrauch = <b>1.467.000 kWh<sub>th</sub> erzeugt</b>
benötigte BHKW-Leistung	<b>228 kW</b>
direkte N <sub>2</sub> O-Emissionen Ausbringung	<b>300 kg N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>
direkte N <sub>2</sub> O-Emissionen organischer Dünger (von 21.300 kg N):	<b>43 kg N<sub>2</sub>O-Emissionen</b> (20 % des NH <sub>3</sub> +NO <sub>x</sub> werden zu 1% zu N <sub>2</sub> O umgewandelt)
indirekte N <sub>2</sub> O-Emissionen mineralischer Dünger:	<b>14,5 kg N<sub>2</sub>O-Emissionen</b> (10 % des NH <sub>3</sub> +NO <sub>x</sub> werden zu 1% zu N <sub>2</sub> O umgewandelt)
Benötigtes Fermentervolumen (nur Gülle) bei einer Verweilzeit von 50 Tagen:	93 m <sup>3</sup>
Gasförmige Mehremissionen und Emissionseinsparungen durch die Fermentation von Gülle:	CH <sub>4</sub> : - 377 kg NH <sub>3</sub> : 79 kg (daraus folgt: N <sub>2</sub> O: 0,79 kg)
Dieselverbrauch für die Zuckerrübenproduktion:	<b>14.000 l Diesel</b>
Primärenergieeinsatz und Schadgasemissionen von Diesel für die Zuckerrübenproduktion:	CO <sub>2</sub> : 41.020 kg CH <sub>4</sub> : 8,54 kg N <sub>2</sub> O: 4 kg
Transport: 42 t Zuckerrüben pro Fahrt	<b>155 Fahrten beladen + 155 Fahrten unbeladen</b>
Fahrtzeit:	77,5 h
Verbrauch:	<b>1.550 l Diesel</b>
Primärenergieeinsatz und Schadgasemissionen von Diesel für den Erntetransport:	CO <sub>2</sub> : 4.500 kg CH <sub>4</sub> : 0,945 kg N <sub>2</sub> O: 0,440 kg
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Gas-Otto-BHKW:	CH <sub>4</sub> : 92,8 kg NO <sub>2</sub> : 703 kg (daraus folgt: 7,0 kg N <sub>2</sub> O)
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Zündstrahl-BHKW	CO <sub>2</sub> <sup>*</sup> : 205.530 kg CH <sub>4</sub> : 76,9 kg NO <sub>2</sub> : 1.525 kg (daraus folgt: 15 kg N <sub>2</sub> O)
7% Zündölanteil erzeugen:	407.500 kWh <sub>gesamt</sub> (127.500 kWh <sub>el</sub> + 102.700 kWh <sub>th</sub> )
CO <sub>2</sub> -Einsparung durch die externe Wärmenutzung:	-340.340 kg CO <sub>2</sub> (+ 23.800 kg CO <sub>2</sub> aus Zündöl-KWK)

\* Der Emissions-Wert für CO<sub>2</sub> bezieht sich nur auf die Emissionen des Zündstrahl BHKW, die Emissionen aus dem Biogas bleiben unberücksichtigt

## Anlagen

---

### Annahmen für die Produktion von Silomais

Anbaufläche:	100 ha
Ertrag:	65 t FM/ha <sup>1)*</sup>
Biogasertrag:	202 m <sup>3</sup> /t FM <sup>1)</sup>
Methangehalt:	53% <sup>1)</sup>
Energiegehalt von Methan:	9,94 kWh/m <sup>3</sup>
Stickstoffdüngerbedarf / ha bei Ø 4 kg Stickstoffentzug / t FM <sup>2)</sup>	<b>260 kg N/ha</b> (maximal 170 kg N / ha aus Wirtschaftsdünger, der Rest muss in Form von Mineraldünger zugegeben werden <sup>3)</sup> )
Wirtschaftsdünger in m <sup>3</sup> : (21.300 kg - 20% Verlust ≈ 17.000 kg / 100 ha)	21.300 kg N : 4,5 kg N/m <sup>3</sup> Gülle = <b>4.630 m<sup>3</sup> Gülle</b> (= 92,6 m <sup>3</sup> Fermentervolumen)
Mineralischer Dünger in m <sup>3</sup> :	12.300 kg - 10% Verlust ≈ 11.000 kg N / ha
Dieselverbrauch durch die Produktion** von Silomais:	105 l/ha <sup>1)</sup>
Schüttdichte:	0,21 t FM/m <sup>3</sup> (gehäckselt) <sup>4)</sup>

1) Eckel, 2006

2) Deutsches Maiskomitee ([www.maiskomitee.de/fb\\_fachinfo/02\\_04\\_05\\_01.htm](http://www.maiskomitee.de/fb_fachinfo/02_04_05_01.htm))

3) Düngeverordnung, Stand 27. Februar 2007

4) LOERS, 2005

\* (höchstes Ertragsniveau für gute Böden am Niederrhein eingesetzt)

\*\* Alle Vorgänge, die mit dem Anbau- bzw. der Anbaufläche zusammen hängen (e.g. Saatbettvorbereitung, Saat, Düngen, Ernte)

## Anlagen

---

### Grundlagen für Silomaisproduktion zur Ermittlung der THG-Bilanz

Silomaisertrag auf 100 ha	<b>6.500 t FM Silomais</b> (1.313.000 m <sup>3</sup> Biogas)
Energiegehalt von 695.900 m <sup>3</sup> Methan: bei einem elektrischen BHKW-Wirkungsgrad von 34% werden:	6.917.100 kWh <sub>gesamt</sub> 2.351.800 kWh <sub>el</sub> - 8% interner Energieverbrauch = <b>2.163.700 kWh<sub>el</sub></b>
bei einem thermischen BHKW -Wirkungsgrad von 56% werden über die Kraft-Wärme-Kopplung: benötigte BHKW-Leistung bei 8000 Betriebsstunden / a	3.873.600 kWh <sub>th</sub> - 55% interner Verbrauch = <b>1.743.100 kWh<sub>th</sub></b> nutzbare Energie <b>270 kW</b>
direkte N <sub>2</sub> O-Emissionen Ausbringung	<b>260 kg N<sub>2</sub>O-Emissionen</b>
indirekte N <sub>2</sub> O-Emissionen organischer Dünger:	<b>43 kg N<sub>2</sub>O-Emissionen</b> (20 % des NH <sub>3</sub> +NO <sub>x</sub> werden zu 1% zu N <sub>2</sub> O umgewandelt)
indirekte N <sub>2</sub> O-Emissionen mineralischer Dünger:	<b>12,3 kg N<sub>2</sub>O-Emissionen</b> (10 % des NH <sub>3</sub> +NO <sub>x</sub> werden zu 1% zu N <sub>2</sub> O umgewandelt)
Benötigtes Fermentervolumen (nur Gülle) bei einer Verweilzeit von Ø 50 Tagen:	93 m <sup>3</sup>
Gasförmige <b>Mehremissionen</b> und Emissionseinsparungen durch die Fermentation von Gülle:	CH <sub>4</sub> : - 375 kg NH <sub>3</sub> : 78,7 kg (daraus folgt: N <sub>2</sub> O: 0,79 kg)
Dieselverbrauch für die Silomaisproduktion:	<b>10.500 l Diesel</b>
Primärenergieeinsatz und Schadgasemissionen von Diesel für die Silomaisproduktion:	CO <sub>2</sub> : 30.765 kg CH <sub>4</sub> : 6,41 kg N <sub>2</sub> O: 3 kg
Transport: 14,7 t Silomais pro Fahrt	<b>440 Fahrten beladen + 440 Fahrten unbeladen</b>
Fahrtzeit:	220 h
Verbrauch:	<b>4.400 l Diesel</b>
Schadgasemissionen von Diesel für den Erntetransport:	CO <sub>2</sub> : 12.900 kg CH <sub>4</sub> : 2,7 kg N <sub>2</sub> O: 1,25 kg
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Gas-Otto-BHKW	CH <sub>4</sub> : 110 kg NO <sub>2</sub> : 835 kg (daraus folgt: 8,4 kg N <sub>2</sub> O)
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Zündstrahl-BHKW	CO <sub>2</sub> <sup>*</sup> : 244.200 kg CH <sub>4</sub> : 90 kg NO <sub>2</sub> : 1.800 kg (daraus folgt: 18 kg N <sub>2</sub> O)
7% Zündölanteil erzeugen:	484.200 kWh <sub>gesamt</sub> (151.500 kWh <sub>el</sub> + 122.000 kWh <sub>th</sub> ) -404.400 kg CO <sub>2</sub> (+ 28.300 kg CO <sub>2</sub> aus Zündöl-KWK)

\* Der Emissions-Wert für CO<sub>2</sub> bezieht sich nur auf die Emissionen des Zündstrahl BHKW, die Emissionen aus dem Biogas bleiben unberücksichtigt

## Anlagen

---

### Annahmen für den Reststoff Zuckerrübenblätter

Anbaufläche:	100 ha
Ertrag:	24-30 FM/ha <sup>1)</sup>
Biogasertrag:	Ø 70 m <sup>3</sup> /t FM bzw. 550-600 m <sup>3</sup> /t oTS <sup>2)</sup>
Methangehalt:	54-55 % <sup>2)</sup>
Gülleanteil:	3.000 m <sup>3</sup>
Benötigtes Fermentervolumen (nur Gülle) bei einer Verweilzeit von Ø 50 Tagen:	60 m <sup>3</sup>
Energiegehalt von Methan:	9,94 kWh/m <sup>3</sup>
Stickstoffdüngerbedarf:	-
Schütteldichte:	0,3 t FM/m <sup>3</sup> (gehäckstelt) <sup>3)</sup>

1) Eckel, 2006

2) FNR, 2006

3) geschätzt

### Grundlagen für Zuckerrübenblätter zur Ermittlung der THG-Bilanz

Ertrag auf 100 ha	<b>3.000 t FM Rübenblätter (210.000 m<sup>3</sup> Biogas)</b>
Energiegehalt von 113.400 m <sup>3</sup> Methan:	1.127.200 kWh <sub>gesamt</sub>
bei einem elektrischen BHKW-Wirkungsgrad von 34% werden:	383.250 kWh <sub>el</sub> - 8% interner Energieverbrauch = <b>352.590 kWh<sub>el</sub></b> nutzbare Energie erzeugt
bei einem thermischen Wirkungsgrad von 56% erzeugt ein BHKW über die Kraft-Wärme-Kopplung pro Tag:	631.230 kWh <sub>th</sub> - 55% interner Verbrauch = <b>284.050 kWh<sub>th</sub></b> nutzbare Energie
benötigte BHKW-Leistung	<b>44 kW</b>
Gasförmige Mehremissionen und Emissionseinsparungen durch die Fermentation von Gülle:	CH <sub>4</sub> : - 243 kg NH <sub>3</sub> : 51 kg (daraus folgt: N <sub>2</sub> O: 0,51 kg)
Transport: 21 t Zuckerrüben-Reste pro Fahrt	<b>143 Fahrten beladen + 143 Fahrten unbeladen</b>
Fahrtzeit:	71
Verbrauch:	<b>1.430 l Diesel</b>
Schadgasemissionen von Diesel für den Erntetransport:	CO <sub>2</sub> : 4.190 kg CH <sub>4</sub> : 0,87 kg N <sub>2</sub> O: 0,406 kg
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Gas-Otto-BHKW	CH <sub>4</sub> : 17,6 kg NO <sub>2</sub> : 134 kg (daraus folgt: 1,6 kg N <sub>2</sub> O)
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Zündstrahl-BHKW	CO <sub>2</sub> <sup>*</sup> : 39.060 kg CH <sub>4</sub> : 14 kg NO <sub>2</sub> : 290 kg (daraus folgt: 2,9 kg N <sub>2</sub> O)
7% Zündölanteil erzeugen:	78.900 kWh <sub>ges</sub> (24.680 kWh <sub>el</sub> + 19.880 kWh <sub>th</sub> )
CO <sub>2</sub> -Einsparung durch die externe Wärmenutzung:	-65.900 kg CO <sub>2</sub> (+ 4.600 kg CO <sub>2</sub> aus Zündöl-KWK)

\* Der Emissions-Wert für CO<sub>2</sub> bezieht sich nur auf die Emissionen des Zündstrahl BHKW, die Emissionen aus dem Biogas bleiben unberücksichtigt

## Anlagen

---

Annahmen für Rindegülle	
Anzahl Rinder:	300 Tiere
GVe ( $\varnothing$ 0,7 Rinder = 1 GVe <sup>1)</sup> )	210 GVe
durchschnittliches Gülleaufkommen:	$11,8 \text{ m}^3 / (\text{GVe} \cdot \text{a})$ <sup>2)</sup>
durchschnittlicher Biogasertrag:	$402 \text{ m}^3 / (\text{GVe} \cdot \text{a})$ <sup>2)</sup>
durchschnittlicher pflanzenverfügbarer Stickstoffgehalt pro $\text{m}^3$ Rindergülle:	4,8 kg / $\text{m}^3$ <sup>3)</sup>
Methangehalt:	55 % <sup>4)</sup>
Transportdistanz von der Güllegrube bis zur Biogasanlage:	1 km
Volumen des landwirtschaftlichen Güllewagens:	18 $\text{m}^3$
Dieselverbrauch des Güllewagens:	20 l / h
Geschwindigkeit des Güllewagens:	$\varnothing$ 30 km / h

1) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg ([www.statistik-portal.de/Landwirtschaft/  
Erlaeuterungen.asp](http://www.statistik-portal.de/Landwirtschaft/Erlaeuterungen.asp))

2) WETTER C., BRÜGGING, E., 2005

3) LWK NRW 2007

4) EDER & SCHULZ, 2006

5) EDELMANN et al., 2001

## Anlagen

---

### Grundlagen für Rindergülle zur Ermittlung der THG-Bilanz

durchschnittliches Gülleaufkommen von 210 GVe / a:	<b>2.480 m<sup>3</sup> / a</b>
benötigtes Fermentervolumen (durchschnittliche Verweilzeit 50 d):	50 m <sup>3</sup>
durchschnittlicher Biogasertrag von 210 GVe / a:	84.420 m <sup>3</sup> (46.430 m <sup>3</sup> Methan)
Energiegehalt von 48.430 m <sup>3</sup> Methan:	481.400 kWh <sub>gesamt</sub>
bei einem elektrischen BHKW-Wirkungsgrad von 34% werden:	163.700 kWh <sub>el</sub> - 8% interner Energieverbrauch = <b>150.580 kWh<sub>el</sub></b> nutzbare Energie erzeugt
bei einem thermischen Wirkungsgrad von 56% erzeugt ein BHKW über die Kraft-Wärme-Kopplung pro Tag:	269.580 kWh <sub>th</sub> - 55% interner Verbrauch <sup>1)</sup> = <b>121.300 kWh<sub>th</sub></b> nutzbare Energie
benötigte BHKW-Leistung	<b>20 kW</b>
Gasförmige Emissionsminderung durch die Fermentation von 2.480 m <sup>3</sup> Rindergülle:	CH <sub>4</sub> : - 203 kg NH <sub>3</sub> : 42,5 kg (daraus folgt: 0,43 kg N <sub>2</sub> O)
Transport: 18 m <sup>3</sup> Gülle pro Fahrt:	<b>138 Fahrten beladen + 138 Fahrten unbeladen</b>
Fahrtzeit:	9,2 h
Diesel-Verbrauch:	<b>184 l Diesel</b>
Schadgasemissionen von Diesel für den Gülletransport:	CO <sub>2</sub> : 540 kg CH <sub>4</sub> : 0,112 kg N <sub>2</sub> O: 0,052 kg
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Gas-Otto-BHKW	CH <sub>4</sub> : 7,09 kg NO <sub>2</sub> : 53,7 kg (daraus folgt: 0,54 kg N <sub>2</sub> O)
Emissionen durch die Stromerzeugung mittels eines Zündstrahl-BHKW	CO <sub>2</sub> <sup>*</sup> : 15.700 kg CH <sub>4</sub> : 5,67 kg NO <sub>2</sub> : 116 kg (daraus folgt: 1,6 kg N <sub>2</sub> O)
7% Zündölanteil erzeugen:	33.700 kWh <sub>ges</sub> (10.540 kWh <sub>el</sub> + 8.500 kWh <sub>th</sub> )
CO <sub>2</sub> -Einsparung durch die externe Wärmennutzung:	-28.140 kg CO <sub>2</sub> (+ 1.970 kg CO <sub>2</sub> aus Zündöl-KWK)

\* Der Emissions-Wert für CO<sub>2</sub> bezieht sich nur auf die Emissionen des Zündstrahl BHKW, die Emissionen aus dem Biogas bleiben unberücksichtigt

## **Anlage 7**

### **Spezifische Eigenschaften der organischen Substrate zur Biogaserzeugung**

## Anlagen

---

Substrateigenschaften					Gasertrag und Eigenschaften		
Substrat	TS	davon oTS <sup>1)</sup>	oTS <sup>1)</sup>	Flächen- ertrag	Biogasertrag	Methan- gehalt	Methanertrag
	[%]	[%]	[%]	[t FM/ha]	[m <sup>3</sup> /t FM]	[%]	[m <sup>3</sup> /t FM]
<b>Getreide</b>							
<b>Körnergetreide</b>	87	98	85,26		[597]	53	316
Winterweizen				5,9 - 10			
Winterroggen				4,3 - 7,5			
Wintertriticale				3,8 - 7			
<b>Ganzpflanzen- Silage</b>	35	94	32,9		171	52	89
Winterweizen				50			
Winterroggen				40			
Wintertriticale				36			
<b>Getreidestroh</b>							
Weizen	86 <sup>2)</sup>	92 <sup>2)</sup>	79	7 - 11	232 <sup>2)</sup>	51 <sup>2)</sup>	118 <sup>1)</sup>
Roggen				4,5 - 9			
Triticale				5 - 9			
<b>Mais</b>							
Silomais	35	96	33,6	40 - 60	202	52	105
Körnermais	70			8 - 11			
CCM	60	96	57,6	11 - 13	390	53	206
<b>Zuckerrüben</b>							
Rübe	23 <sup>3)</sup>	90-95 <sup>3)</sup>	21-22	40 - 70	170-180 <sup>3)</sup>	53-54 <sup>3)</sup>	97,2 <sup>1)</sup>
Blatt, frisch	16 <sup>3)</sup>	75 - 80 <sup>3)</sup>	12 - 13	24 - 42	ca. 86 <sup>2)</sup>	54 <sup>2)</sup>	
<b>Futterrübe (Massenrübe)</b>							
Rübe	12 <sup>3)</sup>	75-85 <sup>3)</sup>	9 - 10,5	80 - 120	75-100 <sup>3)</sup>	53-54 <sup>3)</sup>	57
Blatt, frisch	16 <sup>3)</sup>	75 - 80 <sup>3)</sup>	12 - 13	24 - 42	ca. 70 <sup>3)</sup>	45-55 <sup>3)</sup>	
<b>Kartoffeln</b>	22 <sup>2)</sup>	94 <sup>2)</sup>	20,7	25 - 75	134 <sup>2)</sup>	52 <sup>2)</sup>	70 <sup>1)</sup>
<b>Leguminosen- Grasgemenge (Silage)</b>							
	35	88	30,8	26 - 43	172	54	93
<b>Dauergrünland (Grassilage)</b>							
	35	88	30,8	20 - 34	172	54	93
<b>Heu von extensiven Wiesen, einschürig<sup>4)</sup></b>	21,6	94	20,3	0,84	74	53	39,2

## Anlagen

---

Substrateigenschaften					Gasertrag und Eigenschaften		
	TS [%]	davon oTS [%]	oTS [%]	1 GVE entspricht [Tiere]	Biogas- ertrag [m³/t FM]	Methan- gehalt [%]	Methan- ertrag [m³/t FM]
<b>Mist und Gülle</b>							
Hühnermist	ca. 32 <sup>3)</sup>	63-80 <sup>3)</sup>	20-26 <sup>1)</sup>	ca. 227 <sup>5)</sup>	70-90 <sup>3)</sup>	60 <sup>3)</sup>	42 - 54 <sup>1)</sup>
Rindergülle	8-11 <sup>3)</sup>	75-82 <sup>3)</sup>	6-9 <sup>1)</sup>	3,3 - 1 <sup>5)</sup>	20 - 30 <sup>3)</sup>	60 <sup>3)</sup>	12 - 18 <sup>1)</sup>
Schweinegülle	ca. 7 <sup>3)</sup>	75-86 <sup>3)</sup>	5,3-6 <sup>1)</sup>	3,3 - 50 <sup>5)</sup>	20-35 <sup>3)</sup>	60-70 <sup>3)</sup>	12 - 24,5 <sup>1)</sup>
<b>Schlachtabfälle</b>							
Panseninhalt	11-19 <sup>3)</sup>	80-90 <sup>3)</sup>	9 - 17 <sup>1)</sup>		202 - 60 <sup>3)</sup>	58-62 <sup>3)</sup>	
Flotatschlamm	5-24 <sup>3)</sup>	80-95 <sup>3)</sup>	4 - 23 <sup>1)</sup>		35 - 280 <sup>3)</sup>	60-72 <sup>3)</sup>	
Fettabstreicher- rückstad	2 - 70 <sup>3)</sup>	75-93 <sup>3)</sup>	1,5 - 65 <sup>1)</sup>		11 - 450 <sup>3)</sup>	60-72 <sup>3)</sup>	
<b>Bioabfall</b>	40 - 75 <sup>3)</sup>	50 - 70 <sup>3)</sup>	20 - 52,5 <sup>1)</sup>		80 - 120 <sup>3)</sup>	58 - 65 <sup>3)</sup>	

1) berechnet

2) KTBL, 2005

3) FNR, 2006

4) RÖSCH et al., 2007

5) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg ([www.statistik-portal.de/Landwirtschaft/  
Erlaeuterungen.asp](http://www.statistik-portal.de/Landwirtschaft/Erlaeuterungen.asp))

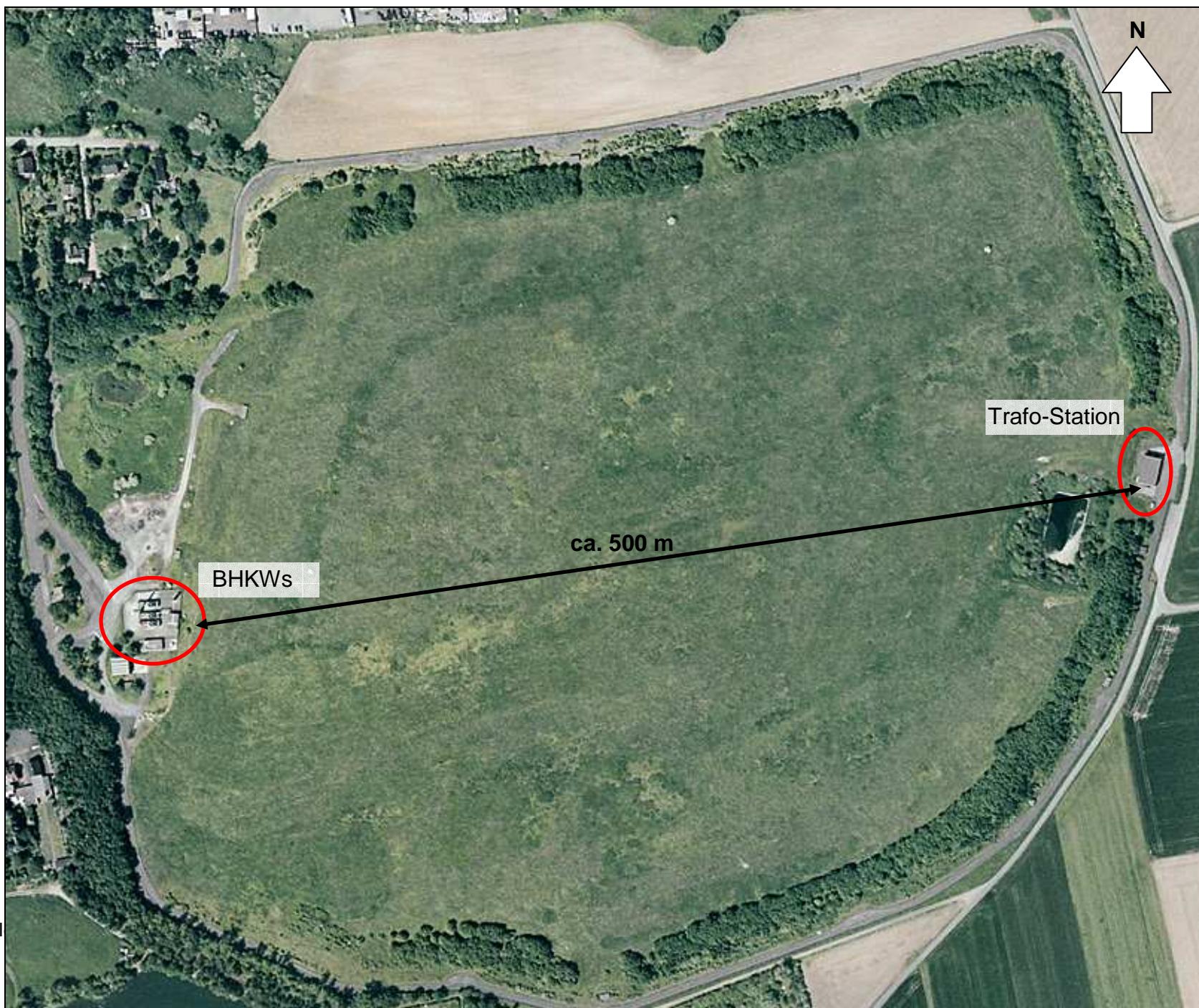
6) EDER & SCHULZ, 2006

## **Anlage 8**

### **Luftbild der Deponie Rheinberg-Winterswick**

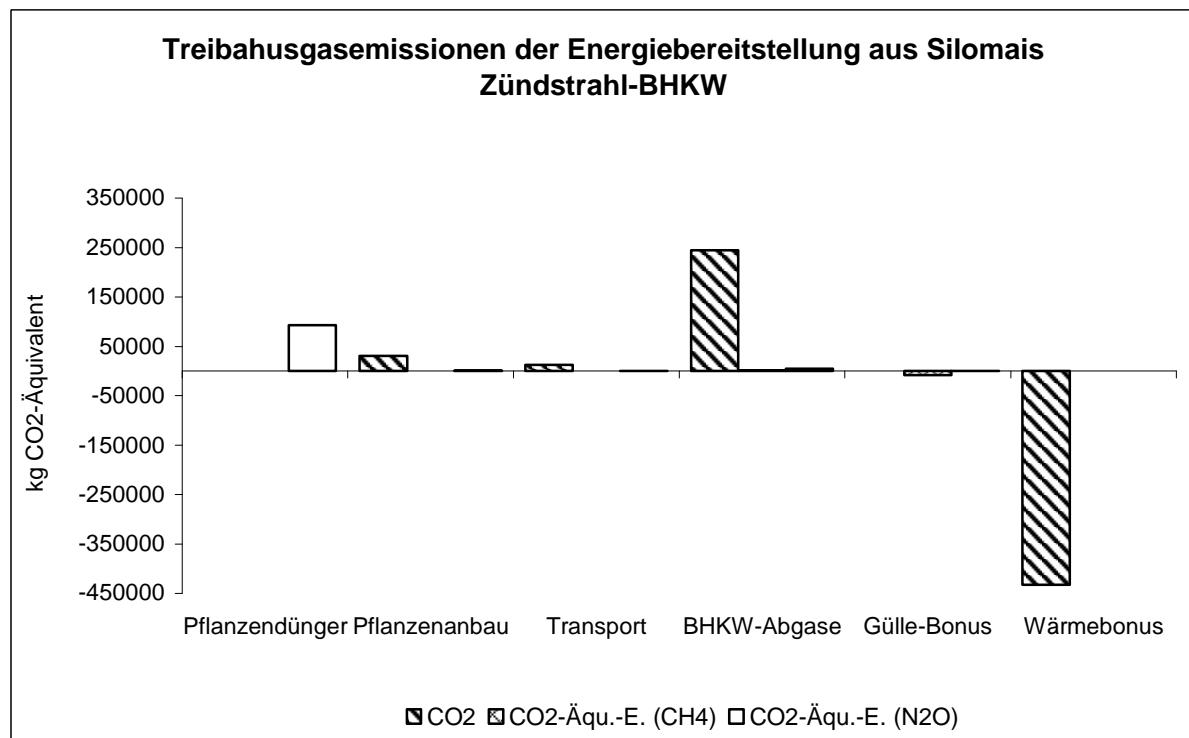
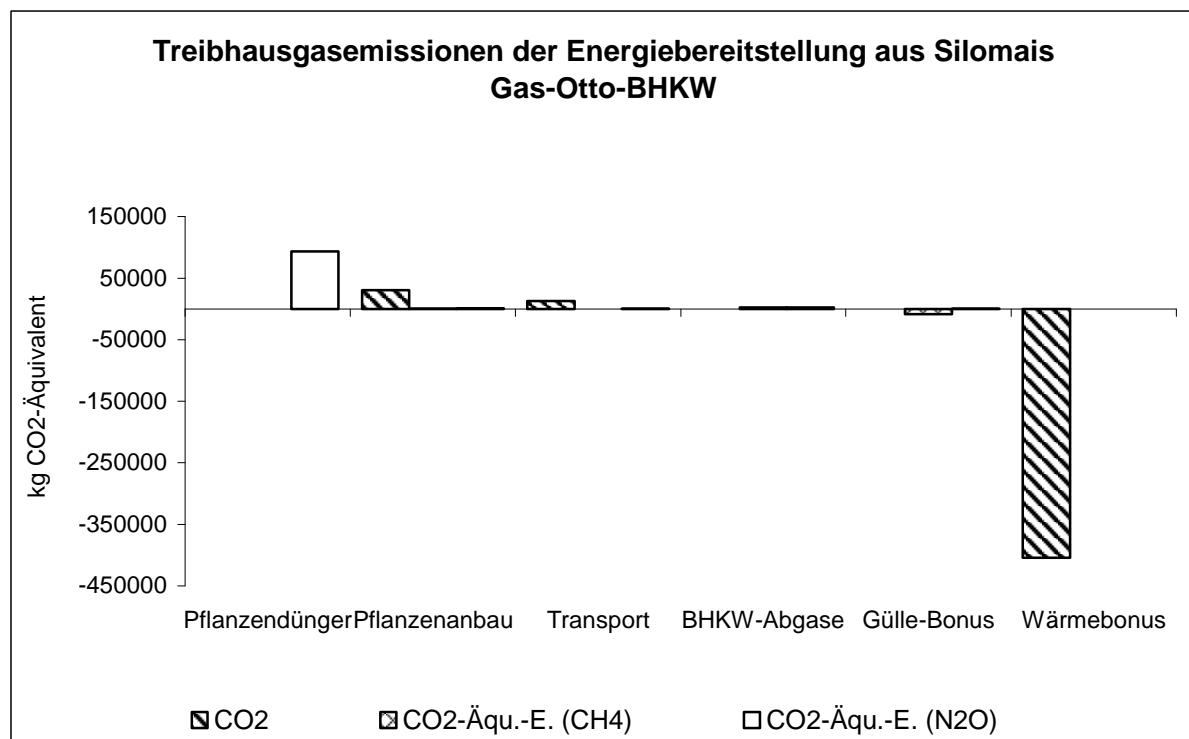
## Anlagen

---

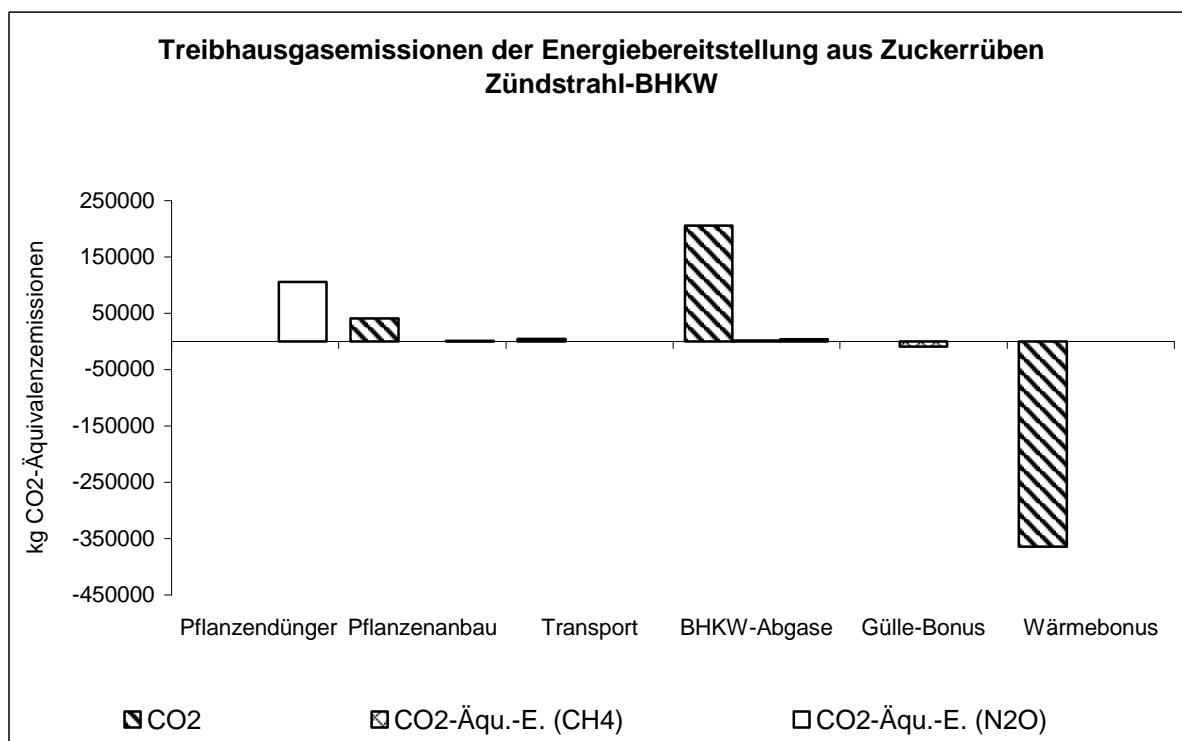
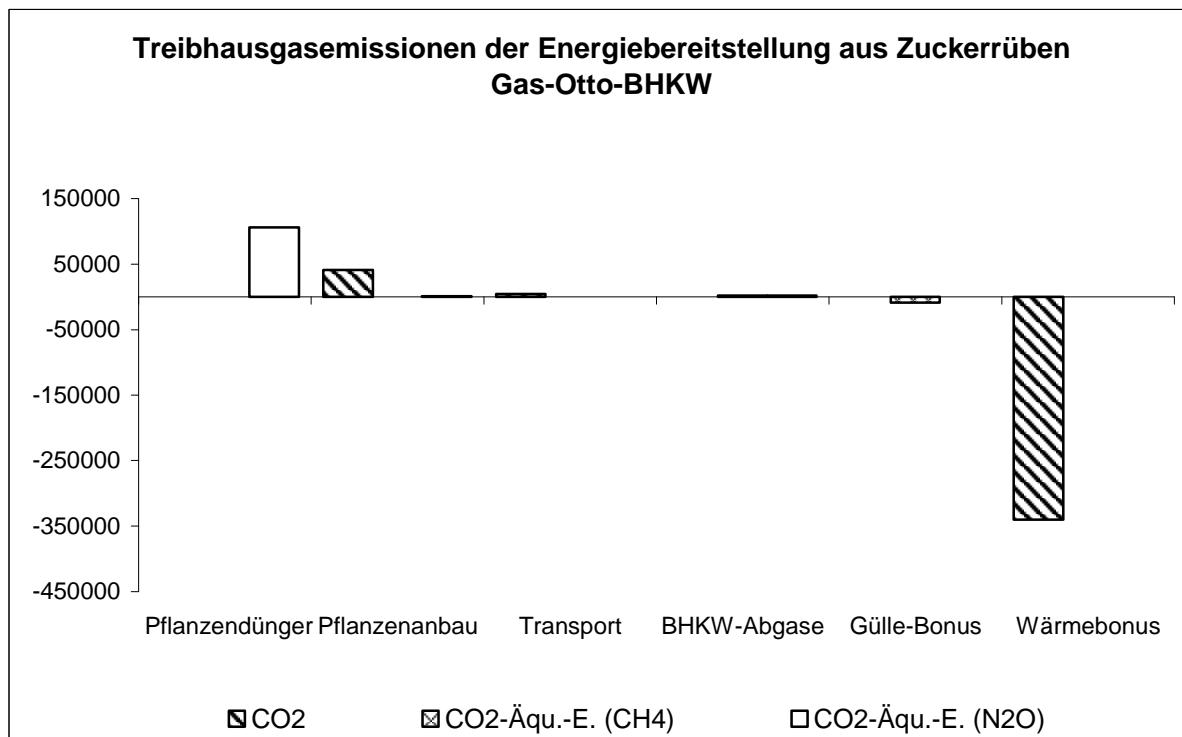


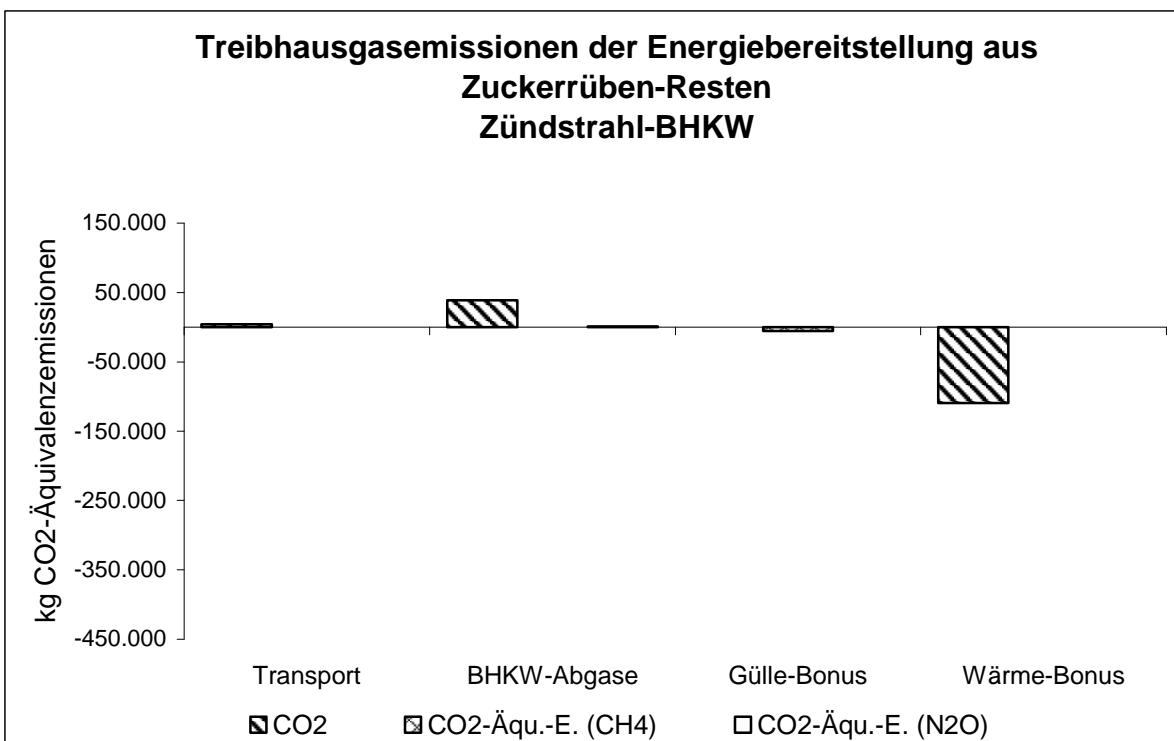
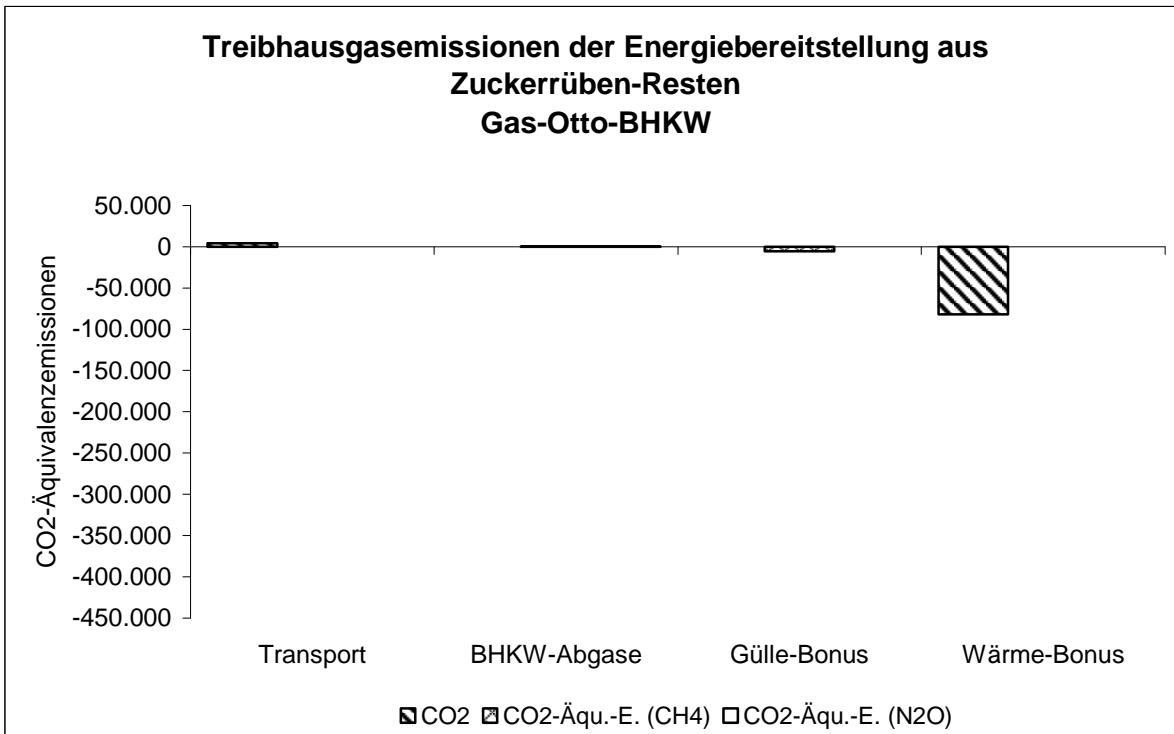
## **Anlage 8**

### **Grafische Darstellungen der Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse**



## Anlagen





## **Erklärung**

---

### **Erklärung**

Hiermit bestätige ich, dass ich die von mir am heutigen Tag im Studiengang Landschaftsökologie des Fachbereiches Geowissenschaften an der WWU Münster eingereichte Diplomarbeit zum Thema:

**Konzeption  
zum ökologisch nachhaltigen Betrieb  
einer Biogasanlage am stillgelegten Deponiestandort  
Rheinberg-Winterswick**

vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Münster, den \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (Datum)

\_\_\_\_\_ (Unterschrift)