

Universität Kassel

Fachbereich 11 Witzenhausen
Ökologische Agrarwissenschaften

Diplomarbeit

Modellkonzept zur effizienten Nutzung
von Biogas aus
nachwachsenden Rohstoffen und Bioabfällen

vorgelegt im Fachgebiet
Betriebswirtschaft von:

Hannes Wendel
am 18. September 2006

Betreuer : Prof. Dr. D. Möller & Dr. C. Bruns
Steinstrasse 19 Nordbahnhofstrasse 1a
37213 Witzenhausen 37213 Witzenhausen

In Kooperation mit der



Ingenieurgesellschaft
Witzenhausen
Fricke & Turk GmbH
Bischhäuser Aue 12
37213 Witzenhausen



Danksagung

Ich bedanke mich bei Prof. Dr. D. Möller und bei Dr. C. Bruns für die Betreuung dieser Arbeit. Dank geht auch an die Ingenieursgemeinschaft Witzenhausen, die Vogteier Kompost GmbH sowie an die Stadtwerke Witzenhausen für die Bereitstellung wichtiger Daten. Namentlich möchte ich deshalb Dipl. Ing. A. Hüttner (IGW), Herrn Dr. G. Schütz (Vogteier Kompost GmbH), Herrn W. Bauchrowitz (Stadtwerke Witzenhausen) und dem Landwirt Herrn F. Schuh meinen Dank aussprechen. Sie konnten in lebendigen Diskussionen einige Fragen klären, zeigten reges Interesse an der Projektidee und werden eventuell dabei helfen das Konzept zukünftig in die Praxis umzusetzen.

Allen anderen Personen und Institutionen, die mir im Rahmen dieser Arbeit Rede und Antwort standen, hier jedoch nicht erwähnt wurden, möchte ich natürlich auch von ganzem Herzen für deren Unterstützung und Engagement danken.

Witzenhausen im September 2006

Hannes Wendel

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Zusammenfassung.....	X
1. Einleitung.....	1
2. Entwicklung und Situation auf dem Biogassektor.....	4
2.1 Entwicklungsgeschichte des Biogassektors.....	4
2.2 Aktuelle Marktsituation (national).....	6
3. Entstehung und Nutzung von Biogas.....	11
3.1 Entstehung und Zusammensetzung von Biogas.....	11
3.2 Aufbau und Technik der Gärbehälter (Fermenter).....	14
3.3 Energetische Nutzungsmöglichkeiten von Biogas.....	19
3.3.1 Blockheizkraftwerk (BHKW).....	19
3.3.2 Mikrogasturbine.....	20
3.3.3 Gasaufbereitung.....	21
3.3.4 Brennstoffzelle.....	23
3.3.5 Einspeisung ins Erdgasnetz	25
4. Modellkonzept.....	26
4.1 Entwicklung des Grundgedanken.....	26
4.2 Aufbau der vorhandenen Infrastruktur.....	26
4.3 Konzeptidee.....	29
4.4 Akzeptanz der Biogasanlage am vorgesehenen Standort.....	32
5. Potentialanalyse zur Vergärung von Presssaft aus Bioabfällen.....	34
5.1 Probennahme.....	34
5.2 Material und Methoden des Vergärungsversuches.....	35
5.2.1 Material.....	35
5.2.2 Methoden des Gärversuchs.....	36
5.3 Ergebnisse des Vergärungsversuchs.....	39
6. Energiepflanzenanbau.....	41
6.1 Allgemeine Ausgangslage.....	41
6.2 Aktuelle Anbaupraxis.....	42
7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Konzeptes.....	45
7.1 Unternehmen A (Bioabfallvergärung).....	45
7.1.1 Investitionskosten.....	46
7.1.2 Kalkulatorische jährliche Kosten.....	47
7.1.3 Gewinnabschätzungen.....	49
7.1.4 Sensitivitätsanalyse.....	51

7.2 Zwischenresümee.....	52
7.3 Unternehmen B (NawaRo-Biogasanlage).....	53
7.3.1 Investitionskosten.....	54
7.3.2 Kalkulatorische jährliche Kosten.....	55
7.3.3 Gewinnabschätzungen.....	57
7.3.4 Sensitivitätsanalyse.....	58
7.4 Betrachtung des Konzeptverbundes.....	59
8. Schlussfolgerung.....	61
9. Fazit.....	64
10. Ausblick auf die Realisierungsphase.....	65
10.1 Umsetzung des Modellkonzeptes.....	65
10.2 Schritte der Realisierungsphase.....	65
10.3 Mögliche Folgeeffekte in der Region.....	66
Literaturverzeichnis.....	67
Internetquellen.....	71
Erklärung.....	72
Anhang.....	73

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 2.1 Neuzubau in elektrischer Leistung (MW).....	6
Abbildung 2.2 Aktueller Stand der Biogasanlagen in der Landwirtschaft.....	6
Abbildung 2.3 Substrateinsatz in Biogasanlagen.....	7
Abbildung 2.4 Vergütungsstrukturen nach EEG 2005.....	7
Abbildung 2.5 Wärmeerzeugung von Biogasanlagen.....	8
Abbildung 2.6 Bruttobeschäftigung in der Branche der EE.....	9
Abbildung 2.7 Entwicklung Erneuerbarer Energien in Deutschland.....	10
Abbildung 3.1 Vier Phasen der Biogasentstehung.....	11
Abbildung 3.2 Aufbau eines stehenden Betonfermenters.....	14
Abbildung 3.3 Paddelrührwerk und Tauchmotorrührwerk.....	15
Abbildung 3.4 Eintragschnecke mit Vorratsbehälter.....	15
Abbildung 3.5 Drehkolbenpumpe und Exzentrerschneckenpumpe.....	16
Abbildung 3.6 Schema des UASB-Reaktors.....	17
Abbildung 3.7 Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung.....	19
Abbildung 3.8 Verfahrensablauf der Druckwasserwäsche.....	22
Abbildung 3.9 Funktionsprinzip der Brennstoffzelle.....	24
Abbildung 4.1 Nahwärmenetz Steinstrasse.....	27
Abbildung 4.2 Verbrauchsübersicht Nahwärmenetz Steinstraße.....	28
Abbildung 4.3 Skizze Modellprojekt Witzenhausen.....	29
Abbildung 4.4 Verlauf der Biogasleitung in Witzenhausen.....	30
Abbildung 5.1 Probennahme Bioabfälle.....	34
Abbildung 5.2 Ablauf Separationsverfahren Biotonne.....	35
Abbildung 5.3 Verteilung der Inhaltsstoffe des Ausgangssubstrates auf die Fraktionen..	36
Abbildung 5.4 Methanausbeute Biotonnenpresssaft.....	39
Tabelle 2.1 Gegenüberstellung der alten und neuen Grundvergütung nach EEG.....	7
Tabelle 3.1 Brenntechnische Kenndaten verschiedener Gasqualitäten.....	21
Tabelle 4.1 Wärmeverbrauch des Nahwärmenetzes Steinstraße im Jahresmittel.....	27
Tabelle 6.1 Kalkulation der Produktionskosten verschiedener Energiepflanzen.....	43
Tabelle 7.1 Berechnung von Eigen- und Fremdkapital A.....	46
Tabelle 7.2 Betriebskostenaufstellung Unternehmen A.....	48
Tabelle 7.3 Ermittlung des Unternehmergewinns A.....	50
Tabelle 7.4 Sensitivität Szenario I, II und III im Vergleich.....	51
Tabelle 7.5 Berechnung von Eigen- und Fremdkapital B.....	57
Tabelle 7.6 Betriebskostenaufstellung Unternehmen B.....	56
Tabelle 7.7 Ermittlung des Unternehmergewinns B.....	57
Tabelle 7.8 Sensitivität bei Substratkostensteigerung.....	58
Tabelle 7.9 Sensitivität der Unternehmen bei kooperativer Produktion.....	59

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
Ø	durchschnittlich
€	Euro
a	Jahr
A_{CH_4}	Methanausbeute [I_N]
Abb.	Abbildung
Afa	Absetzung für Abnutzung
AKh	Arbeitskraftstunden
Anschw.	Anschaffungswert
BEE	Bundesverband Erneuerbare Energie e. V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BimSchV	Bundes-Immissionsschutz-Verordnung
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BStBl	Bundessteuerblatt
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CH ₄	Methan (chemische Formel)
C/N	Kohlenstoff/Stickstoff (chemische Formel)
CO	Kohlenmonoxid (chemische Formel)
CO ₂	Kohlendioxid (chemische Formel)

CSB	chemischer Sauerstoffbedarf [g/l _N]
ct	Cent
d	Tag
DLR	Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.
DWW	Druckwasserwäsche
e	Einwaage
EE	Erneuerbaren Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
el	elektrisch
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
FB	Fachbereich
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
FOS	flüchtige organische Säuren
FWL	Feuerungswärmeleistung
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPS	Ganzpflanzensilage
GW	Gesamtwirkungsgrad
h	Stunden
H ₂	Wasserstoff (chemische Formel)
ha	Hektar

HeRo	Hessen Rohstoffe
HLUMV	Hessisches Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt- und Verbraucherschutz
H ₂ O	Wasser (chemische Formel)
H ₂ S	Schwefelwasserstoff (chemische Formel)
IE	Institut für Energetik und Umwelt
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
IGW	Ingenieurgesellschaft Witzenhausen
inkl.	inklusive
ISSET	Institut für Solare Energietechnik
K	Kelvin
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KrWAbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
l	Liter
LHL	Landesbetrieb Hessisches Landeslabor
LLH	Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen
l _N	Normliter
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche
m	Masse
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter

mbar	Millibar
mm	Millimeter
MCFC	Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen
Mg	Megagramm
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunden
MZ	Methanzahl
N	Stickstoff (chemische Formel)
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
Nm ³	Normkubikmeter
O ₂	Sauerstoff (chemische Formel)
ORC	Organic-Rankine-Cycle
OS	organische Substanz
oTM	organische Trockenmasse [kg/m ³]
oTS	organische Trockensubstanz [kg/m ³]
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PET	Polyethylen
ph	neg. dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration = Säuregrad
ppm	parts per million
SOFC	Oxidkeramische-Brennstoffzellen
StrEG	Stromeinspeisungsgesetz
therm	thermisch
t	Tonne

TM	Trockenmasse [%]
TS	Trockensubstanz [%]
TWh	Terawattstunden
U / min	Umdrehungen pro Minute
USAB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket-Reaktor
V	Volt
V _{CH₄}	Methanvolumen [l]
VDI	Verein deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
Vol.	Volumen [%]
η	Wirkungsgrad [%]
η_{Gas}	Abbaugrad [%]
z.B.	zum Beispiel

Zusammenfassung

Die zunehmende Rohstoffverknappung erfordert energieeffiziente und ökologisch nachhaltige Verbundkonzepte, die in der bestehenden Infrastruktur an geeigneten Standorten Neuanlagen zur Bioenergiegewinnung etablieren. Deshalb hat die vorliegende Arbeit zum Ziel, die Machbarkeit einer konkreten Konzeptidee zur dezentralen Energieversorgung des Nahwärmenetzes Steinstraße in der Stadt Witzenhausen durch die Nutzung von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen und Bioabfällen zu beurteilen. Einerseits beruht das Modellkonzept auf der Bereitstellung von jährlich 1,5 Mio. Kubikmetern Biogas durch eine NawaRo-Anlage, die über eine Gasleitung das Nahwärmenetz versorgt. Andererseits nimmt eine Hochleistungsvergärungsanlage die Fest- / Flüssigtrennung von Bioabfällen zur Vergärung von leicht abbaubaren Presssäften vor und liefert so die nötige Eigenenergie beider Biogasanlagen. Das innovative Konzept verbindet durch diese Unternehmenskooperation die Energie- und Stoffkreisläufe zwischen Stadt und Land.

Auf Grundlage von Untersuchungen der monatlichen Durchschnittswerte des Wärmeverbrauchs im Nahwärmenetz wurde der Leistungsbereich des zu versorgenden BHKWs (250 - 660 KW_{therm}) sowie dessen Primärenergiebedarf von 1100 KW bestimmt und daran die technische Auslegung der NawaRo-Anlage vorgenommen. Anhand einer empirischen Biogasertragsermittlung von Biotonnenpresssäften, die eine Biogausbeute von 57,95 Nm³ je m³ Presssaft (bei 139 kg CSB / m³) verifiziert, konnte die Dimensionierung der Bioabfallanlage konzipiert werden. Auf Basis dieser Daten ergab sich nach einer Vollkostenkalkulation der Presssaftvergärungsanlage, dass aufgrund zu hoher Investitions- und Betriebskosten für die Separations- und Aufbereitungstechnik zurzeit keine wirtschaftliche Tragfähigkeit gegeben ist. Eine Sensitivitätsanalyse bestätigte allerdings, dass unter optimierten Produktionsbedingungen durch Einsatz einer kostengünstigen Separationstechnik sowie einer verbesserten Methanausbeute die ökonomische Stabilität des Betriebes gewährleistet werden kann. Unter dem Anspruch der Eigenenergieversorgung entstehen dementsprechend für die NawaRo-Anlage zwei verschiedene Auslegungsvarianten. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auf Basis der derzeitigen Produktionsbedingungen zeigten, dass die Verlustsituation der Bioabfallanlage auch in dem kooperativen Verbundkonzept nicht zu kompensieren ist. Obwohl demnach das Modellkonzept momentan nicht zu realisieren ist, kann die Forschung im Hinblick auf die Vorbehandlung von Bioabfällen sowie durch anderen Technikeinsatz dazu beitragen, in naher Zukunft die Energie- und Stoffkreisläufe zwischen Stadt und Land zu vereinen. Da die isolierte Variante des NawaRo-Betriebes neben einer Sicherstellung der Bioenergieversorgung des Nahwärmenetzes in der Lage ist einen Unternehmergewinn von 64.978 € pro Jahr zu erwirtschaften, ist sie in der aktuellen Detailplanung zu bevorzugen. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse zur Substratkostensteigerung erwies sich die kooperative Auslegungsvariante mit einer Toleranzschwelle von bis zu 25 % Preisanstieg gegenüber der isolierten Variante (mit 18 %) als die Überlegene.

1. Einleitung

Spätestens seit der Diskussion über unsere Abhängigkeit von russischem Erdgas, der sich zuspitzenden Lage im Iran zur Frage der friedlichen Atomenergienutzung und den dramatisch explodierenden Rohöl- und Rohmetallpreisen durch die im ostasiatischen Raum stark steigende Nachfrage ist allen Menschen die Endlichkeit natürlicher Ressourcen bewusster geworden. Demnach wächst täglich die Notwendigkeit die Energie sowie alle auf der Erde verfügbaren Rohstoffe möglichst effizient und ressourcenschonend zu nutzen.

Der Ausbau eines gesunden Mixes aus regenerativen Energienquellen bietet daher Ländern wie Deutschland, die über 75 Prozent ihrer fossilen Energieträger aus dem Ausland beziehen,¹ die einzig sinnvolle Alternative zur längerfristigen Sicherung ihres energiehungrigen Lebensstandards. Gleichzeitig ist es unabdingbar die Energieeffizienz durch innovative Technik beispielsweise in Fahrzeugen, Gebäuden und Heizanlagen konsequent zu erhöhen, denn schon bald ist das Maximum der Ölförderung überschritten.²

Allerdings bedarf es zur vollen Entfaltung des noch jungen Zukunftssektors der erneuerbaren Energien einer staatlich geregelten Subvention und innovativen Forschung. Sicher ist auch, dass nur auf diesem Wege langfristig den weltweit ausufernden Konflikten um Öl, Wasser und Nahrungsmittel ausgewichen werden und zugleich ein nachhaltiger Umgang mit der Natur einhergehen kann.

Mit dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) legte die rot-grüne Bundesregierung Anfang April 2000 den entscheidenden Grundstein für den heute boomenden Wachstums- und Exportmarkt der Wind-, Solar- und Biomassetechnik. Nach der Einschätzung von Wirtschaftsexperten wird sich die Preisspirale des Erdöls in den kommenden Jahren weiter hoch schrauben,³ so dass damit zu rechnen ist, dass nicht nur ökologische Vorteile durch die Nutzung von erneuerbaren Energien bestehen, sondern auch die Ökonomie solcher Bioenergieanlagen zunehmend Konkurrenzfähigkeit beweist.

Die größten Potentiale werden hier der Biomasse zugesprochen.⁴ Sie ist bisher die einzige Bioenergie, die dank der Konservierung kontinuierlich zur Verfügung steht und somit regelbar als Grund- oder Spitzenlaststrom in Frage kommt. Aufgrund ihrer CO₂-Neutralität kann sie einen erheblichen Beitrag zur Erreichung des Klimaschutzziels der Bundesregierung beitragen. Außerdem besteht die Möglichkeit durch die regenerative Biomasse mittels spezifisch angepasster Konversionstechnik Strom, Wärme und Treibstoff herzustellen.

Darüber hinaus kann die Umsetzung von Bioenergiekonzepten in den jeweiligen Regionen zu wirtschaftlichem Aufschwung, sicheren Arbeitsplätzen und intakter Kreislaufwirtschaft beitragen.⁵

¹ vgl. Ruhrgas (2001) Abb.8 in Vortrag Schubert M. (2006) Tagungsband "Bio- und Sekundärrohstoffe" S. 232

² vgl. Sachs W. (2005) Wuppertal Institut „Fair Future - Begrenzte Ressourcen und globale Gerechtigkeit“ S.97

³ vgl. Simmons M. (2005) in Artikel Follath E. Spiegel Ausgabe 13 2006 S. 79

⁴ vgl. Scheffer K. (2003) Tagungsband der „7. Wissenschaftstagung - Ökologischer Landbau der Zukunft“ S.65

⁵ vgl. Sachs W. (2005) Wuppertal Institut „Fair Future - Begrenzte Ressourcen und globale Gerechtigkeit“ S.176

Besonders in ländlich geprägten Gebieten bestehen vielfältige Optionen für die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Dazu gehören zum einen, die Verbesserung des regionalen Stoffstrommanagements und zum anderen, die Steigerung regionaler Wertschöpfung.⁶

Im Zuge des angestrebten Ziels, die Biogasnutzung aus landwirtschaftlicher Biomasse weiter auszubauen, gilt es der aufkommenden Flächenkonkurrenz die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln durch den Energiepflanzenanbau vorzubeugen und die Flächeneffizienz in Zukunft zu optimieren. Zusätzlich muss festgestellt werden, dass gerade an dezentralen Standorten sehr viele landwirtschaftliche Vergärungsanlagen etabliert werden und deren anfallende Abwärme aus der Verstromung des Biogases besonders im Sommer nur geringfügige Nachfragemengen Verwendung finden. Demnach sollte zunächst die Erzeugung von Biogas aus organischen Ernte- und Abfallstoffen in Verbindung mit smarten Abwärmenutzungskonzepten forciert werden, zumal die verbreitete Einspeisung von Biogas in das öffentliche Erdgasnetz der großen Energiemonopolisten aus politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Gründen momentan und auch in naher Zukunft nicht praktikabel erscheint.⁷

Vielorts ist aber eine günstige Infrastruktur gegeben, die sowohl die thermische als auch die elektrische Energie aus der höchst effizienten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) vollständig und sinnvoll auszunützen vermag. Beispielsweise könnte die Substitution von Erdgas über die direkte Anbindung eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) an ein bestehendes Nahwärmenetz mittels einer unabhängigen Biogasleitung relativ kostengünstig geschehen, ohne die Versorgungssicherheit der Bevölkerung zu riskieren.

Auf der Basis des soeben dargestellten Grundgerüsts lassen sich in interdisziplinären Modellprojekten interessante Zukunftsperspektiven für Land- und Forstwirte, Stadtwerke aber auch Kompostanlagenbetreiber realisieren. Grundlegende Voraussetzung für die Etablierung solcher autarken Projektideen ist jedoch, dass ein gemeinsamer Wille zusammen mit einem gebündelten Engagement aller agierenden und betroffenen Personen einhergeht.

Hinsichtlich der Abwärmeproblematik bei dezentralen Biogasanlagen werden täglich neue Lösungswege diskutiert. Ziel dieser Arbeit war es anhand eines realistischen Modellkonzeptes für die Stadt Witzenhausen unter Betrachtung der Koexistenz verschiedener Vergärungsanlagen darauf eine handfeste Antwort zu finden. Deshalb wird natürlich die Prämisse der ökonomischen Konzeptstabilität sowie die Nachhaltigkeit der Biogasanlagen mit ihren In- und Outputgrößen analysiert und deren betriebswirtschaftliche Tragfähigkeit stets besonders intensiv hinterfragt.

Vorerst wird jedoch auf die Entwicklung, die aktuelle Marktsituation sowie auf die Entstehung und Nutzung von Biogas eingegangen. Im Vordergrund stehen die Darstellung und die kritische Betrachtung der konkreten Konzeptidee. Hierbei wird im Hinblick auf die

⁶ vgl. Geisen B. (2006) BBE [http://www.eco-world/service/main/basics.prg?a no=270](http://www.eco-world/service/main/basics.prg?a%no=270) 19.05.06

⁷ vgl. Gabriel T. (2003) in FNR „Gülzower Fachgespräche Band 21“ S.186

Optimierungsmöglichkeiten der Vergärung organischer Abfälle gezielt als ein alternativer Ansatz die Vergärung von Biotonnenpresssäften untersucht, die über das Separationsverfahren gewonnen wurden. Darauf folgt eine Diskussion zur örtlichen Etablierung des Energiepflanzenbaus. Nach Betrachtung der einzelnen Grundelemente des Gesamtkonzeptes kann dann die Wirtschaftlichkeit einzelner Modellbetriebe durchleuchtet werden. Abschließend wird ein konkreter Ausblick der zukünftigen Planungs- und Umsetzungsphase des geschilderten Modellprojektes dargeboten. Im Verlauf der Arbeit wird auf die nun folgenden Thesen Bezug genommen:

- Die Monovergärung von Biotonnenpresssäften ist sowohl technisch als auch biologisch machbar.
- Eine gesellschaftliche Akzeptanz für Energieanlagen auf Basis nachwachsender Rohstoffe ist seitens der Witzenhäuser Bevölkerung vorhanden.
- Die für die Energieproduktion nötigen Biomassen sind regional verfügbar.
- Die Etablierung des Konzeptgedanken ist unter gegebenen Rahmenbedingungen am Standort Burgberg realisierbar.
- Der Betrieb der Bioenergieanlagen gestaltet sich unter ökonomischen Gesichtspunkten rentabel.

Ziel des Vorhabens ist einerseits, die Thematik und den Konzeptgedanken zu verbreiten, andererseits soll den potentiellen Investoren, den Landwirten, den Stadtwerken und Bürgern die Machbarkeit des Gemeinschaftsprojektes aufgezeigt werden, so dass das Pilotprojekt vielleicht bald Realität wird und darüber hinaus andere Regionen die Konzeptidee auf ihre Infrastruktur übertragen können.

2. Entwicklung und Situation auf dem Biogassektor

2.1 Entwicklungsgeschichte des Biogassektors

Schon 1789 analysierte der italienische Physiker Allesandro Volta das entflammbare Gas, das er an der Oberfläche des Lago di Como auffing. Scheinbar stieg das Biogas aus den Sedimentschichten im See auf. Viele Wissenschaftler, wie Dalton, Davy und Faraday, experimentierten im 19. Jahrhundert mit dem immer beliebter werdenden Gasgemisch auf der Grundlage Voltas weiter. Das Gas wurde in den unterschiedlichsten natürlichen Quellen gefunden. Besonders hohe Mengen waren in den Verdauungstrakten der Tiere und Menschen auszumachen, da dort optimale Lebensbedingungen für die produzierenden Mikroorganismen herrschten. Es war naheliegend, dass kurz darauf die mikrobiologischen Prozesse auf technische Systeme übertragen wurden.⁸

Ab 1890 gewann man den bei der Zersetzung von Abwasserschlamm frei werdenden Energieträger und versuchte die anaerobe Umsetzung gezielt zu fördern, um die restlichen Mengen an Klärschlamm zu minimieren, zu hygienisieren, und zu stabilisieren.⁹

Erst seit 1922 erfolgte die energetische Nutzung über die Einspeisung in städtische Gasnetze. Damals verfügte man über genügend Steinkohlereserven, und das schwarze Gold (Erdöl) hatte noch nicht die führende Stellung in der Energieversorgung eingenommen.

Zwischen 1935 und 1955 kam es in Deutschland jedoch zu einer Verknappung der Brennstoffe. Schnell wurde nach gleichwertigem Ersatz für die flüssigen Treibstoffe in Verbrennungsmotoren gesucht. Da ursprünglich die Entwicklung der Motoren auf Basis der Gasverbrennung beruhte, war die Umstellung auf so genanntes Stadtgas (Leuchtgas) kein großes Hindernis. Allerdings bedurfte es zur Nutzung in Fahrzeugen schwerer Stahlflaschen, so dass der Betrieb mit komprimiertem Leuchtgas die Nutzlast deutlich verringerte.

Kurz darauf erkannte man, dass aus Biogas ein wesentlich reineres Methan mit dementsprechend höherem Heizwert gewonnen werden konnte. Daraufhin wurden Hunderte von Fahrzeugen von Stadtgas auf Biogas umgestellt, dadurch stieg plötzlich die Nachfrage und die Biogasproduktion aus den Klärwerken reichte nicht mehr aus.¹⁰

Die Idee, durch Zugabe von Pflanzenmaterial die Gasausbeute zu erhöhen, förderte die Forschung und Praxiserfahrung in der Vergärung von pflanzlichen Abfällen. Früh erkannte man die begrenzten Potentiale der Biogaserzeugung aus Klärschlamm und Siedlungsabfällen im direkten Vergleich zu den enormen Reserven aus überschüssigen Pflanzenmaterialien wie Kartoffelkraut oder Rübenblättern, die im Bereich der Landwirtschaft anfielen. Darauf ist zurückzuführen, dass schon bald darauf die ersten landwirtschaftlichen Biogasanlagen unter großer Anteilnahme der Bevölkerung entstanden.

⁸ vgl. graskraft (2005) <http://www.graskraft.de/literatur/geschichte.html> 17.05.06

⁹ vgl. Edelmann W. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.641

¹⁰ vgl. graskraft (2005) <http://www.graskraft.de/literatur/geschichte.html> 17.05.06

Sie sollten dezentral gelegenen Betrieben die bequeme Heiztechnik einer Stadtwohnung durch den einfach handhabbaren Energieträger auf dem Land ermöglichen. Doch mit der zunehmenden Verbesserung der Versorgungswege und Ofentechniken von Öl und Kohle in den 60igern kam die Entwicklung des Biogassektors zum kurzzeitigen Stillstand. Erst mit der Ölkrise im Jahre 1973 wird aufgrund der spürbar starken Abhängigkeit vom Erdöl bewusst, dass erneuerbare Energien ein möglicher Ausweg sind.¹¹

Von 1991 an bestanden dank des Stromeinspeisungsgesetzes (StrEG) erneut günstige Bedingungen für den ökonomischen Betrieb von BHKW an Biogasanlagen. Demnach sind von den Energieversorgungsunternehmen höhere Vergütungen für den Strom aus regenerativen Energien zu zahlen. Vorerst entstanden landwirtschaftliche Vergärungsanlagen in enger Verknüpfung mit der Tierproduktion, indem Gülle oder Festmist aus den Ställen der Betriebe als Substrat genutzt wurden.¹²

Vorteil war der steigende Düngewert der Gülle durch die vermehrte Ammoniumkonzentration.¹³ Gleichzeitig wurde damit der Mineral- und Stickstoffkreislauf optimiert. Im Laufe der Zeit haben neben den Vieh- auch die Ackerbaubetriebe die Erfahrung gemacht, dass organische Reststoffe aus Futter- oder Ernteresten durchaus bessere Gaserträge erzielen. Zugleich tendierte die aktuelle Marktsituation zu sinkenden Erlösen aus der Vermarktung von Lebensmitteln, weshalb in den letzten Jahren mehr und mehr Landwirte ihre Produktion auf die Biogaserzeugung umstellen. Dafür sprechen die bisher positiven Erfahrungen in dem Sektor, denn schon heute sind langjährige Sicherheiten mittels einer gesetzlichen Abnahmesicherheit über 20 Jahre gewährleistet.¹⁴

Mit der Novellierung des EEG im August 2004 wurde in der Branche ein regelrechter Boom ausgelöst. Besonders die Grundvergütung für Bioenergie aus kleineren Anlagen wird seitdem wesentlich höher vergütet. Zusätzlich können kumulativ Aufschläge für NawaRo-Anlagen, die KWK sowie innovative Gärverfahren und Technologien gewährt werden. In Tabelle 2.1 sind die Vergütungssätze vor und nach der Novellierung gegenüber gestellt.

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der alten und neuen Grundvergütung nach EEG

bis 150 kW	11,5 ct/kWh	zum Vergleich, bis 31.07.04: 9,9 ct
bis 500 kW	9,9 ct/kWh	zum Vergleich, bis 31.07.04: 8,9 ct
bis 5 MW	8,9 ct/kWh	zum Vergleich, bis 31.07.04: 8,9 ct
5 MW - 20 MW	8,4 ct/kWh	zum Vergleich, bis 31.07.04: 8,4 ct

Quelle: BRD 2004¹⁵

¹¹ vgl. Besgen S. (2004) LWK Nordrhein-Westfalen „Abschlussbericht Projekt Biogas Rheinland“ S.15

¹² vgl. Besgen S. (2004) LWK Nordrhein-Westfalen „Abschlussbericht Projekt Biogas Rheinland“ S.16

¹³ vgl. Tentscher W. (2003) Artikel in energie pflanzen V/2003 S.9

¹⁴ vgl. BRD (2004) EEG Blatt 1923 § 12 <http://www.solarserver.de/solarmagazin/eeg.html> 1.06.06

¹⁵ vgl. BRD (2004) EEG <http://www.solarserver.de/solarmagazin/eeg.html> 1.06.06

Ab 1. Januar 2005 gilt jedoch eine jährlich degressive Senkung des im Vorjahr erhaltenen Vergütungssatzes um 1,5 %. Trotzdem ist wie die folgende Grafik verdeutlicht mit der Novellierung ein sprunghafter Zuwachs im Folgejahr von rund 250 % der neu erbauten Anlagen anhand des Parameters der installierten elektrischen Leistung (MW) zu verzeichnen.

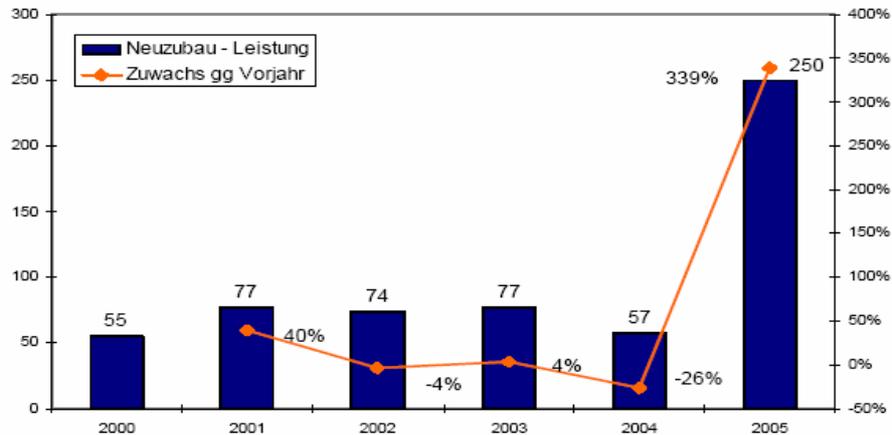


Abbildung 2.1: Neuzubau in elektrischer Leistung (MW) Quelle: Gomez 2006¹⁶

2.2 Aktuelle Marktsituation (national)

Momentan ist parallel zu einer Steigerung der Anlagenzahl eine dynamische Entwicklung hin zu immer größeren Anlagentypen mit effizienteren und leistungsfähigeren Gasmotoren zu beobachten. Die Abbildung 2.2 zeigt beide Phänomene deutlich auf. Demnach sind deutschlandweit mittlerweile über 2600 landwirtschaftliche Vergärungsanlagen im Betrieb, die in 2005 ihre installierte Gesamtleistung gegenüber 2004 um mehr als die Hälfte (ca. 200 MW) ausgebaut haben. Begründet wird dies mit der Tatsache, dass im vergangenen Jahr einige große Anlagen (> 500 kWh_{el}) ans Netz gingen.¹⁷ Jährlich wird dadurch die Freisetzung von 2,5 Mio. Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente in die Umwelt verhindert.¹⁸

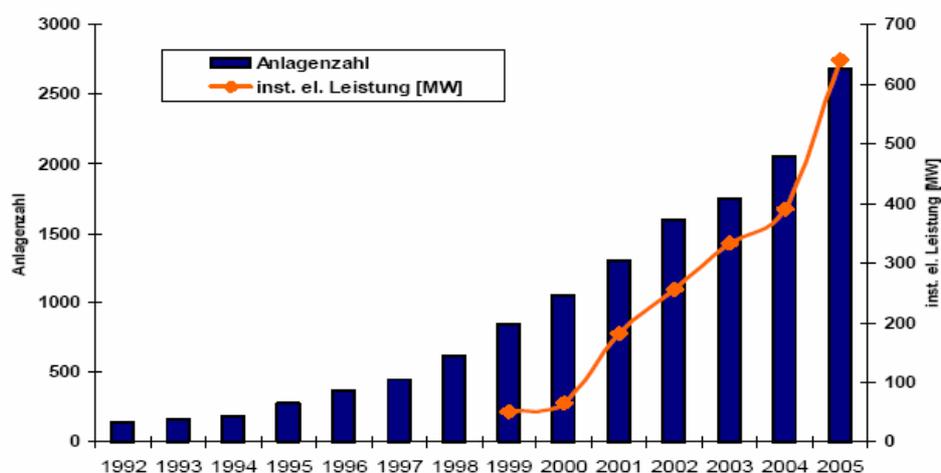


Abbildung 2.2: Aktueller Stand der Biogasanlagen in der Landwirtschaft Quelle: Gomez 2006¹⁹

¹⁶ vgl. Gomez C. (2006) Vortrag im „Biorohstoff-Forum“ des 18. Kasseler Abfallforums

¹⁷ vgl. Daniel J. (2006) Vortrag im Forum „Große Biogasanlagen“ auf der Enbio in Kassel

¹⁸ vgl. Fachverband Biogas e.V. Broschüre „Biogas - das Multitalent für die Energiewende“ Ausgabe 3/06 S.9

¹⁹ vgl. Gomez C. (2006) Vortrag im Forum „Große Biogasanlagen“ auf der Enbio in Kassel

Dabei bleibt, wie unten graphisch dargestellt (Abb. 2.3), festzuhalten, dass der überwiegende Anteil von 73 % (tierische Exkremate und NawaRos zusammen) der bisher erschlossenen Substratressourcen in den Anwendungsbereichen reiner NawaRo-Anlagen Verwendung findet, wobei die restlichen 27 % (Bioabfall sowie industrielle und landw. Reststoffe) auf Vergärungsanlagen, die keinen NawaRo-Bonus beziehen, entfallen.

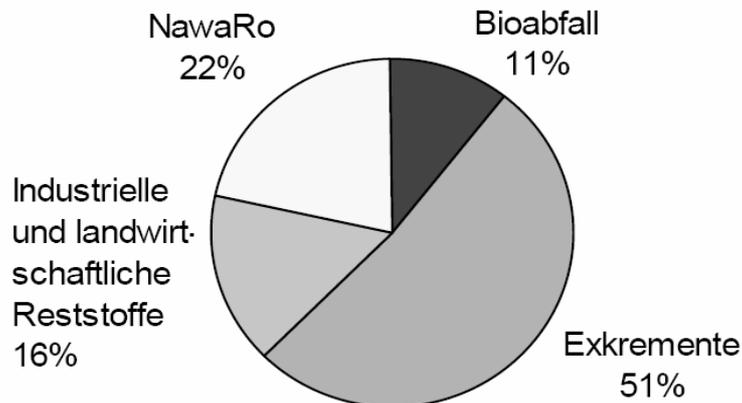


Abbildung 2.3: Substrateinsatz in Biogasanlagen Quelle: Daniel 2006 ²⁰

Nach der genauen Betrachtung der hiesigen Einsatzsituation unterschiedlicher Ausgangssubstrate scheint es äußerst logisch, dass der wirtschaftliche Schwerpunkt bei der Produktion von Biogas weiterhin auf den mit 6 ct/kWh_{el} (bzw. 4ct/kWh_{el} bis 5 MW) vergütetem NawaRo-Bonus liegt. Er bietet neben der Grundvergütung für 2/3 der Anlagenbetreiber ein gewisses Maß an Planungssicherheit und stellt zugleich den wichtigsten Grund für die sich stark durchsetzende Substratumstellung auf ausschließlich landwirtschaftliches Ausgangsmaterial dar.²¹

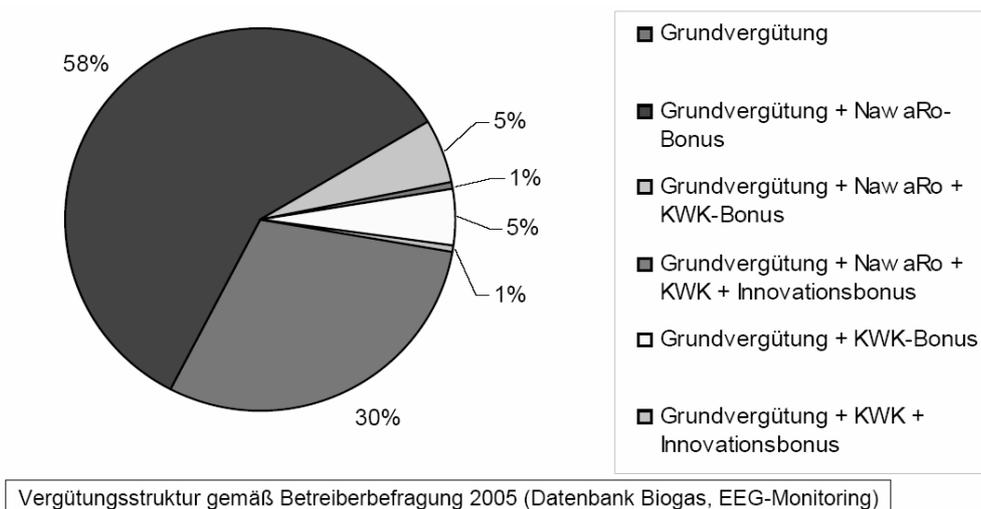


Abbildung 2.4: Vergütungsstrukturen nach EEG 2005 Quelle: Daniel 2006 ²²

²⁰ vgl. Daniel J. (2006) Vortrag im Forum „Große Biogasanlagen“ auf der Enbio in Kassel

²¹ Krieg A. (2006) mündliche Aussage (Gespräch vom 11.02.06)

²² vgl. Daniel J. (2006) Vortrag im Forum „Große Biogasanlagen“ auf der Enbio in Kassel

Zudem kann dem Diagramm (Abbildung 2.4) entnommen werden, dass sich 30 % aller Biogasanlagen scheinbar allein durch die variable Grundvergütung des EEG (mit 11,5 bzw. 9,9 oder 8,9 ct/kWh_e) finanzieren. Gut 58 % hingegen rechnen sowohl mit dem NawaRo-Bonus und der Grundvergütung. Fünf Prozent nutzen obendrein den KWK-Bonus in der Höhe von 2 ct (je extern verbrauchte kWh_{therm}) für die produzierte BHKW-Abwärme. Nur ein Prozentanteil erhält zusätzlich den Innovationsbonus (2 ct) aufgrund von neuem Technologieeinsatz (ORC-Motor, Trockenfermentation, Gaseinspeisung, ...). Weitere 5 % bekommen zu der Grundvergütung ausschließlich den KWK-Bonus für ihre Bioenergie. Darüber hinaus zeichnet sich nur 1 % der Nicht-NawaRo-Anlagen durch besonders innovative Technik aus (Innovationsbonus).

Insgesamt ist auf der Basis dieser Vergütungsgrundlagen bis Ende 2005 die elektrische Gesamtleistung in Biogaskraftwerken innerhalb Deutschlands auf ca. 650 Megawatt gestiegen. Dementsprechend werden jährlich 3,2 Milliarden Kilowattstunden (kWh) Ökostrom und 5,5 Millionen Megawattstunden (MWh) Ökowärme erzeugt. Damit beträgt der Anteil der Stromproduktion aus Biogas ein Prozent des gesamten Strombedarfs der Bundesrepublik. Dies entspricht etwa dem sechsfachen der aktuellen Stromerzeugung aus Photovoltaik.²³

Gegenüber der gänzlichen Ökostromabnahme durch den ansässigen Energieversorger bleibt nach Abzug des eigenen Prozesswärmebedarfs 3,9 Mio. MWh Wärmeenergie übrig, wovon nach Schätzungen des Fachverbandes Biogas zur Zeit nur 40 bis 50 % genutzt werden.²⁴

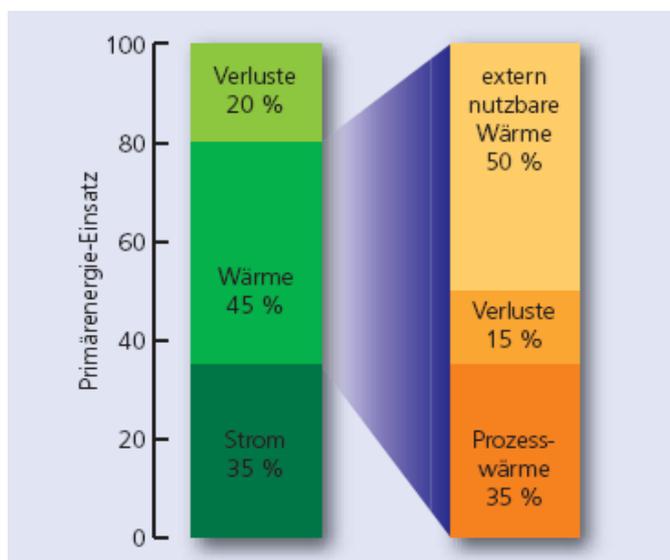


Abbildung 2.5: Wärmeerzeugung von Biogasanlagen Quelle: Fachverband Biogas 2006²⁵

Ein Blick auf die Abbildung 2.5 zeigt, dass knapp zwei Drittel der frei werdenden Energie in Form von thermischer Energie anfällt. Sie birgt vergleichsweise große Mengen an extern

²³ vgl. Fachverband Biogas e.V. Broschüre „Biogas - das Multitalent für die Energiewende“ Ausgabe 3/06 S.5

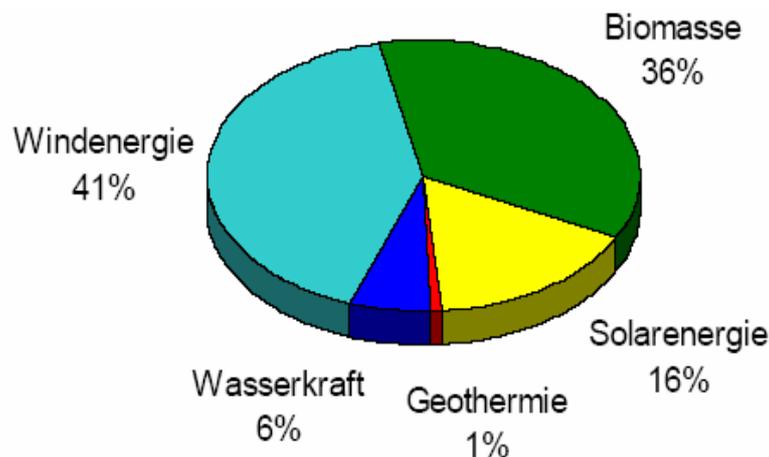
²⁴ vgl. Fachverband Biogas e.V. Broschüre „Biogas - das Multitalent für die Energiewende“ Ausgabe 3/06 S.6

²⁵ vgl. Fachverband Biogas e.V. Broschüre „Biogas - das Multitalent für die Energiewende“ Ausgabe 3/06 S.7

nutzbarer Wärme, die meist energieaufwändig mittels Kühlaggregaten in die Atmosphäre abgegeben wird. Zugleich hat sich der heimische Heizölpreis (2004) im Vergleich zum Vorjahr fast verdoppelt.²⁶

Folglich ist es nur noch eine Frage der Zeit, wann eine individuelle und effiziente Abwärmenutzung zum zweiten Standbein der Bioenergieerzeugung aus Biogas wird. Denn zukünftig besteht bei ausschließlicher Beibehaltung der stromabhängigen Förderstruktur im EEG die Gefahr, dass es schon in wenigen Jahren zu einem starken Rückgang der derzeitigen Produktionssituation kommt. Damit diese Fehlentwicklung an dem weltweit attraktivsten Produktionsstandort für erneuerbare Energieunternehmen verhindert wird, sollte es die Aufgabe von Politik und Gesetzgebung sein, eine klare Regelung für der Gaseinspeisung von Biogas in örtliche Erdgasleitungen zur Erschließung der regenerativen Wärme- und Treibstoffmärkte im EEG zu verankern. Wenn dies nicht geschieht, wird den Biogas erzeugenden Landwirten in wenigen Jahren aufgrund von Inflation, höheren Steuerabgaben, stagnierenden Stromerlösen und stetig ansteigenden Betriebskosten die solide Basis für ein nachhaltiges Wirtschaften fehlen.²⁷

Folgerichtig könnten dadurch auch ein Teil der 157.000 existierenden Arbeitsplätze (Stand 2004)²⁸ in der Biomassebranche gefährdet sein, die immerhin einen Anteil von 36 % der Bruttobeschäftigung am Markt der Erneuerbaren Energien (EE) ausmachen. Größtenteils existieren die Stellen in den Bereichen der Produktion von Biomasse und im Anlagenbau. Weniger als ein Drittel der Arbeitskräfte beansprucht also der tägliche Anlagenbetrieb. Die Abbildung 2.6 verdeutlicht die Verteilung der 157.000 Arbeitsplätze in der gesamten Wachstumsbranche.



gesamt 2004: ca. 157.000 Arbeitsplätze

Abbildung 2.6: Bruttobeschäftigung in der Branche der EE Quelle: BMU 2006²⁹

²⁶ vgl. BAV Chemie (2004) Artikel v. Spät N. <http://www.wams.de/data/2004/08/08/316268.html?s=2> 24.05.06

²⁷ Krieg A. (2006) mündliche Aussage (Telefonat 20.5.06)

²⁸ vgl. BMU (2006) Studie „Wirkung des Ausbaus der EE auf den deutschen Arbeitsmarkt...“ S. 3

²⁹ vgl. BMU (2006) Studie „Wirkung des Ausbaus der EE auf den deutschen Arbeitsmarkt...“ S. 3

In 2004 erwirtschaftete der gesamte Zukunftssektor der regenerativen Energien einen Umsatz von 11,6 Mrd. €. ³⁰ Gleichzeitig zeichnete sich im vergangenen Jahr ein positiver Wachstumstrend von ca. 13.000 weiteren branchenabhängigen Stellen ab. ³¹

Die Prognosen für die Entwicklung in den kommenden 14 Jahren sehen viel versprechend aus. Allein der Ausbau von Offshore-Windparks kann dabei mit geschätzten Kapazitäten von ca. 20 Mrd. kWh pro Jahr die Ökostromerzeugung bis 2020 erheblich erhöhen. Außerdem haben sich die Europäische Union (EU) sowie die Bundesregierung zu einer Verdoppelung des Anteils an EE an der Gesamtenergieerzeugung bis zum Jahr 2010 verpflichten lassen. Demnach halten sie große Steigerungspotentiale im Bereich der Geothermie, der Photovoltaik und besonders der Biomasse für wichtig. ³²

Würde sich der Anstieg der Stromproduktion von EE bis 2020 wie im folgenden Schaubild (Abb. 2.7) aufgezeigt bewahrheiten, könnte die Jahresleistung von momentan 62 Terawattstunden auf 151 TWh ausgebaut werden. ³³ Damit könnten die erneuerbaren Energien bereits im Jahr 2020 einen Beitrag von 12 % des Primärenergiebedarfs und gut 30 % der Stromerzeugung in Deutschland leisten. ³⁴

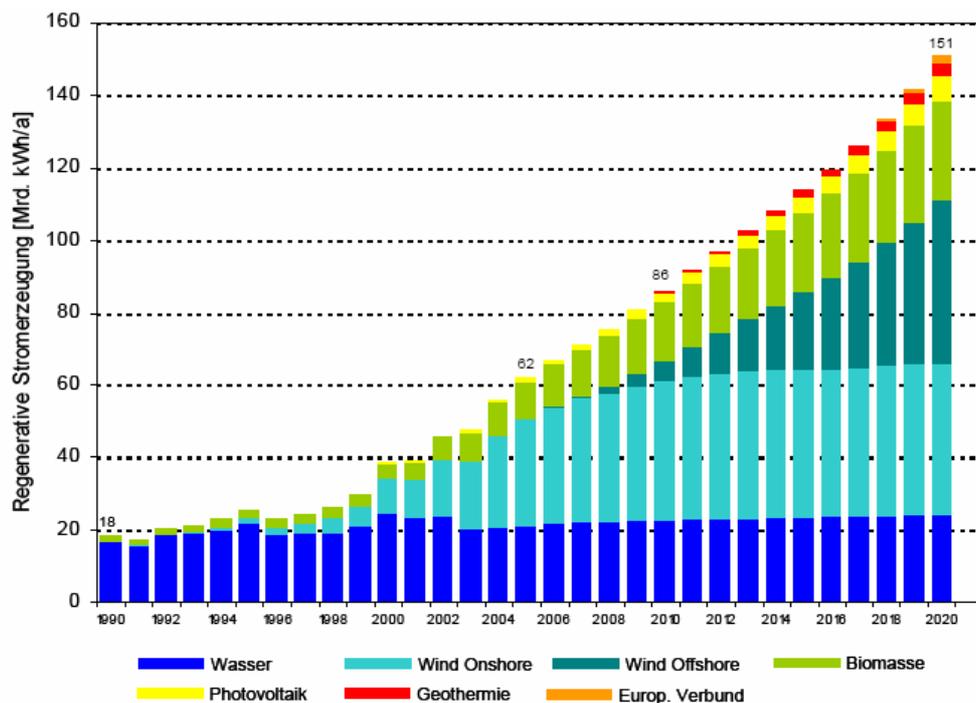


Abbildung 2.7: Entwicklung Erneuerbarer Energien in Deutschland Quelle: BMU 2006 ³⁵

³⁰ vgl. FNR (2005) Broschüre „Basisdaten Bioenergie Deutschland“

³¹ vgl. BEE (2006) <http://www.bee-ev.de/presse.php?pr=985> 21.5.06

³² vgl. BMU (2005) Bericht „Erneuerbare Energie in Zahlen - nationale und intern. Entwicklung“ S.29

³³ vgl. BMU (2006) Studie „Wirkung des Ausbaus der EE auf den deutschen Arbeitsmarkt...“ S. 4

³⁴ vgl. DLR (2004) in Bericht der BMU „Erneuerbare Energie in Zahlen - nationale u. intern. Entwicklung“ S.23

³⁵ vgl. BMU (2006) Studie „Wirkung des Ausbaus der EE auf den deutschen Arbeitsmarkt...“ S. 4

3. Entstehung und Nutzung von Biogas

Dieses Kapitel dient dazu, dem Leser vorab einen kurzen Überblick über die Entstehung und Zusammensetzung des Gasmisches sowie dessen unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten zu verschaffen.

3.1 Entstehung und Zusammensetzung von Biogas

Als Ausgangsmaterial für die anaerobe Fermentation (Vergärung) kommen entweder pflanzliche oder tierische Materialien wie biologische Küchenabfälle sowie Exkremente und Energiepflanzen-Biomasse aus der Landwirtschaft in Frage. Grundlegend für die anaerobe Vergärung ist ein sehr komplexes und selbst regulierendes Zusammenspiel verschiedener Mikroorganismen unter Luftabschluss in einer feuchten Umgebung. Dabei werden die bei der Photosynthese aufgebauten biochemischen Verbindungen der Substrate aufgespalten und die während des Pflanzenwachstums gespeicherte Energie wieder freigesetzt.³⁶

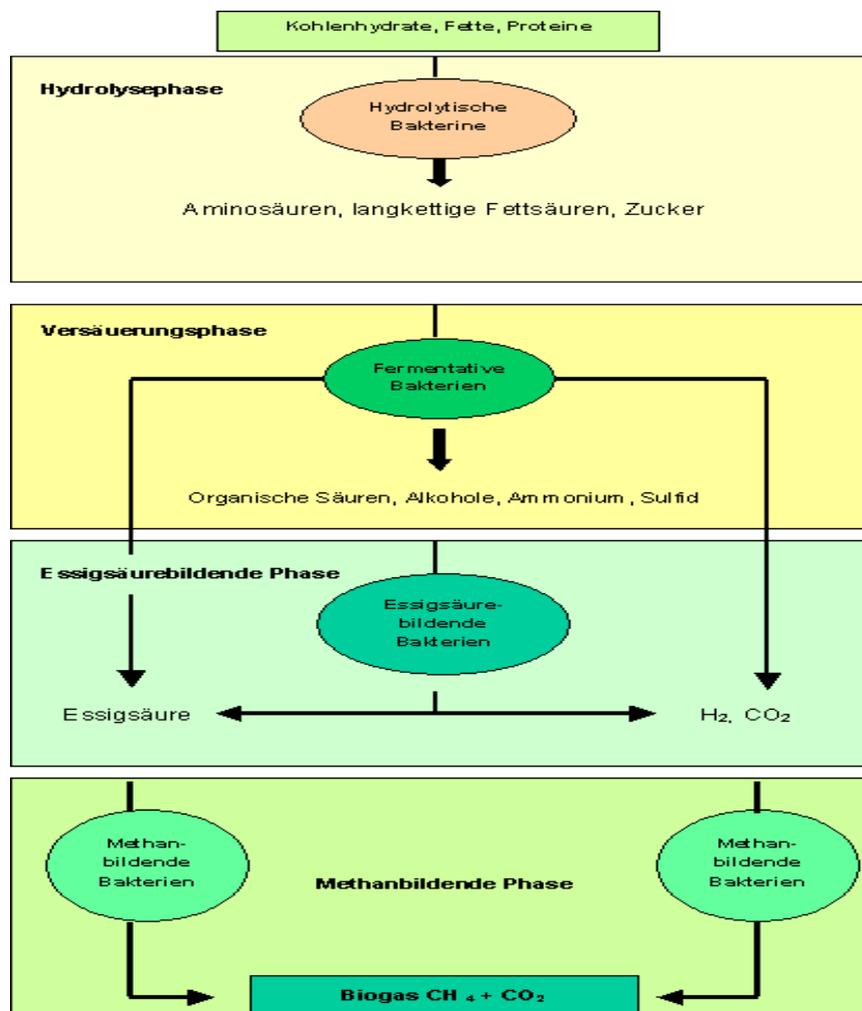


Abbildung 3.1: Vier Phasen der Biogasentstehung Quelle: FNR 2005³⁷

³⁶ vgl. Edelmann W. (2001) in „Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.585

³⁷ vgl. FNR (2005) <http://www.bioenergie.de> 7.06.06

Die hier agierenden Bakteriengruppen der so genannten „Archebakterien“ sind für den Abbau der Kohlenhydrate, Fette und Proteine verantwortlich. Folgende Phasen der Vergärung bilden die Stoffwechselkette der Bakterienpopulationen (siehe Abbildung 3.1):

erstens die Aufspaltung des möglichst homogenen Ausgangsmaterials durch Enzyme (Hydrolyse) zu Zucker, Fett- und Aminosäuren, zweitens die Säureproduktion (Acidogenese) zur Bildung von niedermolekularen Fettsäuren, Wasserstoff und Kohlendioxid, und drittens die darauf folgenden symbiotisch ablaufenden Umbauprozesse in der Acetogenese (Essigsäurebildung) und Methanogenese (Biogasbildung).³⁸

Nur rund 10 % der im Substrat vorhandenen Gesamtenergie wird dabei zur Aufrechterhaltung der mikrobiellen „Fresskette“ benötigt. Den Großteil der eigentlichen Gesamtenergie (90 %) scheiden die Bakterien als gasförmiges Abfallprodukt in Form von Methan und Kohlenstoffdioxid (Biogas) wieder aus.

Den Pilzen, Einzellern und Bakterien, die bei dem aeroben Abbau organischer Substanzen (unter Luftzufuhr, z.B. Kompostierung) beteiligt sind, stehen vergleichsweise bis zu 100 % der ursprünglich aus dem Sonnenlicht stammenden Energie für ihre Lebenserhaltung zur Verfügung.³⁹ Wodurch die aerobe Lebensgemeinschaft (Biozönose) ihre Zellverdopplung wesentlich schneller als die sauerstoffunabhängige „Fresskette“ der Archebakterien praktizieren kann und dadurch eine höhere Abbaugeschwindigkeit erreicht. Allerdings wird durch den rasant verlaufenden Abbau in jeder Kompostmiete eine enorme Menge an Abwärme (Temperaturniveau von ca. 70 °C) ungenutzt an die Umwelt abgegeben.

Aufgrund des niedrigen Eigenenergieverbrauchs, der langsamen Verdopplungsrate der an der Fermentation beteiligten Bakterienstämme und der geringen Wärmeabgabe an die Umgebung ist die anaerobe Umsetzung gegenüber der aeroben ein durchaus effizienter Weg zur Gewinnung von Bioenergie aus organischen Stoffen.⁴⁰ Denn das von den Methanbakterien ausgestoßene energetisch hochwertige Gasprodukt (Biogas), das etwa zu zwei Dritteln aus Methan (CH₄) und zu rund einem Drittel aus Kohlenstoffdioxid (CO₂) besteht, und darüber hinaus nur geringe Konzentrationen an Stick- (N₂) und Wasserstoff (H₂) sowie minimale Spuren von Schwefelwasserstoff (H₂S) und Kohlenmonoxid (CO) beinhaltet, lässt sich relativ einfach als regenerativer Treib- und Brennstoff zur Fortbewegung oder zur Wärme- und Stromerzeugung nutzen.⁴¹

Um aber eine hohe Biogasproduktion der äußerst empfindlichen Bakterienpopulationen aufzubauen bzw. zu erhalten, ist ein möglichst konstantes Milieu im Fermenter (Reaktor) unumgänglich. Das entsprechende Fermentermilieu ist dabei nicht nur von dem Faktor der optimalen Temperaturführung abhängig, sondern ausschlaggebend sind auch ein

³⁸ vgl. Schattauer A. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S. 25

³⁹ vgl. Edelmann W. (2001) Tab. in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.586

⁴⁰ vgl. Edelmann W. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.586

⁴¹ vgl. Edelmann W. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.589

ausgewogenes C/N-Verhältnis, eine aufmerksame Mikro- und Makronährstoffversorgung und ein stabiler pH-Wert.

Da es psychrophile, mesophile und thermophile Bakterienkulturen gibt, können je nachdem die Temperaturoptima bei 25 °C, zwischen 32 und 42°C sowie zwischen 50 bis 57 °C liegen. Hinsichtlich einer zuverlässigen Prozessstabilität und einer guten Gasproduktion zeigen die meisten bekannten Methanbakterien im mesophilen Bereich ihr Wachstumsoptimum.⁴² Dementsprechend fährt der Großteil der Biogasanlagen in Deutschland in einem konstanten Temperaturbereich um 35 °C. Die thermophile Prozessführung (bei 55 °C) ist zwar im Fütterungsmanagement wesentlich anspruchsvoller, besonders bei Substratumstellungen oder leichten Milieuveränderungen, doch insgesamt sind aufgrund der höheren Abbauraten deutlich bessere Gasausbeuten die Regel.⁴³

Weiterhin haben Untersuchungen gezeigt, dass zwei- oder mehrstufige Vergärungsverfahren im Vergleich zu einstufig gefahrenen Anlagen im Vorteil sind. Obwohl sich die Trennung von Hydrolyse/Versäuerung und Methanogenese deutlich positiv auf die Mikrobenaktivität in den nahezu perfekt angepassten Lebensräumen auswirkt, liegt deutschlandweit der Schwerpunkt von praktizierenden Biogasanlagen aufgrund von zu hohen Baukosten auf der einstufigen Naßvergärung (< 15 % TS im Fermenter). Zielsetzung von vielen Biogasanlagenbetreibern sollte deshalb sein, stets die Milieuanforderungen in dem einstufigen Fermentationsbetrieb auf die methanogenen Bakterien und ihre langsame Wachstumsgeschwindigkeit auszurichten.⁴⁴

Demnach ist ein pH-Wert-Fenster von 7-7,5 unbedingt einzuhalten. Sollte dennoch ein sinkender pH-Wert (Versäuerung < 4,5) erkannt werden, muss die Substratzufuhr rechtzeitig ausgesetzt werden, ansonsten wird das Wachstum der methanogenen Bakterien stark gehemmt. Wenn in diesem Moment nicht ausreichend Pufferkapazität aus der Kohlenstoffdioxidproduktion vorhanden ist, um die selbst erzeugten Säuren (z.B. Propionsäure) zu neutralisieren, führt eine zunehmende Versäuerung schnell dazu, dass der Reaktorinhalt umkippt.⁴⁵

Zur Etablierung und Sicherung von stabilen, mikrobiellen Lebensgemeinschaften in wasser- und luftdichten Gärbehältern ist es für den Anwender wichtig, die qualitativen und quantitativen Substrateigenschaften zu kennen und ein gewisses Maß an Fachkenntnis über die biologischen Zusammenhänge der anaeroben Abbauprozesse sowie einige technische Fähigkeiten mitzubringen.

⁴² vgl. Schattauer A. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S. 27

⁴³ vgl. Karpenstein - Machan M. (2005) in „Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber“ S.29

⁴⁴ vgl. Weiland P. (2001) in „Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber“ S.28

⁴⁵ vgl. Edelmann W. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.648

3.2 Aufbau und Technik der Gärbehälter (Fermenter)

Da im Rahmen dieser Arbeit die Betrachtungen auf das Durchfluss- bzw. Durchflussspeicherverfahren beschränkt werden, und aus ökonomischen Gründen nur zwei Fermentertypen in Frage kommen, soll dementsprechend im Folgenden ausschließlich deren substratangepasste Technik und Funktionsweise anhand der ein- bzw. zweistufigen Naßvergärung erklärt werden.

Für den Anwendungsbereich der landwirtschaftlichen Biogasproduktion eignen sich voll durchmischte, stehende Reaktoren. Besonders in Verbindung mit der günstigen Betonbauweise haben sich die zylinderförmigen Fermenter in der Praxis bewährt. Als Gasspeicher wird meist eine geräumige Folienhaube (Tragluftdach) an dem Reaktorkopf befestigt. Darunter befindet sich im Allgemeinen eine gut isolierte Fermenterdecke (Holzkonstruktion), die den H_2S -oxidierenden Bakterien Besiedlungsfläche bietet und gleichzeitig das Einsinken des Tragluftdaches bei minderer Biogasproduktion in das Fermenterinnere verhindert.⁴⁶

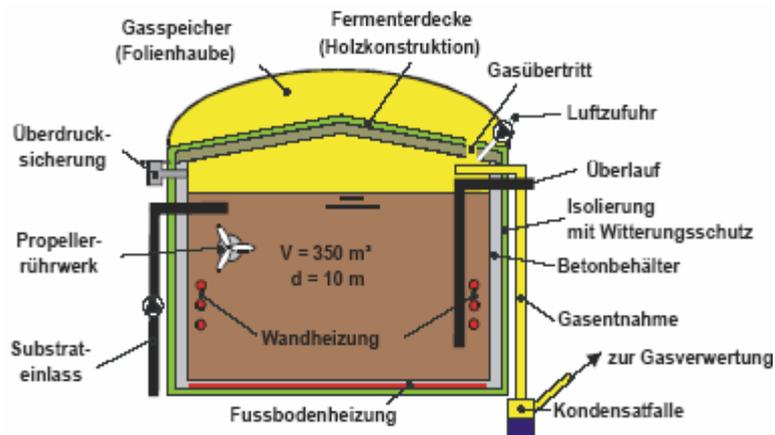


Abbildung 3.2: Aufbau eines stehenden Betonfermenters Quelle: Mitterleitner 2004⁴⁷

Wie im Unterkapitel 3.1 bereits angerissen wurde, ist zur Erhaltung des Bakterienmilieus die genaue Temperaturführung entscheidend für die Verdopplungsrate der Methanbakterien.⁴⁸ Um die Gärtemperatur des einstufigen Verfahrens auch im Winter konstant halten zu können, sind sowohl im Boden als auch an den Wänden des Reaktors Heizelemente installiert. Sie sind in Abbildung 3.2. durch rote Markierungen gekennzeichnet und werden in der Regel mit der aus der Kraft-Wärme-Kopplung stammenden Abwärme gespeist.

Durch die Kombination eines langsam laufenden Paddelrührwerkes (8 - 10 U / min) mit einem beliebig einstellbaren Tauchmotorrührwerk (Propellerrührwerk) wird Sparsamkeit und die optimale Durchmischung des faserreichen Substrates mit TS-Gehalten bis zu 15 % gewährleistet, ohne die Bakterienkulturen dabei erheblich zu minimieren.⁴⁹

⁴⁶ vgl. FAL (2005) in „Ergebnisse des Biogas-Messprogramms“ S.62

⁴⁷ vgl. Mitterleitner H. (2004) in „Biogashandbuch Bayern - Materialienband“ S.32

⁴⁸ vgl. Gruber W. (2004) in „Die Landwirtschaft als Energieerzeuger“ S.63

⁴⁹ vgl. Mitterleitner H. (2004) in „Biogashandbuch Bayern - Materialienband“ S.46

Die technischen Zeichnungen in Abbildung 3.3 sollen deren Einbau und Funktionsweise erklären, linker Hand ist das Paddelrührwerk und rechter Hand das Tauchmotorrührwerk abgebildet.

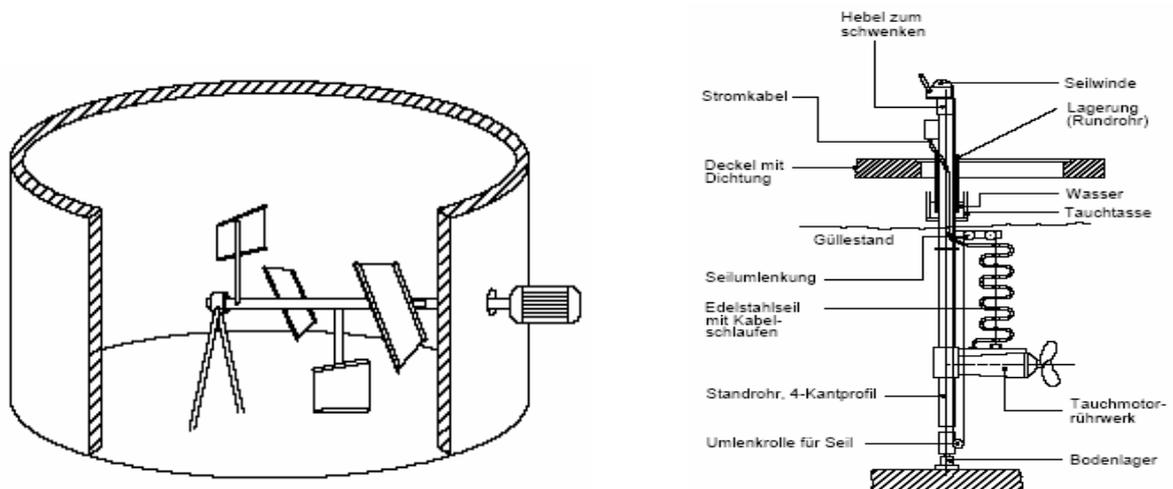


Abbildung 3.3: Paddelrührwerk (links) und Tauchmotorrührwerk (rechts)
Quelle: Mitterleitner 2004⁵⁰

In dem Großteil der NawaRo-Anlagen kommt zur kontinuierlichen Beschickung mit zuvor zerkleinertem und unter Luftabschluss durch Milchsäuregärung konserviertem Energiepflanzenmaterial (Nachwachsende Rohstoffe) überwiegend eine arbeitsaufwendige jedoch äußerst günstige Schneckenförderungstechnik zum Einsatz.⁵¹ Mittels mehrerer Förderschnecken wird aus einem geräumigen Dosierbehälter der Feststoff intervallartig unterhalb des Fermenterfüllstandes direkt in den Reaktor eingebracht und dadurch sofort mit Bakterienkolonien kontaminiert. Die Zeichnung, die in Abbildung 3.4 zu sehen ist, zeigt das Funktionsprinzip dieses Einbringsystems.

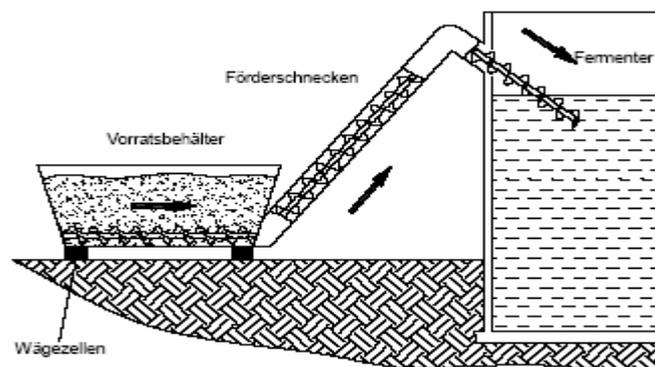


Abbildung 3.4: Eintragschnecke mit Vorratsbehälter Quelle: Mitterleitner 2004⁵²

Zum Schutze der Fermenterbiologie sollte dabei besonders darauf geachtet werden, dass die tägliche Faulraumbelastung von 3 bis 5 Kg oTM/m³ nicht über- oder unterschritten wird.⁵³

⁵⁰ vgl. Mitterleitner H. (2004) in „Biogashandbuch Bayern - Materialienband“ S.44 u. 46

⁵¹ vgl. FAL (2005) in „Ergebnisse des Biogas-Messprogramms“ S.60

⁵² vgl. Mitterleitner H. (2004) in „Biogashandbuch Bayern - Materialienband“ S.38

⁵³ vgl. Mitterleitner H. (2004) in „Biogashandbuch Bayern - Materialienband“ S.32

Außerdem kann es bei Zufuhr sehr inhomogener Substratzusammensetzungen zu erheblichen Beeinträchtigungen (CH_4 -Gehaltsschwankungen) der Methanproduktion kommen.⁵⁴

Nach einer Aufenthaltsdauer (hydraulische Verweilzeit) von 15 bis 30 Tagen, die in Abhängigkeit von der spezifischen Abbauleistung variiert, kann kontinuierlich im Austausch von frischem Substrat die ausgegorene Fermentergülle am Fuße des Reaktors über 150 mm dicke Stahlleitungen entnommen werden.⁵⁵ Um den reibungslosen Transport in das mit einem weiteren Gasdom ausgestatteten Gärrückstandslager sicher zu stellen, können je nach Faseranteil im Gärsubstrat unterschiedliche Verdrängerpumpen eingesetzt werden. Die Drehkolbenpumpe, in Abbildung 3.5 unten links zu sehen, hat gegenüber der mit hohem Förderdruck saugenden Exzentrerschneckenpumpe (rechts) den Vorteil, dass bei langfaserigen Gärresten kaum eine Verstopfungsgefahr besteht. Die Exzentrerschneckenpumpe eignet sich hingegen bestens für die Beförderung von flüssigen Substraten (wie Gülle mit $< 9\%$ TS) aus einer tiefer liegenden Vorgrube in den Reaktor.

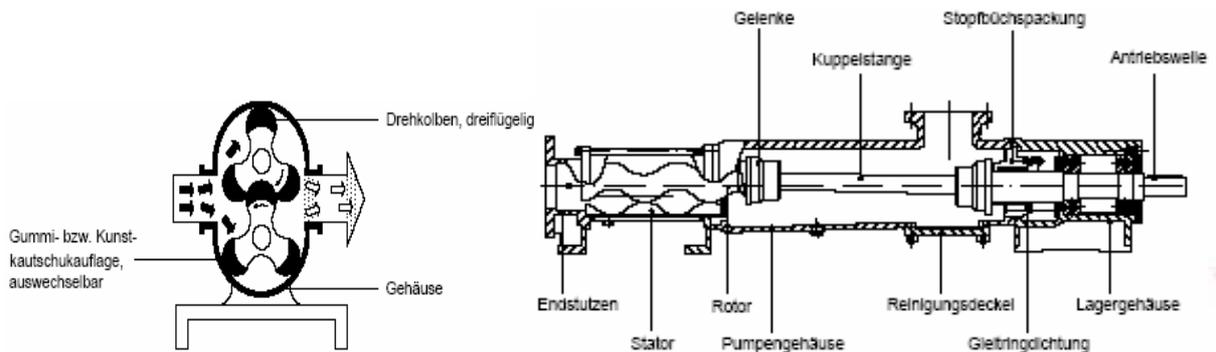


Abbildung 3.5: Drehkolbenpumpe (Querschnitt) und Exzentrerschneckenpumpe (Längsschnitt)
Quelle: Mitterleitner 2004⁵⁶

Der mit der Einbring-, Rühr-, Pump- und Heiztechnik verbundene Energieaufwand, kann insgesamt 22 bis 30 % der Bruttoenergieproduktion ausmachen. Aus diesem Grund sollte auf eine gut verarbeitete und hochwertige Wärmedämmung sowie einen möglichst hohen Trockenmassegehalt im Ausgangssubstrat geachtet werden. Denn mit sinkendem TM-Gehalt nimmt der Biogasertrag ab, wodurch ein entsprechend größerer Anteil der Substratenergie für die Beheizung des Fermenters benötigt wird.⁵⁷

Bei der anaeroben Naßvergärung von hygienisch bedenklichen Substratchargen, die aus Abwässern oder Bioabfällen stammen und somit unter die EU-Hygieneverordnung 1774/2002 bzw. die Bio-Abfallverordnung fallen, muss das jeweilige Substratmaterial in einem gesonderten Behälter (Hygienisierung) über eine Stunde auf der Keim abtötenden Temperatur von $70\text{ }^\circ\text{C}$ gehalten werden. Die Hygienisierung dieser Substrate sollte demnach entweder vor dem Gärprozess oder im Anschluss angesiedelt sein.⁵⁸

⁵⁴ vgl. Ahrens T. (2003) in „Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber“ S.40

⁵⁵ vgl. Loll U. (2002) in „ATV-Handbuch Mechan. und biol. Verfahren der Abwasserbehandlung“ S.237

⁵⁶ vgl. Mitterleitner H. (2004) in „Biogashandbuch Bayern - Materialienband“ S.40

⁵⁷ vgl. Edelmann W. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.664

⁵⁸ vgl. Loll U. (2002) in „ATV-Handbuch Mechan. und biol. Verfahren der Abwasserbehandlung“ S.245

Dementsprechend ist anzunehmen, dass der Anteil des aufzuwendenden Wärmeenergieeinsatzes an der Bruttoenergieerzeugung bei solchen Anlagentypen deutlich höher ausfällt.

Beispielsweise kommen für die Abwasserbehandlung so genannte Schlammbedtreaktoren (USAB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket-Reaktor) in Frage, die aufgrund der Hygienisierung, der vorgeschalteten Hydrolysestufe (Versäuerungsphase) und der selbst benötigten Prozesswärme gleich drei Behälter aus der Eigenleistung speisen müssen.

Zwar beanspruchen diese zweistufigen Gärverfahren gegenüber einstufigen mehr Platz und Betriebskostenaufwand, dafür aber bieten sie eine bessere Betriebssicherheit bei gleichzeitig höherer Faulraumbelastung in der Methanstufe und vertragen zusätzlich Substrate, die in der Menge als auch in der Zusammensetzung starken Schwankungen unterliegen.⁵⁹

Am Boden dieser Hochleistungsreaktoren wird das Substrat aus der Hydrolyse kommend in geringen Mengen in das Schlammbett eingepumpt. In diesem Schlamm kommt das Substrat sofort in Kontakt mit den Methanbakterien, die sich entweder auf sehr feinen Sandkörnern (Trägermaterial) oder auf sich selbst kultivieren. Durch das im Stoffwechsellvorgang der Bakterien ausgestoßene Biogas steigen diese Agglomerate, bestehend aus Sand, Bakterien und Gasbläschen im Reaktor langsam nach oben.⁶⁰

Infolge von ständiger Rückführung des Mikrobenschlammes (Zirkulation) und Zurückhaltung der Bakterienagglomerate mittels nach unten geöffneter, trichterförmiger Leitbleche an der Fermenterdecke kann durch längeren Aufenthalt der methanogenen Mikroorganismen die Abbaurate enorm gesteigert werden.⁶¹ Die gelben Blasen in Abbildung 3.6 verkörpern die schwebenden biogasreichen und die blauen die Substrat aufnehmenden Bakterienklümpchen.

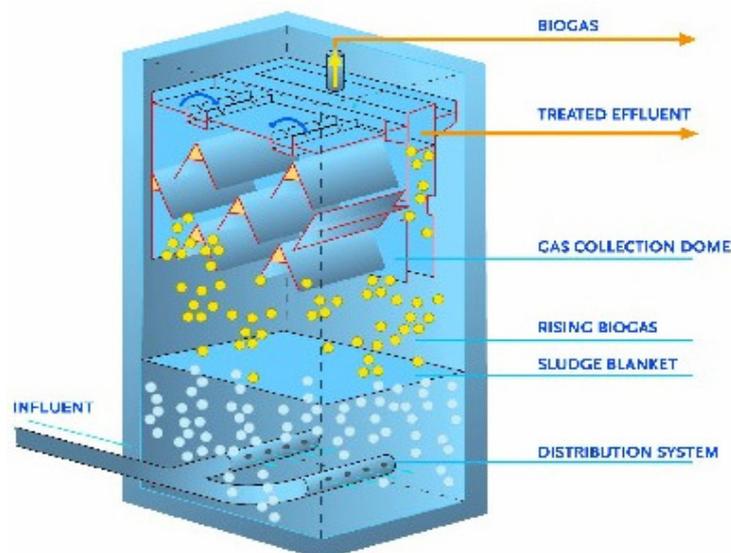


Abbildung 3.6: Schema des USAB-Reaktors (BIOPAQ® - System) Quelle: Engels (2006)⁶²

⁵⁹ vgl. Seyfried C. F. (1993) in „Anaerobtechnik - Handbuch der anaeroben Behandlung von Abwasser und Schlamm“ S.342

⁶⁰ vgl. Edelmann W. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.668

⁶¹ vgl. Loll U. (2002) in „ATV-Handbuch Mechan. und biol. Verfahren der Abwasserbehandlung“ S.246

⁶² vgl. Engels (2006) <http://www.paques.nl/paques/webPages.do?pageID=200510> 29.06.06

Diese sich bildenden Klümpchen werden auch Pellets genannt. So lange die Methanbakterien immer stärker zur Pelletbildung neigen, können oTM-Gehalte von bis zu 90 kg/m³ im Reaktor erreicht werden. Ziel ist es, durch Sedimentation möglichst viel aktive Bakterienbiomasse trotz austragender Strömungen in der Suspension zu halten.⁶³ Innerhalb eines UASB-Reaktors können deshalb pro Tag und m³ Fermentervolumen bis zu 45 kg CSB (Stoffumsatz) erreicht werden.⁶⁴

Ein Zusetzen der relativ kleinen Schlammbedtfermenter mit Feststoffpartikeln kann mittels sauberer Fest- / Flüssigtrennung weitgehend unterbunden werden.⁶⁵

Dadurch, dass Bioabfälle ähnlich wie Abwässer in ihrer Zusammensetzung und ihren Kapazitäten übers Jahr gesehen starke Schwankungen aufweisen,⁶⁶ könnten derartige Reaktoren sich durchaus auch zur Monovergärung der flüssigen Anteile von separierten Bioabfällen bzw. der Presssaftfraktion eignen.⁶⁷

Technisch müssen dazu keine Modifikationen an den in der Abwasserbehandlung eingesetzten USAB-Reaktoren vollzogen werden. Allerdings sind die Hochleistungsreaktoren in ihrer Volumengröße an die vorhandene Substratmenge anzupassen, dass bedeutet bei geringer Substratmenge (< 10.000 m³/a) sind kleine Sonderanfertigungen herzustellen.⁶⁸

⁶³ vgl. Meyer H. (2005) in „Anaerobtechnik“ S.296

⁶⁴ vgl. Edlmann W. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.668

⁶⁵ vgl. Loll U. (2002) in „ATV-Handbuch Mechan. und biol. Verfahren der Abwasserbehandlung“ S.246

⁶⁶ vgl. Kaltschmitt M. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.117

⁶⁷ Linke (2006) ATP-Potsdam mündliche Aussage (Telefonat vom 27.07.06)

⁶⁸ Zumbrägel M. (2006) Paques B.V. schriftliche Stellungnahme (E-Mail vom 29.06.06)

3.3 Energetische Nutzungsmöglichkeiten von Biogas

3.3.1 Blockheizkraftwerk (BHKW)

Die mittlerweile weit verbreitete Nutzung von Biogas in Blockheizkraftwerken beruht auf dem allseits bekannten Funktionsprinzip eines herkömmlichen Verbrennungsmotors. Wahlweise kann dabei ein auf Fremdzündung umgerüsteter Dieselmotor (Gas-Otto-Motor) oder ein Seriidieselmotor (Zündstrahlmotor) mit ständiger Zündölbeimischung zum Einsatz kommen.⁶⁹ Um jedoch Strom und Wärme aus dem methanreichen Treibstoff zu erzeugen, wird an die Antriebswelle des jeweiligen Motors ein Generator zur Stromgewinnung angekoppelt. Zugleich kann die Wärmeenergie, die bei der Verbrennung an das Kühlwassersystem und die Abgase abgegeben wird, mittels Wärmetauscher gewonnen werden. Über Nahwärmeleitungen kann diese Wärme anschließend zur Beheizung und Warmwasserbereitstellung von in der Nähe befindlichen Gebäuden genutzt werden. Abbildung 3.6 veranschaulicht noch mal das erläuterte System der Kraft-Wärme-Kopplung anhand des Blockheizkraftwerkes.

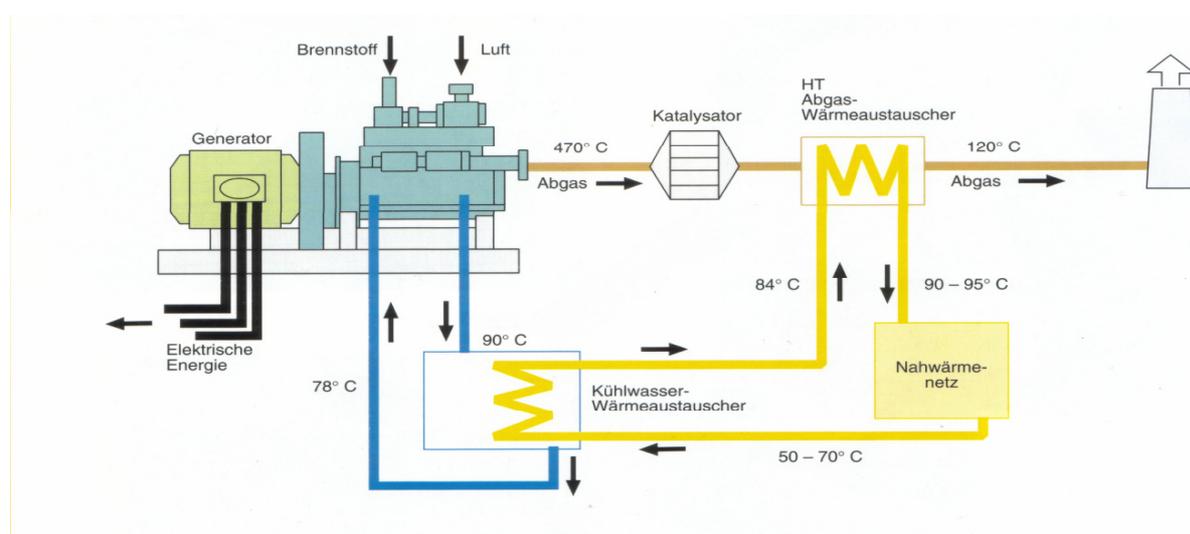


Abbildung 3.7: Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung Quelle: Stadtwerke Witzenhausen 1992⁷⁰

Zur Vermeidung von frühzeitigen Korrosionen der Gas- und Abgasleitungen oder gar größeren Motorschäden durch den Dauerbetrieb mit Biogas ist es grundsätzlich notwendig, das rohe Biogas zuvor einer Trocknung, Entschwefelung und Staubfiltration zu unterziehen.⁷¹ Durch die Verbindung von im Biogas vorhandenen Wasserdampf und Schwefelwasserstoff entsteht Schwefelsäure. Sie stellt die größte Gefahr für sämtliche Bauteile der Anlage und das Aggregat dar. Um rechtzeitig die Säurebildung zu unterbinden, wird das wassergesättigte Biogas aus dem Fermenter kommend auf unter 10 °C abgekühlt. Dadurch kondensiert der Wasserdampf zu Wasser und kann bequem in einem Kondensatabscheiderschacht am tiefsten

⁶⁹ vgl. Mitterleitner H. (2004) in „Biogashandbuch Bayern - Materialienband“ S.57

⁷⁰ vgl. Stadtwerke Witzenhausen (1992) Broschüre „Nahwärmeinsel Steinstrasse“ S.3

⁷¹ vgl. Edelmann W. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.680

Punkt der Gasleitungen aufgefangen werden. Danach kann mittels Trocknung (Adsorption oder Absorption von H₂O) des Gases eine gänzliche Entfeuchtung erreicht werden.⁷²

Zur biologischen Entschwefelung des Rohgases wird weitgehend das mikrobielle Oxidationsverfahren durch die Bakteriengattung Thiobacillus angewandt. Hierbei kann unter Luftzufuhr in den Reaktor der elementare Schwefel ausgefällt und je nach Faulraumbelastung bis zu 99 % aus dem Biogas extrahiert werden.⁷³

Über die bisher aus Kostengründen eher selten realisierte externe biologische Entschwefelung (in gesonderten Behältern) lässt sich neben der Optimierung der Sauerstoffzufuhr auch der Düngewert des Endsubstrates verbessern. Denn dadurch kann der Landwirt den separat gewonnenen Schwefel nach Bedarf dem Gärrest in gezielten Dosen wieder beimengen.⁷⁴

Gegenüber der thermischen Nutzung in Heizkesseln ist die Anforderung an den H₂S-Gehalt für die Verwertung in Gas- oder Zündstrahlmotoren wesentlich höher. In der Regel setzt der Hersteller für die Leistungs- und Haftungsgarantie des Aggregates einen Schwefelwasserstoffgehalt von 200 - 250 ppm V voraus. Doch je nach eingefüttertem Ausgangssubstrat können H₂S-Schwankungen zwischen 100 und 1.100 ppm V auftreten.⁷⁵

Neuerdings wird zusätzlich die Extraktion von Ammoniak in immer mehr Anlagen forciert. Dadurch soll eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades (< 2 %) sowie eine Verlängerung der Standzeiten der Aggregate um bis zu 10 % eintreten.⁷⁶

Der Gesamtwirkungsgrad (GW) von Blockheizkraftwerken und somit die Effizienz der eingesetzten Bioenergie liegt im Bereich von 80 - 90 %. Er setzt sich aus den Wirkungsgraden des Motors, des Generators (η_{el} 34 - 40 % = ca. 1/3 des GW) sowie aus den der verschiedenen Wärmetauscher (η_{therm} = ca. 2/3 des GW) zusammen.⁷⁷

3.3.2 Mikrogasturbine

Gasturbinen erreichen vergleichsweise einen etwas geringeren Gesamtwirkungsgrad (82 %) als die Gas-Otto-Motoren. Dies ist auf den deutlich geringeren elektrischen Wirkungsgrad von nur 28 % zurückzuführen. Hinzu kommt, dass gegenwärtig ca. 15 - 20 % mehr Investitionskosten für eine Mikrogasturbine veranschlagt werden.⁷⁸

Demnach mag aufgrund der aktuellen, stromabhängigen Vergütung im EEG die Ökostromgewinnung aus Biogas unter Einsatz eines BHKWs auch im Hinblick auf die Kapitaleffizienz höher sein. Sollte sich diese Situation in den kommenden Jahren grundlegend ändern, indem eine wärmeabhängige Vergütung eingeführt werden würde, könnte die Turbine durch ihr relativ hohes Temperaturniveau in den durchaus emissionsarmen Abgasen und der

⁷² vgl. Scholwin F. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S.100

⁷³ vgl. Weiland P. (2003) in FNR „Gülzower Fachgespräche Band 21“ S.16 - S.18

⁷⁴ vgl. Scholwin F. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S.99

⁷⁵ vgl. IE (2006) in FNR „Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“ S.63

⁷⁶ vgl. Weiland P. (2003) in FNR „Gülzower Fachgespräche Band 21“ S.11

⁷⁷ vgl. Scholwin F. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S.104

⁷⁸ vgl. Scholwin F. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S.112

damit technisch simplen und kostengünstigen Wärmebereitstellung aber auch durch weite Wartungsintervalle des Aggregates (alle 4.000 Betriebsstunden) diese Tatsache umdrehen.⁷⁹ Der Aufbau und die Funktionsweise einer Mikrogasturbine sind mit der Technik eines Turboladers vergleichbar. Dabei wird Luft angesaugt, stark verdichtet und in einer Brennkammer zusammen mit Biogas vermischt und im Anschluss verbrannt. Durch die Temperaturerhöhung der entstandenen Brenngase wird deren Volumen vergrößert. Die heißen Abgase strömen anschließend mit enormer Geschwindigkeit in die Turbine und treiben dadurch eine luftgelagerte Antriebswelle (mit ca. 96.000 U / min.) zur Stromerzeugung in einem Generator an. Zuvor ist jedoch neben einer Gasreinigung und -trocknung eine Gasdruckerhöhung (auf ca. 6 bar atmosphärischer Druck) essentielle Voraussetzung für den reibungslosen Betrieb.⁸⁰

3.3.3 Gasaufbereitung

Sowohl für die Nutzung von Biogas in einer Brennstoffzelle als auch für die Einspeisung in das öffentliche Erdgasnetz ist die Anreicherung von Methan zwingend erforderlich. Über unterschiedliche physikalische und chemische Trennverfahren kann dabei das CO₂ vom CH₄ isoliert werden. Vorzugsweise sind momentan die Druckwasserwäsche (DWW) und die Druckwechseladsorption in der Anwendung.⁸¹

Zur Erreichung der geforderten Gasqualitäten nach DVGW Arbeitsblatt G 260 reichen die genannten Trennverfahren aus. In Tabelle 3.1 werden deshalb die brenntechnischen Unterschiede in Methangehalt, Heizwert und Wobbe-Index von den angestrebten Normgasen im direkten Vergleich vorgestellt.

Tabelle 3.1: Brenntechnische Kenndaten verschiedener Gasqualitäten

Gasart	CH ₄ -Gehalt in %	Heizwert kWh/m ³	Wobbe-Index kWh/m ³
Biogas	60,0	6,0	8,1
Erdgas L	82,0	9,0	12,4
Erdgas H	93,0	11,0	15,0
Methan	100,0	10,0	14,8

Quelle: Weiland 2003⁸²

Die Methananreicherung aus Biogas läuft generell bei allen Trennverfahren in vier einzelnen Schritten ab. Als erster Schritt erfolgt die Adsorption unter hohem Druck. Der zweite Schritt stellt die Desorption im Gegenstrom durch Drucksenkung dar, ein dritter erzielt ebenfalls über Desorption durch Spülen mit Rohgas die Anreicherung von Methan, und der letzte besteht aus dem Druckaufbau mit Produktgas.

⁷⁹ vgl. Simon R. (2004) in „Die Landwirtschaft als Energieerzeuger“ S.83

⁸⁰ vgl. Scholwin F. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S.111

⁸¹ vgl. Weiland P. (2003) in FNR „Gülzower Fachgespräche Band 21“ S.19

⁸² vgl. Weiland P. (2003) in FNR „Gülzower Fachgespräche Band 21“ S.13

Unterschiede in den Verfahren sind in der Verknüpfung der Teilschritte, dem Druckniveau und den spezifischen Betriebsparametern erkennbar.⁸³

Mit Hilfe der DWW werden bisher vielerorts biogene Gase zu Anhebung der Methankonzentration aufgereinigt. Aufgrund der unterschiedlichen Löslichkeiten von CH_4 und CO_2 können durch das amphotere Medium Wasser die basischen und sauren Komponenten im Biogas von dem energiereichen Methan gelöst werden. Dazu strömt zunächst das Gas über ein Kiesfilter (Wasserabscheider), um Feuchtigkeit und Schwebstoffe zu entfernen. Durch mehrmalige Verdichtung wird anschließend das Gas erwärmt und wieder abgekühlt, danach wird das Gas in einen Rieselbettreaktor (Absorptionssäule) geleitet, in dem 5 oder 25 °C warmes Waschwasser dem aufsteigenden Gas entgegen rieselt und mittels Schüttungen eine große Kontaktfläche zum Gas herstellt. Dabei nimmt das frische Wasser jegliche Bestandteile aus dem Gasgemisch auf, so dass das gewaschene Gas die Reinigungseinheit mit einem Methangehalt von 96 % verlässt. Das im Waschwasser absorbierte CO_2 wird in der Entspannungs- und Desorptionsphase wieder frei und kann nach der Filtration (Biofilter) beispielsweise in Gewächshäusern als CO_2 -Dünger genutzt werden. Abbildung 3.8 skizziert den gesamten Verfahrensablauf der DWW.

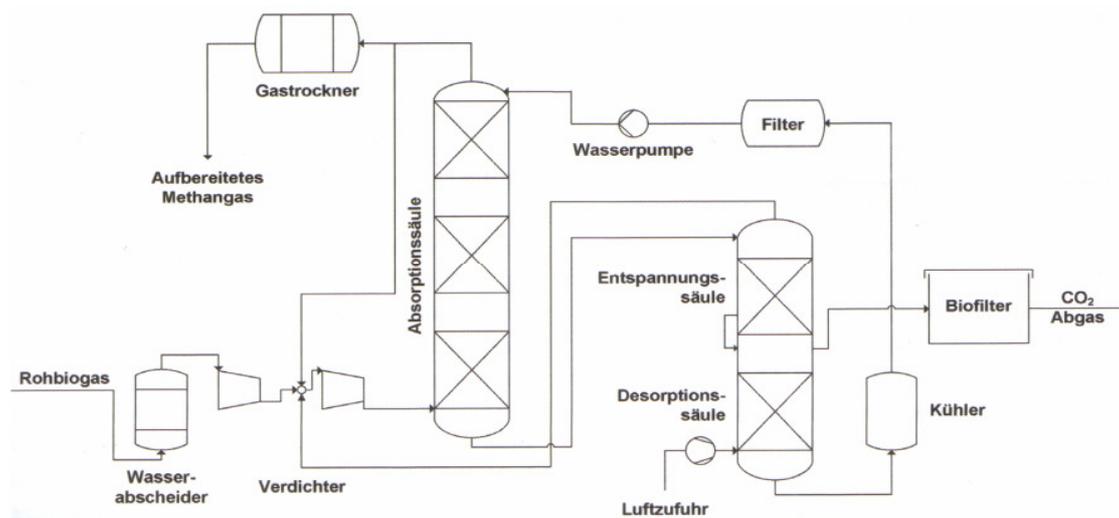


Abbildung 3.8: Verfahrensablauf der Druckwasserwäsche Quelle: FNR 2006⁸⁴

Großer Nachteil des Verfahrens ist allerdings der hohe Energie- und Frischwassereinsatz. Doch die variable Anpassung dieser Gaswäsche an Durchsatz und Intensität sowie der wartungsarme, zuverlässige und kostengünstige Betrieb sind der Grund für die europaweit wachsende Beliebtheit des Waschverfahrens.⁸⁵

Ein weiteres zuverlässiges Trennverfahren stellt die Druckwechseladsorptionstechnik mit ihren Aktivkohlefiltern, Molekular- und Kohlenstoffmolekularsieben dar. Das technisch ausgereifte Verfahren dient unter anderem der Stickstoff- und Kohlendioxidabtrennung von

⁸³ vgl. IE (2006) in FNR „Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“ S.35

⁸⁴ vgl. IE (2006) in FNR „Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“ S.39

⁸⁵ vgl. IE (2006) in FNR „Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“ S.39 u. S.40

Erd- oder Biogas. Ausgangsstoff für die Molekularsiebe (Zeolithe) ist die Steinkohle. Sie wird fein vermahlen und mit Pech zu Förmlingen gepresst. Nach einer thermischen Behandlung ist ihr Porensystem erweitert, und sie kann ihren Wasseranteil ohne eine Veränderung der Kristallgitterstruktur abgeben, um im Basenaustausch andere Verbindungen wie beispielsweise Wasser-, Sauer- oder Stickstoff aufnehmen zu können.

Daher sind der Betrieb und die Wartung der Druckwechseladsorption relativ unproblematisch. Selbst die Standzeiten der Anlagen sind nahezu unbegrenzt und sie weisen einen erstaunlich geringen Energieverbrauch auf. Nur ist die Reinigungskapazität dieser Technik äußerst geringfügig, so dass heute eher die etwas flexiblere DWW bevorzugt wird.⁸⁶ Denn die Gasaufbereitung kann nur dann rentabel sein, wenn größere Biogasmengen gereinigt und anschließend entweder als Treibstoff, als Erdgassubstitut in Gasleitungen oder als regionaler Energieträger in Brennstoffzellen zum Einsatz kommen.

3.3.4 Brennstoffzelle

Neben der soeben behandelten Gasaufbereitung ist für die Nutzung von Biogas in Brennstoffzellen eine weitere Feinstreinigung mittels Aktivkohlefilter besonders wichtig, da selbst kleine Mengen an Spurengasen und Schadstoffen den feinen Elementen schaden.⁸⁷

Der Aufbau einer Brennstoffzelle ähnelt dem einer handelsüblichen Batterie. Anode und Kathode sind durch ein Elektrolytenmedium räumlich voneinander getrennt, dadurch verlaufen auch Reduktion und Oxidation isoliert ab. Die Namensgebung von Brennstoffzellentypen ist von der Verwendung des Elektrolyten abhängig.⁸⁸

Die Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) Brennstoffzelle ist eine der wenigen, die Biogas als einzigen Energielieferanten verträgt. Trotzdem sollte in diese Niedertemperatur-Brennstoffzelle für die Gewährleistung einer langjährigen Betriebsdauer nur hochreines Methan gelangen. Innerhalb dieser Brennstoffzelle wird die direkte Umwandlung von chemischer Energie aus dem Methan zu elektrischem Strom fast ohne Freisetzung von Emissionen realisiert. Hierzu bedarf es zuvor einer katalytischen Dampfreformierung von Methan zu Wasserstoff. Denn die bei der elektrochemischen Reaktion in der Brennstoffzelle stattfindende Verschmelzung von Wasser- und Sauerstoff zu dem Dipol Wasser (Umkehrprinzip der Elektrolyse von H₂O) stellt die eigentliche Energieumwandlung dar. Folgende Abbildung zeigt die geschilderte Reaktion auf.

⁸⁶ vgl. IE (2006) in FNR „Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“ S.34 u. S.36

⁸⁷ vgl. Weiland P. (2003) in FNR „Gülzower Fachgespräche Band 21“ S.21

⁸⁸ vgl. Ott M. (2003) in FNR „Gülzower Fachgespräche Band 21“ S.60

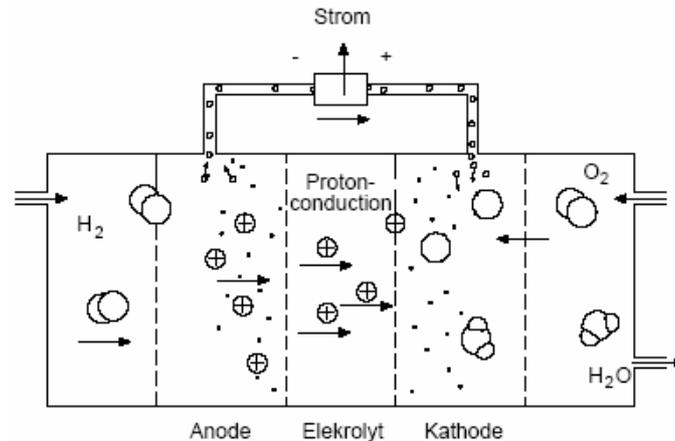


Abbildung 3.9 Funktionsprinzip der Brennstoffzelle Quelle: ASUE 2001 ⁸⁹

Dieses Phänomen hat gegenüber den Verbrennungsaggregaten den Vorteil, dass der energetische Verlust, der durch die thermischen und mechanischen Übertragungswege bis hin zum Wärmetauscher oder Generator entsteht, nicht anfällt. Dadurch sind hohe elektrische Wirkungsgrade von bis zu 50 % erreichbar. Neben der an den Elektroden fließenden elektrischen Energie wird bei dem chemischen Prozess auch nutzbare Wärmeenergie durch die Betriebstemperatur (80 °C) an die Umgebung abgegeben.⁹⁰

In anderen Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MCFC / SOFC) findet die Reformierung intern statt, wodurch deren Abwärme im Anschluss in Turbinen ebenfalls verstromt werden kann. Damit geht eine weitere Effizienzsteigerung der elektrischen Energiegewinnung einher. Darüber hinaus kann durch Anwendung von CO₂ und Schwefel unempfindlichen Elektrolyten (z.B. Karbonschmelze) der Biogasqualität ein größerer Spielraum eingeräumt werden.

Stellt man allerdings die Investitionskosten der hier diskutierten Energieumwandlungstechnik (12.000 €/KW) den Kosten für die Nutzungsvariante mit einem BHKW (ca. 3.500 €/KW) gegenüber, erkennt man, weshalb bisher Gasmotoren konkurrenzlos günstig Bioenergie erzeugen.⁹¹

⁸⁹ vgl. ASUE (2001) in „Biogashandbuch Bayern - Materialienband“ S.62

⁹⁰ vgl. Scholwin F. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S.112

⁹¹ vgl. Scholwin F. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S.113

3.3.5 Einspeisung in das Erdgasnetz

Laut den gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Gaseinspeisung auf europäischer und deutscher Ebene sind die Netzbetreiber zur Gleichbehandlung aller Netzzugangskunden verpflichtet. Deshalb sind auch die Ansprüche zur Abgabe von Biogas an das regionale Gasnetz klar durch die Einspeisemenge, die stoffliche Beschaffenheit und die Kenndaten der Verbrennung definiert. Alle Regelungen, die damit zusammenhängen wie Übernahme und Transport, sind in verschiedenen DVGW-Arbeitsblättern (G 260, G 685, G 262,...) festgeschrieben.⁹²

Für die Erreichung der verlangten Gasqualität ist neben der Gasaufbereitung, die Trocknung und Entschwefelung des Rohgases unumgänglich. Weiterhin sind zur direkten Einspeisung in das öffentliche Erdgasnetz besondere Kriterien zu erfüllen. Grundlegend müssen dazu eine gesonderte Anschlussleitung und ein großer Gasspeicher bestehen. Darüber hinaus sollte das gereinigte Biogas auf eine höhere Druckstufe als der in der Leitung herrschende Druck komprimiert werden.⁹³

In Deutschland muss dabei in drei Druckstufen unterschieden werden. Die Anpassung für das Niederdruck- (< 100 mbar) und das Mitteldruckerdgasnetz (> 100 mbar; < 1 bar) geschieht über die Druckregelung. Um aber den Leitungsdruck des Hochdruckerdgasnetzes (> 1 bar; < 25 bar) erreichen zu können, ist meist eine Gasverdichtung notwendig.

Ferner ist bei der Einspeisung von Biogas in das Verteilungsnetz zu beachten, dass zeitgleich zu der eingeleiteten Gasmenge an anderer Stelle Gas im vergleichbaren Umfang wieder entnommen werden muss. Zudem darf es im Erdgasnetz nicht zu einer starken Absenkung der Methanzahl (MZ) kommen. Die MZ ist mit der Oktanzahl für Flüssigkraftstoffe vergleichbar, da sie die Maßeinheit für die Klopfbarkeit des Gases darstellt. Sollte der MZ-Wert des Leitungsgases unter 70 sinken, ist die Nutzung in Gasmotoren (BHKWs) mit der Gefahr von nicht unerheblichen Maschinenschäden verbunden.⁹⁴ Das bedeutet, dass durchgehend vereinbarte Biomethankapazitäten und -qualitäten zu liefern sind, die für den Biogaserzeuger stets einen erhöhten Risikofaktor in seinem Wirtschaften darstellen können. Hinzu kommt eine große Ungewissheit über die Höhe der Durchleitungsgebühr, die von dem jeweiligen Netzbetreiber veranschlagt wird.⁹⁵ Gleichzeitig sind erhöhte Investitions- und Betriebskosten für die Gasaufbereitung zu erwirtschaften, die unter den gegebenen Bedingungen bisher keine ökonomisch sinnvolle Biogaseinspeisung erlauben.⁹⁶

⁹² vgl. Friedrichs G. (2003) in FNR „Gülszower Fachgespräche Band 21“ S.79

⁹³ vgl. IE (2006) in FNR „Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“ S.63

⁹⁴ vgl. Stricker M. (2003) in FNR „Gülszower Fachgespräche Band 21“ S.89

⁹⁵ vgl. Stricker M. (2003) in FNR „Gülszower Fachgespräche Band 21“ S.92

⁹⁶ vgl. Scholwin F. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S.115

4. Modellkonzept

4.1 Entwicklung des Grundgedankens

Der entscheidende Anstoß für die Konzeptidee wurde im Rahmen der Initiative Ökostrom von der Fachschaft des Fachbereiches Ökologische Agrarwissenschaften gegeben. Schon 2004 plädierten die Studenten dafür, eine Umstellung von 5 bis 10 Prozent des gesamten Strombedarfs der Uni Kassel auf Ökostrom vorzunehmen. Da dieses Vorhaben aufgrund sehr langfristiger Energieabnahmeverträge (Bündelungsverträge; Laufzeit 5 Jahre) zwischen dem Land Hessen und dem Energieversorger e-on Mitte scheiterte, überlegte man, welche weiteren Möglichkeiten zur Nutzung regenerativer Energien am Uni-Standort Witzenhausen umsetzbar wären. Dabei fiel der Blick schnell auf das vorhandene Nahwärmenetz im Campus-Bereich. Denn hier wäre neben der Stromversorgung gleichzeitig auch eine direkte Wärmeversorgung für die Uni-Gebäude in der Steinstraße möglich.

Durch die Verbundenheit des Fachbereiches zur Landwirtschaft wurde von Anfang an die Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen präferiert. Hinzu kam die Idee der energetischen Verwertung von Bioabfällen aus der Region, da Recherchen ans Licht brachten, dass Überkapazitäten des ansässigen Kompostwerkes das zukünftige Bestehen der Anlage in Frage stellten. Zugleich bot sich von vorn herein der Kompostplatz auf dem Burgberg mit seiner guten Transportanbindung zu landwirtschaftlich genutzten Flächen an. Daraufhin begab man sich mit diesem Hintergrundwissen auf die Suche nach geeigneten Lösungsansätzen für die Projektinitiative.

4.2 Aufbau der vorhandenen Infrastruktur

Das örtliche Nahwärmenetz (Nahwärmeinsel Steinstraße) der Stadtwerke Witzenhausen, das derzeit neben den Gebäuden der Uni in der Steinstraße auch das Krankenhaus, die Steintor Schule, das Collmannhaus und das Tropengewächshaus über die Kraft-Wärme-Kopplung mit Wärme aus russischem Erdgas versorgt, ist das Kernstück der vorhandenen Infrastruktur.⁹⁷ Zwei MAN-Deutz-Gasmotoren liefern mit 616 und 801 KW thermischer Leistung ausreichend Wärmeenergie, um die Grundlast des Wärmenetzes zu decken. Zusätzlich stehen für den Winter drei Spitzenlastkessel mit einer Gesamtwärmeleistung von 5350 KW_{therm} zur Verfügung. Seit Oktober 1992 ist die Heizanlage mit unveränderter Technik in Betrieb.⁹⁸ Beide BHKWs haben mittlerweile jeweils über 55.000 Betriebsstunden hinter sich und sind demnach austauschwürdig. Aufgrund ihrer O₂-Regelung und den geringen elektrischen Wirkungsgraden sind die Aggregate nicht für die moderne Biogasnutzung einsetzbar.⁹⁹ Das verzweigte Leitungsnetz hingegen ließe sich optimal für eine kostengünstige und energetisch sinnvolle Energieerzeugung aus Biomasse nutzen, da hier ganzjährig eine relativ

⁹⁷ Bauchrowitz W. (2004) mündliche Aussage (Gespräch vom 12.07.04)

⁹⁸ vgl. Brübach (1992) Stadtwerke Witzenhausen Broschüre „Nahwärmeinsel Steinstrasse“ S.8

⁹⁹ Mielke J. (2005) schriftliche Stellungnahme (E-Mail vom 8.06.05)

hohe Wärmeabnahme zentral vorhanden ist. Die folgende Abbildung 4.1 skizziert den Verlauf der Wärmeleitungen vom BHKW zu den verschiedenen Abnehmern.

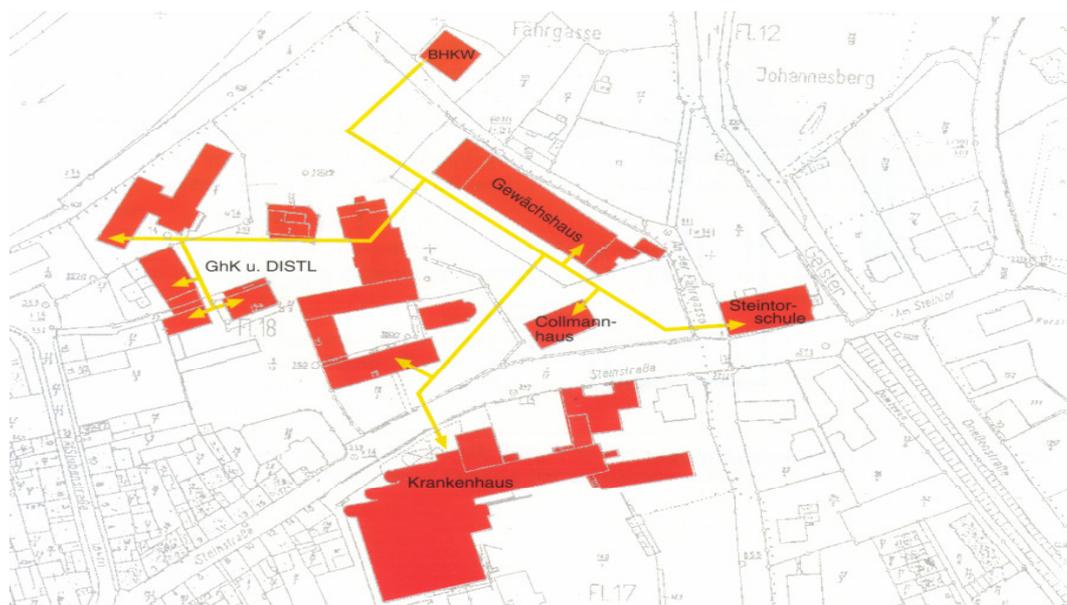


Abbildung 4.1 Nahwärmenetz Steinstraße Quelle: Stadtwerke Witzhausen 1992¹⁰⁰

Unter den Wärmeabnehmern befinden sich überwiegend öffentliche Gebäude, deren einzelne Wärmemengen verbraucherdifferenziert in Tabelle 4.1. dokumentiert sind. Im Jahresmittel (2003-2005) weist das Krankenhaus deutlich den höchsten Wärmeverbrauch mit ca. 3353 MWh_{therm} auf.¹⁰¹ Gleichzeitig ist dort aufgrund des enormen Warmwasserbedarfs selbst im Sommerhalbjahr eine entsprechend hohe Wärmeabnahme vorhanden. Insgesamt beläuft sich der Jahresdurchschnittsverbrauch im Wärmenetz Steinstraße auf 5816,31 MWh_{therm}.

Tabelle 4.1: Wärmeverbrauch des Nahwärmenetzes Steinstraße im Jahresmittel

Gebäude	Tropengewächshaus	Uni-Gebäude Steinstraße	Ditsl / Collmannhaus	Krankenhaus	Steintorschule	durchschnittl. Gesamtverbrauch Nahwärmenetz in MWh _{therm}
Monat	Ø Verbrauch 2003-2005	Ø Verbrauch 2003-2005	Ø Verbrauch 2003-2005	Ø Verbrauch 2003-2005	Ø Verbrauch 2003-2005	
Januar	133,43	174,73	30,21	367,33	33,17	738,87
Februar	117,07	159,70	41,93	506,33	44,01	869,04
März	93,77	142,33	27,46	361,33	28,00	652,89
April	41,63	78,70	17,06	261,33	11,67	410,39
Mai	35,77	51,93	9,90	185,67	8,33	291,60
Juni	20,60	30,87	6,20	118,67	1,20	177,54
Juli	15,07	24,93	6,26	116,67	0,22	163,15
August	19,13	26,03	6,64	98,33	0,00	150,13
September	64,30	60,70	11,14	163,00	5,00	304,14
Oktober	72,95	98,90	20,49	271,33	16,38	480,05
November	95,03	119,67	28,21	370,33	29,00	642,24
Dezember	145,13	174,10	40,04	532,67	44,33	936,27
Ø Jahresverb. MWh _{therm}	853,88	1142,59	245,54	3352,99	221,31	5816,31

Quelle: Eigene Darstellung

¹⁰⁰ vgl. Brübach (1992) Stadtwerke Witzhausen Broschüre „Nahwärmeinsel Steinstraße“ S.4

¹⁰¹ Waldeck (2006) Excel-Datei über Verbrauchsdaten Krankenhaus von 2003-2005 erhalten am 12.06.06

Demnach müssen jährlich bei eingerechneten Verlusten von 6 % durch die Wärmeleitungen und -tauscher eine Wärmeenergie von ca. 6165 MWh_{therm} bereitgestellt werden, wobei die benötigte Wärmemenge im Winter mehr als der sechsfachen des Sommers entspricht. Die Erfahrungen zeigen, dass der geringste Wärmebedarf im Gesamtnetz meist im Monat August zu erwarten ist. Dementsprechend orientiert sich die Auslegung für das Grundlast leistende BHKW an dem niedrigsten Sommerwert (inkl. 12 % Sicherheitszuschlag), der sich bei ca. 168 MWh_{therm} pro Monat bewegt. Insofern ist die minimale Leistung des BHKW von 246,33 KW_{therm} bei täglich 22 angenommenen Betriebsstunden zur Grundversorgung des Nahwärmenetzes erforderlich. Die in Abbildung 4.2 gelb eingezeichnete Kurve markiert den Leistungsbereich, der zurzeit durch den kleinen MAN-Gasmotor (616 KW_{therm}) abgedeckt wird. Um das Spektrum des Wärmebedarfs in den Sommermonaten (Mai bis September) bis in höhere Bereiche abfahren zu können, ist eine möglichst hohe maximale Leistungsgrenze zu wählen. Mit dem Austausch des jetzigen BHKWs gegen ein effizientes biogastaugliches BHKW mit einer Primärleistung von 1100 KW könnte dies geschehen, so dass das größere Erdgasaggregat (801 KW_{therm}) deutlich geringere Laufzeiten pro Jahr hätte und zusammen mit den Spitzenlastkesseln weiterhin die Verbrauchsspitzen im Winter abfangen würde.

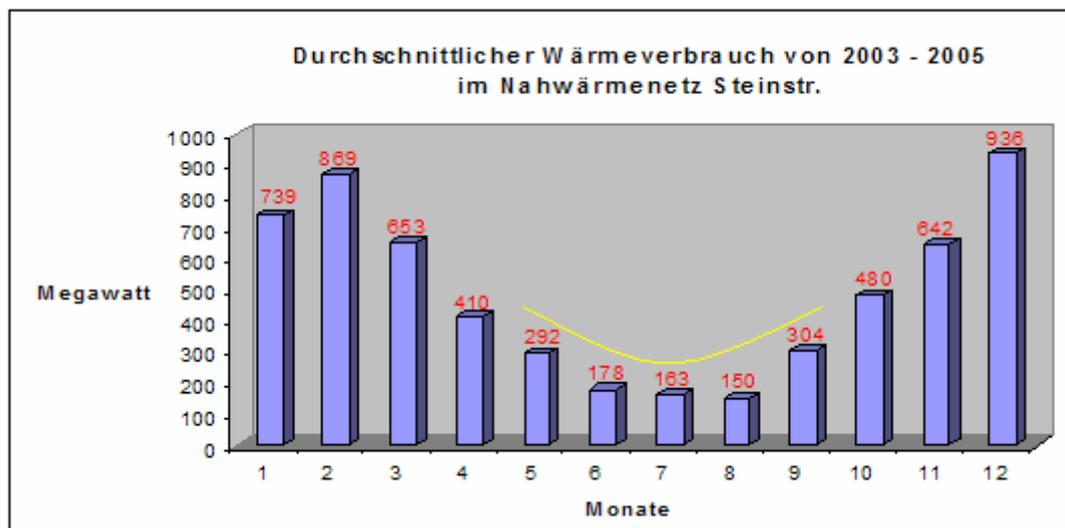


Abbildung 4.2 Verbrauchsübersicht Nahwärmenetz Steinstraße Quelle: Eigene Darstellung

Neben der technisch nutzbaren Infrastruktur ist in Witzenhausen eine Vielzahl an kompetenten Personen zur planerischen, praxisnahen und wissenschaftlichen Umsetzung von Projekten im Bereich der energetischen Biomassenutzung ansässig. Beispielsweise sind einige erfahrene Ingenieurbüros (IGW, Witzenhausen Institut), das HeRo (Biomassekompetenzzentrum Hessen) und eine weit gefächerte Kompetenz der Universität Kassel am Standort vertreten. Hinzu kommt die Kooperation der Uni mit dem ISET (Institut für Solare Energietechnik) und anderen Unternehmen aus dem Sektor der Bioenergie (Firma Wagner). Darüber hinaus besteht bei den Landwirten aus der direkten Umgebung die Bereitschaft ausreichend Biomasse als essentielle Grundlage des Gesamtkonzeptes auf ihren

landwirtschaftlichen Nutzflächen anzubauen.¹⁰² Weiterhin kann ab 2008, dank der Etablierung des Kompostwerks in den 80'igern in Witzenhausen am Burgberg, aus den Haushalten jährlich ein Potential von bis zu 13.500 Mg organischen Reststoffen zur Vergärung in einer Biogasanlage bereitgestellt werden.¹⁰³

4.3 Konzeptidee

Eigentlicher Grundgedanke des Konzeptes ist, die Etablierung eines gesellschaftsintegrierten und möglichst effizienten Biogasnutzungsmodells, das es sich zur Aufgabe macht, sichtbar die Energie- und Stoffkreisläufe in der Region zu schließen und vorhandene Kompetenzen zu vernetzen. Ersteres soll über die anaerobe Vergärung von abgepressten biogenen Hausabfällen (Biotonne) und Energiepflanzen aus der Landwirtschaft geschehen, indem die daraus gewonnene Energie über eine extra verlegte Biogasleitung in die Stadt transportiert wird. Zudem sollen danach die verfügbaren Pflanzennährstoffe der vergorene Biogasgülle wieder der Lebensmittel und Energie produzierenden Landwirtschaft zu Gute kommen. Letzteres könnte über die kommunikative Zusammenarbeit von praxisorientierten Landwirten, Kompostanlagenbetreibern, Energieversorgungsunternehmen sowie den eher planerisch- oder wissenschaftlich versierten Ingenieuren, Professoren und Studenten in der Umsetzung des unten skizzierten Modellprojektes umgesetzt werden (siehe Abbildung 4.3).

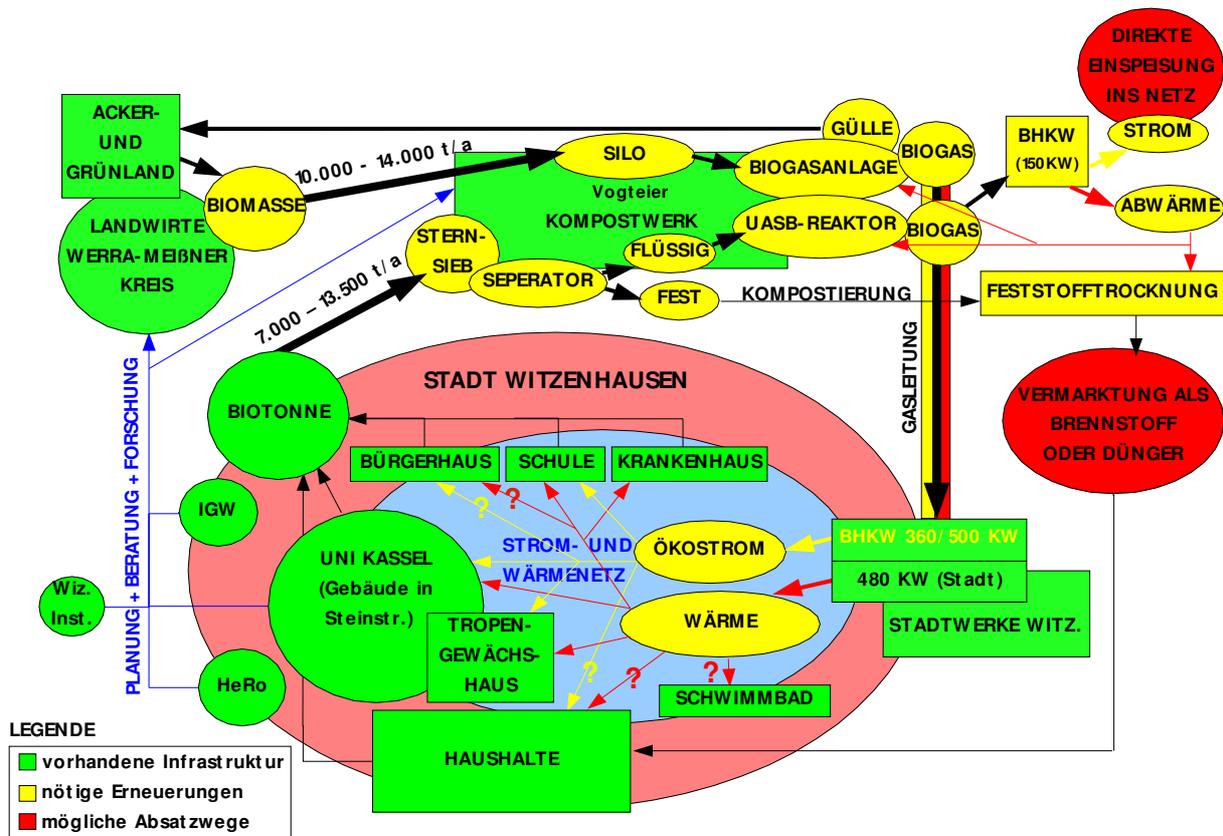


Abbildung 4.3 Skizze Modellprojekt Witzenhausen Quelle: Eigene Darstellung

¹⁰² Roth U. (2006) Kreisbauernverband mündliche Aussage (Besprechung vom 21.02.06)

¹⁰³ Schütz G. (2006) Vogteier Kompost GmbH mündliche Aussage (Telefonat vom 26.06.06)

Der artenreiche Anbau von nachwachsenden Rohstoffen in der Landwirtschaft mit einem Umfang von ca. 10.000 - 14.000 Mg Frischmasse pro Jahr soll das vielfältige Substrat für eine geplante NawaRo-Biogasanlage in Witzenhausen liefern. Weiterhin stehen für eine zweite Vergärungsanlage momentan 6.000 - 8.000 Mg/a organische Abfälle (Biotonne) zur Erzeugung von Bioenergie am Burgberg zur Verfügung. Aller Voraussicht nach sollen diese sogar durch weitere 5.500 - 7.500 Mg/a Bioabfälle, die bisher aufgrund zu geringer Kapazität am Burgberg aus dem Werra-Meißner-Kreis in Thüringen entsorgt wurden, ergänzt werden.

Um eine konstante Bereitstellung von relativ homogenen Ausgangssubstraten über das ganze Jahr zu garantieren, ist das Ziel die landwirtschaftliche Biomasse entsprechend der herkömmlichen Futterproduktion direkt nach der Ernte vor Ort (am Burgberg) zu konservieren. Anschließend kann der jeweilige Bedarf aus dem Silo entnommen und der NawaRo-Anlage über die in Kapitel 3.2 beschriebene Einbringtechnik zugeführt und das daraus gewonnene Methangas mittels einer 2,7 km langen Biogastrasse (4 Zoll PET) zu dem Nahwärmenetz der Stadtwerke transportiert werden. Dort wäre dann eine Substitution des russischen Erdgases durch das Biogas möglich, indem die Stadtwerke über die Verbrennung in einem biogastauglichen BHKW (360 KW_{el}) die in der Karte (Abbildung 4.4) gelb gekennzeichneten Gebäude zukünftig mit Ökostrom und Ökowärme aus nachwachsenden Rohstoffen versorgen. Darüber hinaus ist durch den weiteren Teilbetrieb des bestehenden konventionell gespeisten MAN-BHKWs (480 KW_{el} = 808 KW_{therm}) nach wie vor die absolute Versorgungssicherheit gewährleistet.

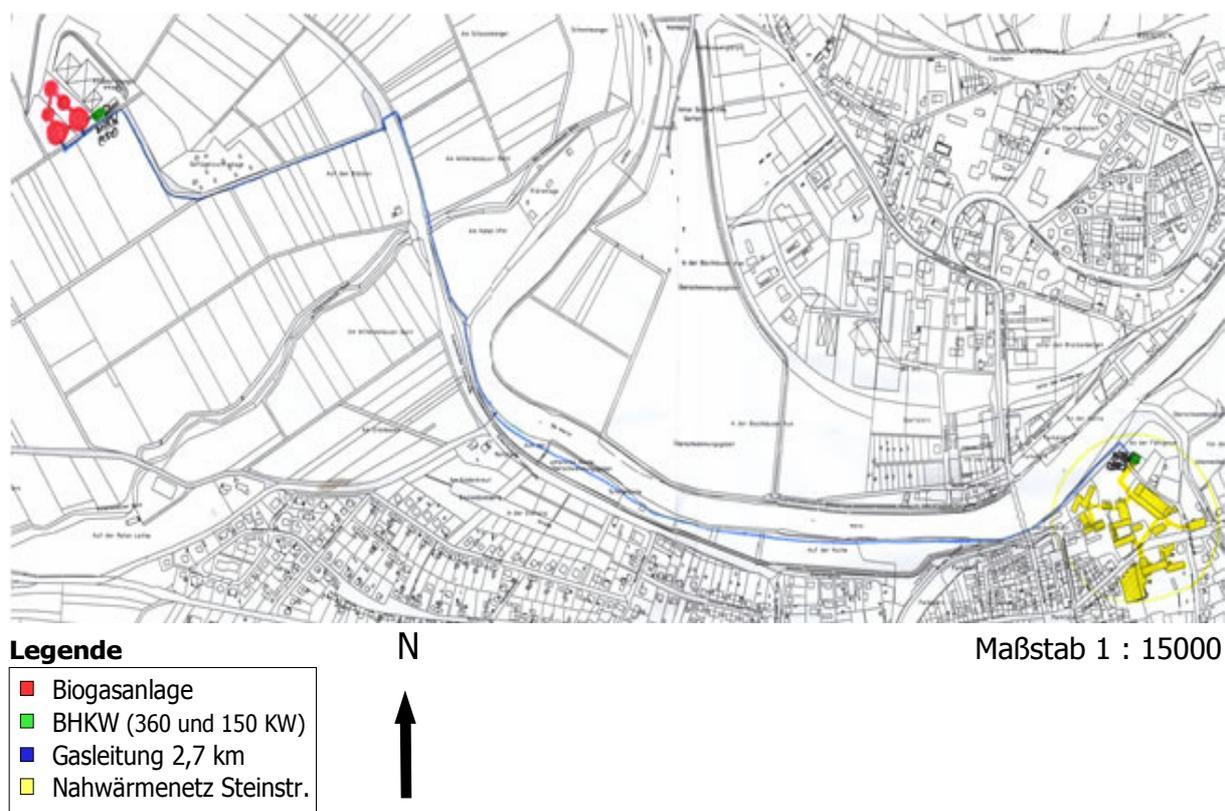


Abbildung 4.4 Verlauf der Biogasleitung in Witzenhausen **Quelle:** Eigene Darstellung

Zusammen mit den organischen Abfällen vieler Haushalte des Werra-Meißner-Kreises wird in den soeben erwähnten Gebäuden bzw. Institutionen deren biogener Restmüll gesammelt und über die Biotonne entsorgt. Diese Abfallfraktion ist unter Berücksichtigung der BioAbfV laut Biomasseverordnung § 2 Nr. 4 als anerkannte Biomasse einzustufen.¹⁰⁴ Demnach lässt sich die Energie, die aus Bioabfällen erzeugt wird, auch nach den Vergütungsrichtlinien des novellierten EEGs verwerten. Mittels großer Müllfahrzeuge (Firma Fehr) werden diese Biomassen aus der Region sechsmal wöchentlich frei Kompostanlage angeliefert. Allerdings weisen die Chargen über das Jahr hinweg betrachtet in Abhängigkeit von Ess- bzw. Sortiergewohnheiten einzelner Haushalte und aufgrund unregelmäßig anfallender Grünschnitte erhebliche qualitative und quantitative Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung auf.¹⁰⁵ Bezogen auf die organische Substanz wurden besonders im Frühling und Frühsommer extreme Schwankungsbereiche (zwischen 30 und 57 % OS) bei gleichzeitig relativ niedrigen OS-Anteilen gemessen. Im Winter hingegen sind deutlich höhere OS-Gehalte und geringe Schwankungen von 50 - 65 % OS die Regel, da hier schwere Küchenabfälle überwiegen.¹⁰⁶ Die Tatsache, dass diese Substrateigenschaft sich nur schwer mit der auf Substrathomogenität angewiesene Fermenterbiologie vereinbaren lässt, könnte die energetische Nutzung der Bioabfälle erschweren. Allerdings ist dank der USAB-Vergärungstechnik sowie der Fest- / Flüssigtrennung des Substrates in zwei verwertbare Komponenten eine energetische Nutzung neben der bisher praktizierten Kompostierung möglich. Dazu muss die biogene Hausmüllfraktion mittels Separationstechnik der Firma Komptech von Plastik, Steinen und anderem Restmüll befreit und danach abgepresst werden (siehe Bilderreihe Kapitel 5). Für die aerobe Umsetzung kommt demnach der Presskuchen in Betracht. Der Presssaft kann in einem dafür ausgelegtem Hochleistungsreaktor (siehe Abbildung 3.6) anaerob fermentiert werden, so dass das entstandene Biogas sich direkt am Kompostwerk in einem kleinen BHKW (150 KW_e) zur Wärmeversorgung beider Reaktoren und zur Stromeinspeisung ins Netz nutzen ließe. Zusätzlich könnte besonders im Sommer die restliche Abwärme in der Feststofftrocknung zur Produktion von Düngern (Pelletierung von Kompostsubstraten) oder Brennstoffen (Holzhackschnitzeln, NawaRo-Pellets,...) verwendet werden. Dementsprechend würden drei neue Betriebe, die miteinander verknüpft das Gesamtkonzept ergeben, entstehen. Einer der drei Betriebe müsste in direkter Zusammenarbeit mit dem Kompostwerk, den Presssaft aus dem Biomüll gewinnen und anaerob vergären, um als Wärme-, Strom- und Rohstofflieferant (A) am Burgberg den anderen zwei Betrieben die Produktionsgrundlagen zu stellen. Ein weiterer Betrieb (B) wäre stark auf die vorgelagerte Landwirtschaft und die Abwärme des ersten Betriebes angewiesen, da er die Vergärung der Bioenergiepflanzen vornimmt und das gesamte NawaRo-Biogas über die Gasleitung an die Stadtwerke verkauft. Der letzte Betrieb (C) würde in Abhängigkeit von Betrieb A die dort überschüssige Wärme in

¹⁰⁴ vgl. Öko-Institut (2005) in „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ S.119

¹⁰⁵ vgl. Kaltschmitt M. (2001) in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.117

¹⁰⁶ vgl. Fricke K. (1990) in „Grundlagen der Kompostierung“ S.25

der Weiterverarbeitung von Kompost zu pelletierten Spezialdüngern verwenden oder auch aus Abfällen der Forstwirtschaft sowie der Holz verarbeitenden Industrie Brennstoffe herstellen. Allerdings steht die Biogasversorgung des Nahwärmenetzes Steinstraße (Betrieb B) zur Ökostromproduktion und der Grundlast abdeckenden Wärmeerzeugung durch ein wärmegeführtes BHKW der Stadtwerke im Vordergrund der Betrachtungen. Das Ziel der zentralen und damit effizienten Wärmenutzung sowie die Parallelwirtschaft der agrarischen Vergärungsbetriebe mit Bioabfall- und NawaRo-Substraten ermöglicht nicht nur eine ressourcenschonende und energiesparende Abfallbehandlung, sondern befähigt diese zudem deren Biogaserzeugung aus dem Anbau nachwachsender Rohstoffe über die Schließung von Stoffkreisläufen (Substrat- und Düngemittelersparnis) ökonomisch tragfähiger zugestalten.¹⁰⁷ Neben den heimischen Landwirten kommen in erster Linie die Besitzer des Kompostwerkes (Vogteier Kompost GmbH) als Hauptinvestoren für dieses Anlagenkonzept in Frage. Vorteilhaft wäre, wenn sich gleich mehrere Akteure aus der Region über die Mitgliedschaft in einer Betreibergesellschaft an dem Produktionsprozess maßgeblich beteiligen würden. Insofern könnte die Wertschöpfungskette je nach Bedarf flexibel gesteuert und jederzeit ausreichend qualitativ und quantitativ Substratmaterial aus der heimischen Landwirtschaft langfristig bereitgestellt werden.

Das soeben dargestellte Konzept wird in Kapitel 7 unter den wirtschaftlichen Aspekten der einzelnen Betriebe differenziert betrachtet, um die Machbarkeit des Vorhabens einschätzen zu können. Vorausschauend werden danach einzelne Einflussfaktoren für ein beispielhaftes Zukunftsszenario verändert und diese Ergebnisse diskutiert. Im folgenden Abschnitt werden primär Fragen zur Sozialverträglichkeit und Produktionsfreundlichkeit des Standortes geklärt.

4.4 Akzeptanz der Biogasanlage am vorgesehenen Standort

Der Standort am Burgberg bietet aufgrund der räumlichen Distanz (ca. 1 km) zur Stadt und der Nähe zu den Anbauflächen (siehe Karte Abb. 4.4) die größte Akzeptanz von Seiten der Landwirte und Kompostanlagenbetreiber, denn dort ist mit geringen Investitions- und Betriebskosten für die Etablierung der Anlagen bei gleichzeitig optimalen Auslastungen der Maschinen zu rechnen. Gleich mehrere Synergieeffekte können mit der Kompostanlage sinnvoll genutzt werden wie beispielsweise die gemeinsame Nutzung des Radladers oder der Waage. Neben der Einhaltung der TA-Luft durch Emissionen, die bei der Vergärung, Kompostierung oder dem Betrieb der BHKWs entstehen, ist den Bedingungen der 4. Bundes-Immissionschutzverordnung nachzukommen, wenn ein BImSchV-Antrag für gasgefeuerte Aggregate zwischen 100 KW und 1 MW FWL gestellt wird. Sowohl die Kennwerte der zu genehmigenden Gesamtanlage als auch ihre Kapazitäten haben neben der Beurteilung der Behörden Einfluss auf das Ausgehen des Genehmigungsverfahrens¹⁰⁸.

¹⁰⁷ vgl. Weiland P. (2005) in „Anearobtechnik“ S.535

¹⁰⁸ vgl. IGW (2003) in „Machbarkeitsstudie über die Realisierung einer Biogasanlage auf der Deponie am Breitenberg Werra-Meißner-Kreis“ S. 38 u. 39

Von großem Vorteil ist zudem der einfache An- und Abtransport von Biomassen zwischen den landwirtschaftlichen Flächen, der Stadt und dem Standort Burgberg, der nur eine geringfügige Steigerung des bisherigen Verkehrsaufkommens verursachen würde. Darüber hinaus wird der baldige Ausbau der Verbindungstrasse zum Burgberg geplant.¹⁰⁹ Dementsprechend sind langfristig keine nennenswerten Lärmbelästigungen für den Umkreis der Anlage zu erwarten. Einziger Streitpunkt könnte die Geruchsbelastung durch die Etablierung der Biogasanlage oder auch die Erweiterung der Kompostanlage darstellen, da schon heute bei drückendem Wetter und leichtem Westwind die Gerüche, die beim Umsetzen der Kompostmieten frei gesetzt werden, am Rande der Stadt wahrgenommen werden.

Obwohl durch die Biogasanlage an sich kaum von einer Steigerung der Geruchsbelastung auszugehen ist, könnten sich Anwohner durch die leichten Geruchsemissionen der Silage oder durch die bodennahe Gülledüngung im Sommerhalbjahr gestört fühlen. Doch im Rahmen der Düngerausbringung unter der Befolgung der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft sind geringe zeitliche Belastungen von April bis Oktober für die umliegenden Anwohner zumutbar. Bei einer Güllemenge von 8.000 - 9.000 m³ pro Jahr kämen täglich in dem benannten Zeitraum durchschnittlich 5-7 Fuhren zustande, die nur selten Flächen in Stadtnähe betreffen. Wird allerdings die Menge der zu kompostierenden Bioabfälle von 7.000 Mg/a auf bis zu 13.500 Mg/a aufgestockt, sind diesbezüglich wahrscheinlich größere Bedenken in der Toleranz der Bevölkerung und damit auch Schwierigkeiten in dem Genehmigungsverfahren zur Vergrößerung des Kompostwerkes zu erwarten. Diese können im Extremfall bis zur Vereitelung des Projektes führen. Obendrein kann durch eine Ausweitung der Rottefläche eine Konkurrenzsituation zwischen der NawaRo-Anlage und dem Kompostwerk hinsichtlich der verfügbaren Nachbarfläche (Firma Heppe; ca. 9.000 m²) aufkommen. Insgesamt sprechen aber bisher die meisten Argumente für diesen Standort, da auf vergleichbaren Alternativstandorten für eine Vergärungsanlage in dieser Größenordnung eher größere Probleme in der Installation und Akzeptanz der Bevölkerung erwartet werden.

Im Großen und Ganzen ist eine positive Einstellung in der Bevölkerung gegenüber Bioenergieanlagen zu spüren, solange dadurch die Region gestärkt wird. Von Seiten des Stadtparlamentes Werra-Meißner ist eine Unterstützung des Gesamtkonzeptes zugesagt worden. Zudem will die Bürgermeisterin Frau Angela Fischer mit persönlichem Engagement das Projekt fördern, weil erwartet wird, dass das Image der regenerativen Energiegewinnung der Touristenstadt Witzenhausen neue Chance bieten und die Energieversorgung von morgen sichern kann.¹¹⁰

Ein solch konstruktives Ergebnis in Unterstützung und Toleranz durch die Stadt und die Öffentlichkeit konnte nur durch frühzeitige Öffentlichkeitsarbeit wie Projektpräsentationen und aufklärende Presse im Landkreis erreicht werden.

¹⁰⁹ Westermann (2006) mündliche Aussage (Sitzung vom 6.02.06)

¹¹⁰ Fischer A. (2005) mündliche Aussage (Treffen mit Minister Cords am 30.08.05 im FB 11)

5. Potentialanalyse zur Vergärung von Presssaft aus Bioabfällen

Die Datenerhebung in diesem Kapitel dient dem Modellkonzept als Planungsgrundlage für den Hochleistungsreaktor (Betrieb A), in dem die Flüssigphase der Biotonne vergoren werden soll. Um dem Leser den Versuchsablauf nachvollziehbar darzulegen, wird die Probenahme an der Separationsanlage, der Aufbau sowie die Ergebnisse des Gärversuches erklärt.

5.1 Probennahme

Im Rahmen der täglichen Anlieferung von Bioabfällen aus der Region Fürth bei Nürnberg wurden am 4. Mai 2006 auf dem landwirtschaftlichen Betrieb des Herrn Schuh (Langenzenn) drei LKW-Ladungen (ca. 38 t) abgekippt. Gleich darauf wurde das mehrmalige Mischen der Chargen durch ein Aus- und Ineinanderschieben des Abfallhaufens mittels Radlader vorgenommen. Anschließend konnten an unterschiedlichen Stellen des Haufens mit einer Radladerschaufel insgesamt sechs Proben entnommen und gewogen werden. Das Gesamtgewicht der beprobten organischen Biomasse betrug 7030 kg.

Das folgende Bild (Abbildung 5.1) zeigt den vermengten Müllberg und die Probenentnahme.



Abbildung 5.1 Probennahme Bioabfälle (Betrieb Schuh) Quelle: Eigene Darstellung

Die einzelnen Proben kamen zusammen in einen Mischhäcksler (CRAMBO 3400) der Firma Komptech Farwick, wurden zerkleinert und über ein Förderband an einem Sternsieb weitergegeben. Auf dem Weg zum Sternsieb konnten durch einen großen Magnet jegliche metallische Gegenstände aus dem biogenen Abfall entfernt werden. In dem Sternsieb wurden die Grobfractionen über 60 mm aussortiert, und die Feinfraktionen (< 60 mm) dem Separator zugeführt. Die Abbildung 5.2 macht den Verfahrensablauf anhand der Bilderreihen deutlich.





Abbildung 5.2 Ablauf Separationsverfahren Biotonne Quelle: Eigene Darstellung

Die erste Bildreihe wurde bereits im letzten Textabschnitt besprochen. In der zweiten Reihe gelangt die Feinfraktion aus dem Sternsieb wieder über ein Förderband in einen Anmaischer (Firma Komptech Farwick), der die Substanz mit geringen Regen- oder Sickerwassermengen leicht durchknetet und direkt dem Separator (Mashseparator) übergibt. Dort kam es zur Fest- / Flüssigtrennung des Bioabfalls (3. Bildreihe). Der Presssaft konnte unterhalb des Gerätes vor dem Zulauf zur Vorgrube der Biogasanlage aufgefangen und durch Beprobung im Minutentakt (60 Proben a 1l Presssaft) nach gründlicher Durchmischung in einer großen Wanne zum Transport in zwei 25 l-Kanister abgefüllt werden. Die restlichen festen Bestandteile (Presskuchen) wurden zur aeroben Umsetzung auf die Kompostmiete gefahren.

5.2 Material und Methoden des Vergärungsversuchs

5.2.1 Material

Das Ausgangsmaterial (7.300 kg FM) des Presssaftes stammte ausschließlich aus der angelieferten Bioabfallcharge vom 4. Mai 2006. Hieraus wurden nach Durchlaufen der Separationsanlage folgende Frischmassemengen aus drei Fraktionen selektiert. Der relative grobe Siebüberlauf (> 60 mm) entsprach mit nur 280 kg dem geringsten Anteil an der gesamten biogenen Biomasse. Hingegen machte der Presskuchen (< 60 mm) mit gewogenen 5.800 kg demnach den größten Anteil aus, und das Gewicht des Presswassers konnte auf 950 kg bestimmt werden. Alle drei Fraktionen wurden sorgfältig beprobt und bis zur späteren Analyse nach Weender tiefgekühlt.

Nachdem die Analyseergebnisse vorlagen, fiel das Hauptaugenmerk auf die Inhaltsstoffe im Presssaft, denn wie in dem Diagramm 5.3 nachvollziehbar dargestellt ist, sind die für die Fermentation interessanten Parameter (Rohfett, Rohfaser, Rohprotein und Zucker) anteilig

gesehen verstärkt in der flüssigen Phase wiederzufinden. Besonders die Anteile des Rohfettes (35 % der Gesamtmenge) hatten sich in die Fraktion Presssaft verlagert.

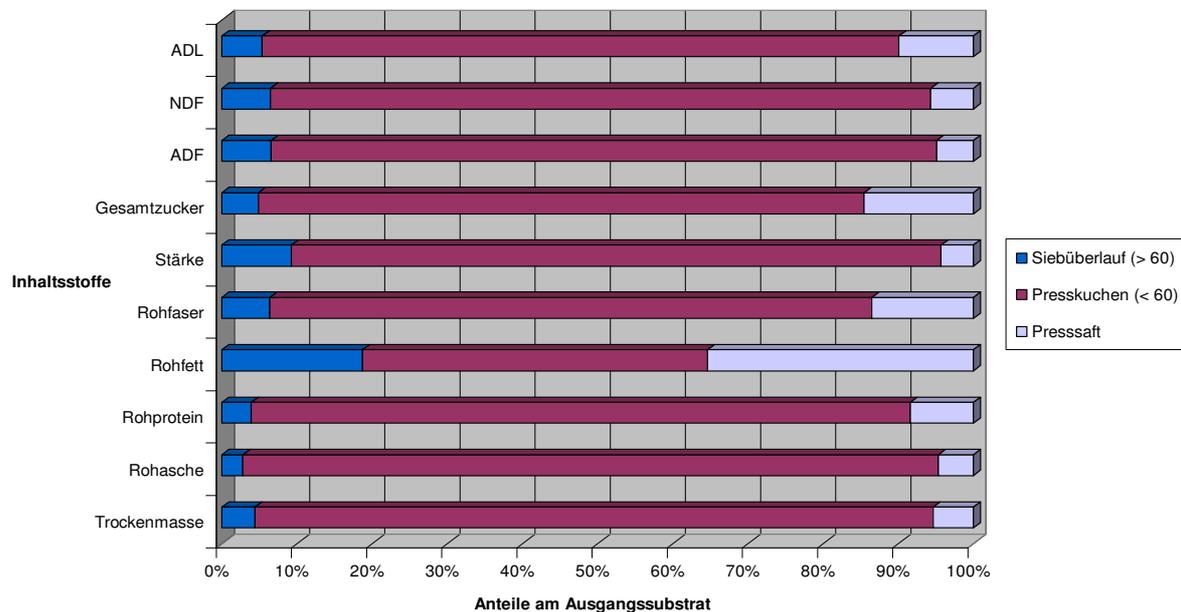


Abbildung 5.3 Verteilung der Inhaltsstoffe des Ausgangssubstrates auf die Fraktionen

Quelle: Eigene Darstellung

Insofern wurde den 49,84 g Rohfett / kg TM im Presssaft bezüglich der Sinnhaftigkeit des Separationsverfahrens die größte Relevanz zugesprochen, denn durch Optimierung des quantitativen Anteils an leicht vergärbaren Substanzen in dem Presssaftsubstrat kann von besseren Methanausbeuten während des Fermentationprozesses ausgegangen werden. Außerdem erhöhten das Rohprotein (137,39 g / kg TM) und der Zuckeranteil von 51,67 g / kg TM zusätzlich das Potential für schnell abbaubare Bestandteile in der Flüssigphase.

Die Rohfaser des Presssaftes hatte dennoch den größten Anteil von 481,73 g / kg TM. Hingegen war der Stärkeanteil in der flüssigen Phase mit 15,67 g / kg TM eher gering. Einige Störstoffanteile wie Lignine und andere zelluläre Gerüststoffe waren im Vergleich zum Ausgangssubstrat in geringerem Umfang vorhanden. Entscheidend für die Vergärung des Presssaftes waren in erster Linie der TM-Gehalt von 16,38 % und der CSB (138,88 g / l_N).

5.2.2 Methoden des Gärversuchs

Der Batch-Versuch zur Biogasertragermittlung aus dem Biotonnenpresssaft wurde im Rahmen einer Diplomarbeit am Standort Schloß Eichhof des Landesbetriebs Hessisches Landeslabor (LHL) in Bad Hersfeld im Juni diesen Jahres durchgeführt. Demzufolge sind die Ergebnisse sowie die Vergärungs- und Analyseverfahren Entwicklungseigentum des LHL.

In den folgenden Zeilen soll zunächst die dazu verwendete Gärapparatur, das methodische Vorgehen sowie die abschließende Analytik erläutert werden.

Für die Vergärung des Presssaftsubstrates standen drei luftdicht verschließbare Kunststoffbehälter mit 20 Litern Fassungsvermögen zur Verfügung. Diese Behälter kommen ursprünglich in der Mostherstellung zum Einsatz. Das am Verschlussdeckel befestigte, U-förmige Rührwerk sorgt im Reaktorraum für die nötige Durchmischung. Es wurde gezielt auf die Ansprüche einer geringen Wirbelbildung und mechanischen Belastung ausgelegt. Der Antrieb wird durch ein 12 V- Gleichstromelektromotor gewährleistet, der alle zwei Stunden für 15 Minuten über eine Zeitschaltuhr ein- und ausgeschaltet wird.

Das aus dem Reaktor austretende Gas wird durch einen gasdichten Plastikschlauch durch einen Verschlusshahn in geräumige Gasauffangbeutel aus Aluminium befördert. Die einzelnen Versuchsreaktoren werden konstant auf einem Temperaturniveau von 37 °C im mesophilen Bereich gehalten, wobei geringfügige Schwankungen um ± 1 °C toleriert wurden. Die Versuchsdurchführung begann mit dem Ansetzen der Versuchsreaktoren, indem diese zu gut zwei Dritteln mit Impfsubstrat aus der großen Biogasanlage des Eichhofs entnommenen Fermentergülle befüllt wurden. Damit eine ausreichende Homogenität des Impfsubstrates erreicht werden konnte, wurden Grobbestandteile in der Gülle über ein Korbsieb herausgefiltert. Dadurch, dass zwischen der Impfsubstratentnahme und der Zugabe des Biotonnenpresssaftes nur eine geringe zeitliche Differenz lag, konnte der anaerobe Abbau dank der aktiven Biozönose sofort einsetzen. Mit diesem Ansatz konnte das Verfahren der Substratbeschickung unter nahezu realen Praxisbedingungen gewährleistet werden.

Im Anschluss an den Transport der befüllten Gärbehälter in das Labor wurden die exakten Inhalte bestimmt, und bei zwei Reaktoren die dosierte Presssaftmenge hinzu gegeben (Reaktor A und B). Der dritte Versuchsfermenter diente als so genannte Null-Variante. Ihm wurde kein Probensaft zugesetzt, da hier die freiwerdende Biogasmenge aus dem Impfmateriale ermittelt wurde. Nach sicherem Schließen der Behälterdeckel wurden die Fermenter in das Wasserbad gelassen, der Gasauffangbeutel angesteckt und die elektronische Versorgung der Rührwerke sichergestellt.

Bereits 24 Stunden nach dem Ansetzen des Batch-Versuchs am 9. Mai begann man mit den täglichen Ertragsmessungen. Sobald nach 5-6 Tagen die Biogaserträge mehr und mehr abnahmen, wurden die Gasmengen in längeren Perioden ermittelt und anteilig auf die gemessenen Tage verteilt. Um nun eine Ertragsanalyse des allein aus dem Biotonnenpresssaft entstandenen Biogases zu erstellen, wurden die gemessenen Werte der Null-Variante zusammen addiert und auf den Liter umgerechnet. Anschließend wurden von den erhobenen Gesamtertragsdaten der beiden mit Presssaft geimpften Reaktoren die erzielten Methanmengen der Null-Varianten entsprechend ihrer Eingangsinhalte subtrahiert.

Vor der Versuchsaufnahme wurde die organische Trockensubstanz (oTS) und der pH-Wert (mit der pH-Elektrode der Firma Metrohm) des Ausgangsubstrates (Biotonnenpresssaft) charakterisiert. Um den oTS bestimmen zu können, wurde die Frischprobe eingewogen und im Trockenschrank bei 105 °C über 24 Stunden getrocknet. Nach der Trocknung wurde

zurückgewogen und die Probe erneut auf einem Temperaturniveau von 550 °C im Muffelofen für 2 Stunden verascht und anschließend erneut rückgewogen. Durch die Differenz zwischen der ersten und zweiten Rückwaage, konnte die organische Trockensubstanz wie folgt in einem Prozentwert errechnet und ausgedrückt werden. Für den auf dem Betrieb Schuh beprobten Presssaft ergaben sich ein relativ niedriger ph-Wert mit 4,13 und ein oTS-Gehalt von 9,15 %, der nach der folgenden Formel berechnet wurde.

$$oTS = \frac{e_{nachTrocknung} - e_{nachVerbrennung}}{e_{frisch}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Im Anschluss an die Versuchsreihe fand die gaschromatographische Bestimmung der organischen Säuren und Alkohole statt. Aufgrund des hohen Milchsäurewertes von 27,4 g/l Endsubstrat ist davon auszugehen, dass es sich bei diesem Vergärungsprozess um eine Milchsäuregärung handelte. Die Ethanolbestimmung ergab nur einen Wert von 1,8 g/l Fermentergülle. Die Gaspotentialanalyse wurde über eine Gasmessstrecke durchgeführt, wobei ein Trommelzähler einerseits die Methanmenge bestimmte und andererseits der Methangehalt über einen IR-Spektrometer festgestellt wurde. Die quantitativen Messwerte mussten danach noch auf die Normangaben (0 °C, 1013 mbar) umgerechnet werden. Außerdem wurde zum Schluss die analysierte Gasmenge um das von der Prozesstemperatur sowie vom Partialdruck beeinflusste Wasserdampfvolumen vermindert.

Für die substratangepasste Planung einer Biogasanlage sind die beiden spezifischen Substratparameter wie der Abbaugrad und die Methanausbeute entscheidende Bezugsgrößen. Letztere wurde in Methanvolumen (V_{CH_4}) täglich gemessen und kann dadurch über die maximale Methanbildung des Presssaftes Auskunft geben. Das Volumen soll dafür in A_{CH_4} angegeben werden. Insofern wird die Maßeinheit Liter auf das kg oTS + FOS bezogen.

$$A_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{org.Subst._{zugef.}} \left[\frac{l}{kg(oTS + FOS)} \right]$$

Um die Abbaudynamik des Presssaftsubstrates zu beschreiben, ist es wichtig die Menge an CO_2 und CH_4 gegenüber dem Anteil organischer Substanz ins Verhältnis zu setzen. Der Abbaugrad ist ein Parameter, der beschreibt, in welchem Maße die organische Substanz zur Gasbildung während der anaeroben Fermentation verfügbar ist, wobei bis zu 10 % (7 % im Durchschnitt angenommen) der zugeführten organischen Substanz unmittelbar für die Reproduktion der Bakterienpopulationen verbraucht wird.¹¹¹ Dementsprechend wurde die eingebrachte organische Substanz anschließend mit dem Faktor 0,93 berechnet und der Abbaugrad (η_{Gas}) in Prozent wie folgt errechnet.

$$\eta_{Gas} = \frac{m_{CH_4} + m_{CO_2}}{m_{Subst.} \cdot oTS \cdot 0,93} \cdot 100 \quad [\%]$$

¹¹¹ vgl. Edelmann W. (2001) Tab. in „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“ S.586

5.3 Ergebnisse des Vergärungsversuchs

Die Messergebnisse wurden vom 10.5.06 an über einen Zeitraum von 42 Tagen ermittelt, um sicherzustellen, dass das Substrat komplett ausgegoren war. Von größtem Interesse waren bei der Gasertragsermittlung natürlich der Methangehalt, die gemessene Gasmenge und der Abbaugrad des Co-Substrates. Jeder Parameter wurde jeweils für Reaktor A und Reaktor B getrennt erfasst. Im Anschluss wurde der Mittelwert beider Werte errechnet.

Im Vergleich zu dem Biogasnormwert (55 Vol. % CH_4 / Nm^3) konnte durchschnittlich ein durchaus hoher Methangehalt von 59,89 Vol. % festgestellt werden. Bereits nach 26 Tagen Verweilzeit in den Reaktoren wurden im Mittel 370,86 l_N CH_4/kg oTS erreicht. Weitere 16 Tage später (nach 42 Tagen) konnten insgesamt 381,58 l_N CH_4/kg oTS gemessen werden.

In dem nachfolgenden Diagramm (Abbildung 5.4) sind auf der Y-Koordinate die täglichen und insgesamt kumulierten Gaserträge in Normliter (l_N) für Fermenter A und B ablesbar. Auf der X-Koordinate ist deren Verweildauer abgetragen. Die fast gleich verlaufenden Graphen der kumulierten Gesamtgasmenge sprechen für ein recht homogenes Ausgangssubstrat und eine gelungene Versuchsanstellung.

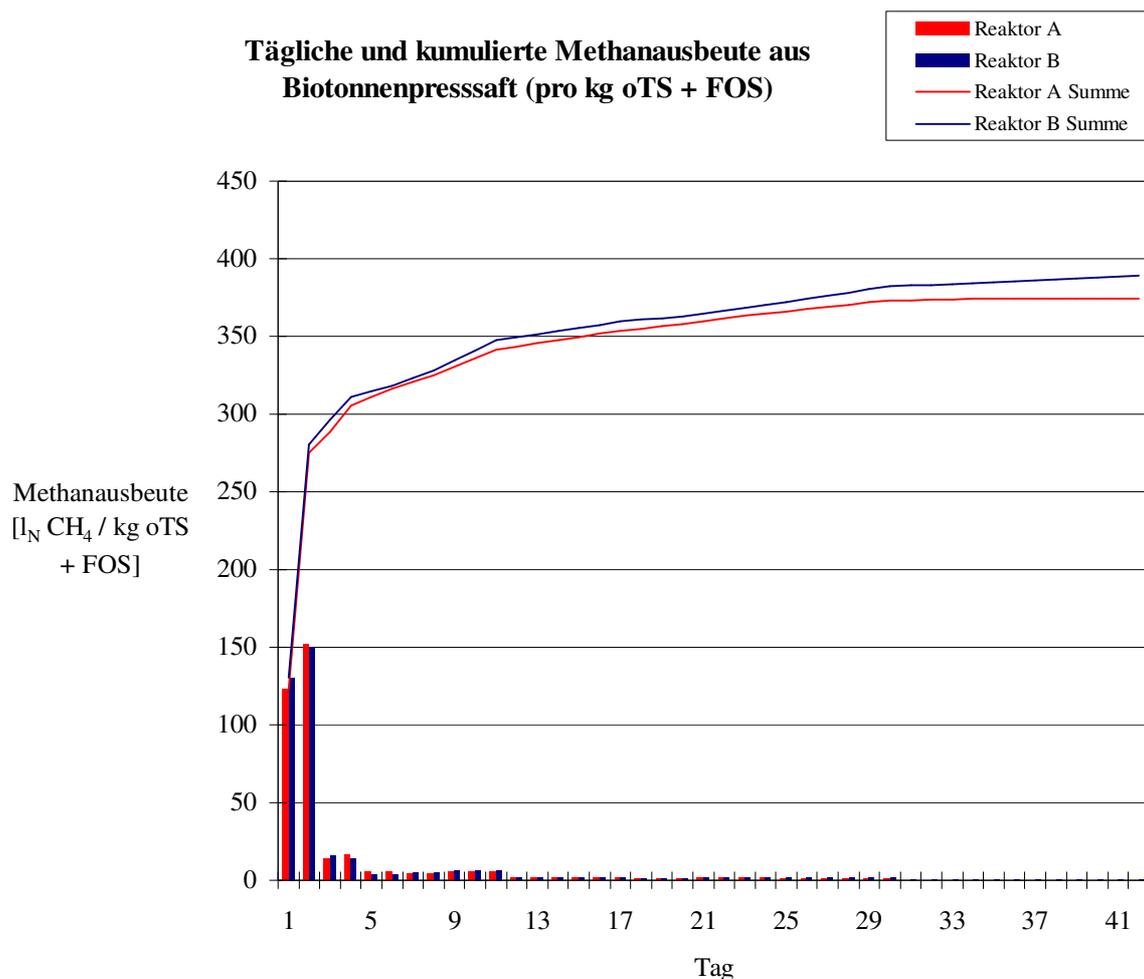


Abbildung 5.4 Methanausbeute Biotonnenpresssaft Quelle: LHL 2006¹¹²

¹¹² LHL (2006) erhalten in Exel-Dateiformat am 22.06.06

In der Graphik ist ebenfalls gut zu sehen, dass schon früh der Großteil der Gesamtgasmenge frei gesetzt wurde. Da bereits nach Ablauf von 10 Tagen 338,53 l_N CH₄/kg oTS aus dem Co-Substrat entweichen konnten, ist von einem äußerst hohen Abbaugrad des Presssaftes auszugehen. Die endgültigen Berechnungen untermauerten diese Annahme durch einen viel versprechenden Abbaugrad des Biotonnenpresssaftes von 91,12 %. Aufgrund dieser sehr schnellen Abbaurate ist das Presssaftsubstrat für den Einsatz in zweistufigen Hochleistungsreaktoren (USAB-Reaktoren) bei einer Verweilzeit von 6 - 10 Tagen gut geeignet.¹¹³

Da in dem durchgeführten Batch-Versuch die Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen gegenüber der Null-Variante sofort stark erhöht wurde, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Presssaft durchaus positiv auf die Reproduktion der Bakterienstämme auswirkt. Insofern ist für die Monovergärung unter kontinuierlicher Presssaftzufuhr genügend biologische Prozessstabilität vorhanden, sowie die für eine zweistufige Prozessführung notwendige Pufferung der leicht zu fermentierenden Abfallstoffe, die schnell Versäuerungsprodukte anreichern können, gewährleistet.

Vergleicht man den hier verifizierten Methanertrag von 380 l_N CH₄/kg oTS aus Biotonnen-Presssaft mit den Methanertragsdaten von nicht separierten Bioabfällen aus aktueller Fachliteratur, die sich zwischen 200 und 600 l_N CH₄/kg oTS bewegen, lässt sich erkennen, dass dieser Wert ungefähr im Mittelfeld der ausgewiesenen Ertragsspanne liegt.¹¹⁴

Im nachfolgenden Abschnitt werden für die Vorplanung der Biogasanlage die zu erwartenden Kenndaten des Presssaftes anhand der Biomasse auf das Jahr hochgerechnet.

Insgesamt kann aus der maximal verfügbaren Bioabfallmenge von 13.500 Mg/a eine Presssaftmenge von 2.300 Mg/a separiert werden. Das entspricht einem Massenanteil von ca. 17 % des Abfalls aus der Biotonne. Auf Basis des bestimmten CSB von 138,88 kg/m³ kann demnach für die Auslegung des Fermentervolumens mit einem CSB von 31.9424 kg/a (= 875 kg/d) gerechnet werden. Aus den 380 l_N CH₄/kg oTS und den analysierten 9,15 % oTS (91,5 kg/Mg FM) des Presssaftes ergibt sich ein Methanertrag von 34,77 Nm³/Mg FM. Wird dieser Wert mit den 2.300 Mg/a Presssaft multipliziert, errechnen sich 79.971 Nm³ CH₄/a. Diese Normkubikmeter Methan pro Jahr entsprechen wiederum einem Volumen von 133.285 Nm³/a Biogas mit 55 % CH₄-Gehalt.

¹¹³ vgl. Loll U. (2002) in „ATV-Handbuch Mechan. und biol. Verfahren der Abwasserbehandlung“ S.250

¹¹⁴ vgl. Dichtl N. (2005) in „Anaerobtechnik“ S.253

6. Energiepflanzenanbau

6.1 Allgemeine Ausgangslage

Unbeeindruckt von der Tatsache, dass in der Zukunft einige Hektar freiwerdende landwirtschaftliche Nutzflächen aus der Lebensmittel- oder Futtermittelproduktion für den Energiepflanzenanbau genutzt werden können, entscheiden die meisten Landwirte vorwiegend in ihrer Kultur- und Sortenwahl nach den üblichen Kriterien der Ökonomie. Indem sie stets die Pflanzen verstärkt anbauen, die unter den gegebenen Marktoptionen den höchsten zu erwartenden Deckungsbeitrag abwerfen. Sollte demnach in der Zukunft der Gewinn pro ha Ackerland bei einer Kulturpflanze, die zur energetischen Nutzung dient, über der schwankenden Gewinnspanne der Marktfrüchte liegen, wäre die Fläche für den Energiepflanzenanbau reserviert.¹¹⁵

Auch die Landwirte im Werra-Meißner-Kreis sehen für sich und ihre Nachfolger in der Biomasseproduktion viele Vorteile, denn die gesicherte Abnahme des Erntegutes über 20 Jahre hinweg würde ihnen Planungssicherheit und zugleich ein gesichertes Einkommen bieten. Nach Aussage des Kreisbauernverbandes Werra-Meißner e.V. liegt die unterste Grenze der örtlichen Bereitstellungskosten für das Siliergut aus Gras, Mais und Grünroggen frei Biogasanlage inklusive der Gülleausbringung bei 25 € / Mg Frischmasse (FM).¹¹⁶ Da dieser Ansatz für die Bereitstellung der Biomasse inklusive der Gärrestausbringung in Verbindung mit diesem Modellkonzept bei den Landwirten ebenfalls Akzeptanz fand, soll dieser Wert als Grundlage in die Betriebskostenkalkulation der NawaRo-Anlage (Unternehmen B) einfließen.

Ob für den Energiepflanzenanbau ein Einrotieren in die bestehende Fruchtfolge möglich oder die Umstellung auf eine Energiefruchtfolge notwendig ist, hängt von den bisher angebauten Kulturen, den verfügbaren Flächen des Betriebes, deren Lagen und Fruchtbarkeit sowie der angestrebten Energieproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen ab. Zudem spielt bei der Biogaserzeugung das enorme Transportaufkommen an Biomasse und vergorener Fermentergülle die entscheidende Rolle bei der Auswahl der Anbauflächen. Deshalb sollten die Flächen in direkter Umgebung der Anlage (3 km-Radius) liegen, um eine kostengünstige Bereitstellung der Biomasse realisieren zu können.

Gleichwohl könnten in einer Erzeugergemeinschaft für Energiepflanzen durch die Synergieeffekte bei der Ernte, der Gärrestausbringung und Bestellung der Äcker die variablen Maschinen- und Arbeiterledigungskosten des einzelnen Landwirts gesenkt werden.

Bisher deuteten neun heimische Landwirte die Bereitschaft an, unter vereinbarten Rahmenbedingungen insgesamt ca. 200 ha landwirtschaftliche Nutzfläche für den Anbau nachwachsender Rohstoffe zur Verfügung zu stellen, wobei ca. ¼ der Fläche als Dauergrünland und ca. ¾ als fruchtbares Ackerland genutzt werden.

¹¹⁵ vgl. Karpenstein - Machan M. (2005) in „Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber“ S.53

¹¹⁶ vgl. IGW (2004) in „Entwurfsplanung Biogasanlage auf dem Gelände der Deponie am Breitenberg“ S. 22

Vorerst werden überwiegend konventionell bewirtschaftete Ackerbaubetriebe die Energiepflanzen für die Anlage liefern. Inwiefern einige Landwirte dabei das Zwei-Kultur-Nutzungssystem nach Prof. Scheffer als neue Option des Pflanzenbaus erkennen, bleibt abzuwarten. Doch immer öfter wird die neue Energiepflanzenfruchtfolge mit zwei Kulturen pro Vegetationsperiode etabliert. Sie ermöglicht eine ganzjährige Bodenbedeckung, die wiederum eine effiziente Stickstoffausnutzung, Erosionsschutz und dadurch auch einen geringeren Gebrauch an Mineraldüngern und Pflanzenschutzmitteln erlaubt.¹¹⁷

Besonders in feucht gemäßigten Klimaregionen stellt die Kombination von winterannuellen C3-Pflanzen und sommerannuellen C3- bzw. C4-Pflanzen eine optimale Ausnutzung der Vegetationszeit dar. Durch die frühzeitige Ernte der Energiepflanzen in der Teigreife kann ein Zeitgewinn von 4 - 6 Wochen in der Hauptwachstumsphase des Jahres gegenüber Marktfrüchten, die erst zur Vollreife geerntet werden können, den Anbau einer Zweitkultur ermöglichen, wenngleich in Mittelsgebirgslagen nicht die Wasserspeicherkapazität des Bodens sondern eher die Temperatur den begrenzenden Faktor für die Trockenmasseproduktion darstellt.¹¹⁸

Allerdings gilt es in diesem Anbausystem besonders unter den Bedingungen für die Ernte der Zweitkulturen im Frühherbst darauf zu achten, dass durch schweres Ernte- (Häcksler) und Transportgerät keine starken Strukturschäden im Boden hinterlassen werden.¹¹⁹

Gleichwohl besteht die Chance im Energiepflanzen Sektor durch Mischfruchtanbau die Artenvielfalt zu erhöhen und zugleich eine größere Toleranz gegenüber Pflanzenschädlingen und Wildpflanzen zu zeigen. Insofern könnte auf diesem Wege eine Ökologisierung der konventionellen Landwirtschaft in kleinen Schritten vorangebracht werden.

6.2 Aktuelle Anbaupraxis

Für die Etablierung einjähriger Hauptkulturen im Sommerhalbjahr kamen bisher unterschiedliche Kulturpflanzen wie Sonnenblume, Futterrübe, Mais, Sudan- und Weidelgras, Zuckerhirse sowie alle weiteren Sommergetreidearten in Frage. Die Vorzüglichkeit der Kulturen Weidelgras, Futterrübe und Mais ist wegen ihrer spezifisch hohen Biomasseerträge je ha und auch wegen der sehr guten Methanausbeuten besonders hoch. Silomais erreicht hinter den beiden Hackfrüchten Futterrübe und Kartoffel den drittbesten Methanertrag von 410 m³/t oTS.¹²⁰

Da neben der erzielten Erntemenge auch der oTS-Gehalt des Energiepflanzenmaterials entscheidender Parameter für die Produktivität der Biomasseerzeugung ist, und die C4-Pflanze Mais mittlerweile perfekt an unsere kühlen Klimabedingungen adaptiert ist, können

¹¹⁷ vgl. Graß R. (2003) in „Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber“ S.101-105

¹¹⁸ vgl. Karpenstein-Machan M. (1997) in „Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber“ S.75-77

¹¹⁹ vgl. Jäger P. (2005) in FNR „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ S.167

¹²⁰ vgl. Weiland P. (2005) in „Anaerobtechnik“ S.537

gerade die späten Sorten hohe Trockenmasse- und Bruttoerträge pro ha leisten.¹²¹ Sogar die vergleichsweise enorm hohen Anbaukosten kann die erosionsanfällige Energiepflanze über die gute Biogasausbeute pro ha kompensieren. Die nachfolgende Tabelle (6.1) veranschaulicht diese Tatsache im Vergleich zu einigen anderen Energiekulturen anhand derer Produktionsparameter. Außerdem beinhaltet sie wichtige Kennwerte der Biomasse- und Biogaserträge, die als Grundlage für die ökonomische Betriebsanalyse der NawaRo-Anlage (Kapitel 7.2) dienen.

Tabelle 6.1: Kalkulation der Produktionskosten verschiedener Energiepflanzen

Position	Einheit	Grassilage 3 Schnitte	Grünroggen (1 Schnitt vor SM-Anbau)	Kleegras- silage (Ackerfutter)	Ganzpflanzen- silage (W-Weizen)	Silomais- anbau
Bruttoertrag	dt FM/ha	260	230	350	250	500
TM-Gehalt	TM (%)	35	25	35	40	33
	dt TM/ha	91	58	123	100	165
organ. TM-Gehalt	oTM (%)	89	90	88	93	96
	dt oTM/ha	81	52	108	93	158
Ernte- und Silierverluste	in %	13	10	10	8	8
Biomasse-Ertrag netto	dt TM/ha	79	52	110	92	152
	dt oTM/ha	70	47	97	86	146
	dt Silage/ha	226	207	315	230	460
Biogas-Ertrag	m ³ /kg oTM	0,58	0,58	0,56	0,58	0,59
	m ³ /ha	4.060	2.726	5.432	4.988	8.614
	m ³ /dt Silage	18,0	13,2	17,2	21,7	18,7
Energie-Ertrag	kWh/m ³	5,40	5,40	5,50	5,30	5,20
	kWh/ha	21.924	14.720	29.876	26.436	44.793
	el. Wirkgr.(%)	35	35	35	35	35
	kWh _{el} /ha	7.673	5.152	10.457	9.253	15.678
Saatgutkosten	€/ha	40	42	120	81	161
Düngerkosten	€/ha	219	114	241	225	259
Pflanzenschutzmittel	€/ha	0	0	0	111	55
Maschinenkosten/LU	€/ha	610	502	841	483	652
Kosten Silofolie	€/ha	7	4	9	7	9
Arbeitsaufwand	Akh/ha	6,7	3,4	7,2	5,0	6,4
Stundenlohn	€/Akh	15	15	15	15	15
Arbeitskosten	€/ha	101	51	108	74	96
Pachtansatz Fläche	€/ha	50	0	0	0	0
Nutzg.kosten Alternativfrucht	€/ha	0	0	50	50	50
Energiepflanzenprämie	€/ha	0	0	45	45	45
Summe Erzeugungs- kosten (frei BGA)	€/ha	1.027	713	1.324	986	1.237
	€/ dt TM	12,99	13,71	12,04	10,72	8,14
	€/ dt Silage	4,54	3,44	4,20	4,29	2,69
	€/ m ³ Biogas	0,25	0,26	0,24	0,20	0,14
	€/ kWh _{el}	0,13	0,14	0,13	0,11	0,08

Quelle: Wagner K. (2005)¹²²

In der Regel verspricht der großflächige Anbau von Maismonokulturen momentan den größten wirtschaftlichen Profit. Jedoch kann eine intensive Energiefruchtfolge mit über 60 % Getreide die Bodengesundheit und den Biomasseertrag innerhalb weniger Jahre stark verringern.¹²³

¹²¹ vgl. Gaudchau et al. 2004, in „Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber“ S.96

¹²² vgl. Wagner K. (2005) in LLH „Wie rechnen sich Biogasanlagen wirklich?“ S.4

¹²³ Gomez C. (2006) mündliche Aussage (Gespräch vom 26.04.06)

Trotzdem präferieren nach wie vor viele Landwirte die bekannte Futterpflanze aufgrund ihrer einfachen Produktionsweise sowie der guten Silierfähigkeit für den Energiepflanzenanbau. Doch mit der Zeit könnten auch andere heimische Kulturen (Roggen, Futterrübe, Kartoffel, etc.) aber auch einige exotische Pflanzen wie das Sudangras, die Hirse oder der Topinambur mit Hilfe der Pflanzenzucht und -forschung sowie der Fortschritte in der Anbautechnik und Fruchtfolgegestaltung durchaus vergleichbare Potentiale erreichen.

Als nicht unwesentlich ist das Risiko für Natur und Landschaft durch großflächigen Biomasseanbau einzustufen. Die Folgen von Zuckerrüben- und Maisanbau fallen hier besonders negativ aus. Moderat wird die breite Etablierung der Ölfrüchte Sonnenblume und Raps eingeschätzt. Halbwegs günstig konnten Triticale und Weizen abschneiden.¹²⁴

Deutlich besser gestaltet sich die Nachhaltigkeit bei regem Fruchtwechsel, so dass eine vielfältige Auswahl bei der Kombination von Winter- und Sommerkulturen gegeben ist. Als viel versprechende Winterzwischenfrüchte werden Futterroggen, Winterraps, Winterrüben oder Gemenge aus winterharten Getreidesorten und Leguminosen angebaut. Die Wintererbse kann eine interessante Winterung im Fruchtfolgesystem darstellen, weil sie im Rahmen der Zwei-Kultur-Nutzung bereits ab März bis Mitte Juni über 200 kg N/ha fixiert und dadurch auch im Energiepflanzenanbau die Effizienz durch Ressourceneinsparungen im Betriebsmitteleinsatz deutlich verbessert werden kann.¹²⁵

¹²⁴ vgl. IFEU/IUS (2004) in „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ S.62

¹²⁵ vgl. Stülpnagel R. (2000) in „Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber“ S.105

7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Konzeptes

Wirtschaftliches Handeln wird weltweit durch das Streben nach dem Rationalprinzip beschrieben. Danach soll ein abgestecktes Produktionsziel unter minimalem Ressourceneinsatz erreicht werden (Minimalprinzip), oder eben mit den verfügbaren Produktionsmitteln ein größtmöglicher Nutzen (Ertrag) entstehen (Maximalprinzip)¹²⁶. Getätigte Investitionen sollten sich möglichst schnell amortisieren, damit das verfügbare Eigenkapital wieder für neue betriebliche Anschaffungen investiert werden kann. Vor diesem Hintergrund wurden in diesem Kapitel die Vorkalkulationen der Unternehmen im Rahmen des Modellkonzeptes getrennt von einander erstellt und auf ihre jährlichen Kosten und Leistungen hin betrachtet.

7.1 Unternehmen A (Bioabfallvergärung)

Als Berechnungsgrundlage für das Betriebsmodell der Biotonnenpresssaft-Vergärungsanlage werden die Biogasertragsdaten aus dem Kapitel 5 („Potentialanalyse“) herangezogen. Da dieses Unternehmen fest in die Betriebsstruktur des Kompostwerkes (als neuer Betriebszweig) integriert werden würde, wird eine kostenlose Substratversorgung der Anlage durch 13.500 Mg/a organische Bioabfälle aus dem Werra-Meißner-Kreis als frei verfügbar angenommen. Nach vollzogener Konversion der Biomasse (Separation) verbliebe eine Endsubstratmenge von 2.278 Mg/a Presssaft. Zusätzlich zu dem Presssaft sollen 730 m³ Sicker- und Oberflächenwasser des Geländes mit vergoren werden, so dass pro Jahr eine Gesamtfracht von 3008 Mg/a für den USAB-Reaktor zur Verfügung stehen würde. Die für die Planung wichtigen Kennzahlen konnten mittels der untenstehenden Formeln ermittelt und in den folgenden Zeilen beschrieben werden.

$$\text{Faulraumbelastung [kg oTS} \cdot \text{d}^{-1} / \text{m}^3] = \frac{\text{tägl. org. Trockensubstanz [kg oTS} \cdot \text{d}^{-1}]}{\text{nutzb. Gärbehältervolumen [m}^3\text{]}}$$

$$\text{Verweilzeit [d]} = \frac{\text{nutzbares Gärbehältervol. [m}^3\text{]}}{\text{tägl. zugeführte Substratmenge [m}^3 \cdot \text{d}^{-1}\text{]}}$$

Quelle: Gruber W. (2004)¹²⁷

Aufgrund der bevorzugten Naßvergärung der flüssigen Substratfracht kann eine deutlich geringere Raumbelastung von 4 kg oTS/m³d gegenüber einer Trockenvergärung mit 9 kg oTS/m³d angenommen werden.¹²⁸ Demnach wird das Volumen des Hochleistungsreaktors unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages von 15 % mit ca. 30 m³ äußerst klein ausfallen. Gleichzeitig kann bei einer Substratmenge von 8,2 m³ pro Tag durch den hohen Abbaugrad des Substrates (91 %) eine relativ niedrige hydraulische Verweilzeit von 3 Tagen gewählt werden. Ein Vorlagebehälter mit 20 m³ Fassungsvermögen gleicht die Substrat-

¹²⁶ vgl. Schierenbeck H. (2003) in „Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre“ S.3

¹²⁷ vgl. Gruber W. (2004) in „Die Landwirtschaft als Energieerzeuger“ S.63

¹²⁸ vgl. Fricke K. (2005) in „Anaerobtechnik“ S.642

schwankungen durch Vermischen der Presssäfte etwas aus. Entsprechend der verfügbaren Biogasmenge (365 Nm³/d) steht bei einem Energiegehalt von 6,1 kWh/Nm³ ¹²⁹ eine Primärenergie von 93 KW zur Verfügung, so dass der Betrieb eines Zündstrahl-BHKWs mit einem η_{el} von 27,8 %¹³⁰ und einer Leistung von 37 KW_{el} ausreicht, um das Gas bei einer täglichen Laufzeit von 21,9 h (8.000 h / a) zu verstromen. Als Zündölersatz kommt aufgrund der Gefahr des Vergütungsverlustes nach EEG ausschließlich Biodiesel in Betracht.

7.1.1 Investitionskosten

Für die in Unternehmen A nötigen Investitionen muss teilweise ein Schätzwert angenommen werden. Beispielsweise betrifft dies den USAB-Reaktor, dessen Verkaufspreis von mehreren Herstellern aufgrund der ungewöhnlichen Größe nicht kalkuliert werden konnte. Für die gesamte Zündstrahlaggregatechnik sind 980 € je KW_{el} angesetzt.¹³⁰ Zur Verwertung von 13.500 Mg/a Bioabfällen wird eine Verdoppelung der Rottefläche eingeplant. Dazu müssen ca. 2.250 m² des Nachbargrundstücks zugekauft und ggf. versiegelt werden. Da dadurch vorwiegend mit einer höheren Verarbeitungskapazität des Kompostwerkes zu rechnen ist, muss das bestehende Werk 50 % der Kosten für die Abpress- und Aufbereitungsanlage (775.000 € netto)¹³¹ und die Flächenerweiterung am Burgberg (52.000 €) tragen. Folglich kann für die Separationstechnik (3.) eine Summe von 387.500 € veranschlagt werden, die mit Abstand den kostenintensivsten Posten in der Berechnungstabelle 7.1 darstellt. Insgesamt ergibt sich eine Investitionssumme von 508.760 €, so dass gemessen an dem geringen Reaktorvolumen ein sehr hoher Betrag von 16.958 € je m³ aufzuwenden ist. Ein vergleichbares Bild entsteht, sobald man die Investitionen auf die installierte Leistung bezieht (13.750 €/KW_{el}). Normalerweise sollte der Wert im Bereich zwischen 2.000 - 5.000 € / KW_{el} liegen.

Tabelle 7.1: Berechnung der Höhe von Eigen- und Fremdkapital A

Berechnung der Investitionskosten (netto)

1. USAB-Reaktor (30 m ³ , mesophil, Naßvergärung)	32.000 €
Gasspeicher und -strecke	7.000 €
Gasreinigung	1.500 €
Messtechnik	2.500 €
Pumpentechnik / Hygienisierung	8.000 €
2. BHKW (37 KW)	28.260 €
Zündölspeicher (Biodieseltank)	2.000 €
Steuerung, Anschluss Strom / Wärme	6.000 €
3. Separator, Sternsieb, Mischer, Vorlagebehälter 20 m ³ (50 % v. Inv.)	387.500 €
4. Zukauf und Versiegelung Nachbargrundstück Burgberg	26.000 €
5. Abwicklungs- und Planungskosten	8.000 € = 508.760 € *

¹²⁹ vgl. Hüttner A. (2006) IGW in Schreiben vom 4.04.06 (siehe Anhang S.86)

¹³⁰ Van Qistorp (2006) Firma Henkelhausen mündliche Aussage (Telefonat vom 25.08.06)

¹³¹ vgl. Mayer M. (2006) Angebot Komptech vom 4.07.06, (siehe Anhang S.94)

Eigen- und Fremdkapitalanteil in der Vorkalkulation

Gesamtbetrag der Investition			508.760 € *
Eigenkapitalanteil der Investition	bei 15 %	=	<u>76.314 €</u>
Fremdkapitalanteil der Investition	bei 85 %	=	<u>432.446 €</u>

Quelle: Eigene Darstellung

Die Rückbaukosten der Anlage in Höhe von 6.000 € sind am Ende der Produktionszeit zu bezahlen. Deshalb wird in dem ersten Posten des folgenden Unterkapitels eine Aufzinsung verteilt auf den Produktionszeitraum vorgenommen. Ähnlich wird mit dem Förderanteil des Landes Hessen von 30 % der Gesamtinvestition (ab 75.000 € gedeckelt)¹³² umgegangen. Hier kann allerdings eine negative Annuität in den Kosten Berücksichtigung finden, da die Fördersumme fest angelegt und dadurch ein bestimmter Festbetrag in jedem Betriebsjahr gut geschrieben wird. Demnach werden beide Ansätze nicht in den Investitionen berücksichtigt. Für das Vorhaben sind von Seiten der Investoren somit 76.314 € Startkapital bereitzustellen.

7.1.2 Kalkulatorische jährliche Kosten

Der betriebliche Kostenaufwand setzt sich in diesem Fall aus vier verschiedenen Posten zusammen. Der erste beinhaltet die jährlich anfallenden Kosten für die Abschreibung der getätigten Anschaffungen und beansprucht zugleich den Großteil der Betriebskosten. Grund sind die hohen Kapitalkosten für die Separationsanlage, die mit mehr als $\frac{3}{4}$ der Abschreibungskosten zu Buche schlagen. Die spezifische Abschreibedauer der Investitionen sind gemäß den Afa-Tabellen des BMF und des VDI gewählt, um eine lineare Annuität bei einem Kalkulationszinssatz von 3,5 % in den Betriebsaufwand einfließen zu lassen.

Der zweite Posten stellt die produktionsgebundenen Verbrauchskosten dar. Neben den Kosten für den Biodiesel (netto 0,98 ct / l), die der Deckung des Jahresdurchschnittsverbrauchs von 9135 l dienen und damit energetisch einem Anteil von 10 % der im BHKW produzierten Gesamtenergie entsprechen, werden bewusst keine weiteren Kosten für den Verbrauch von externer Energie angesetzt. Aufgrund der externen Stromkosten von über 13 ct / kWh soll mittels selbst erzeugtem Ökostrom (248.627 kWh/a) zu 10,82 ct / kWh der hohe Eigenstrombedarf gedeckt werden. Der Stromverbrauch der Anlage von 188.000 kWh_{el} pro Jahr ist überwiegend auf die leistungsstarke Separationsanlage (Ø Verbrauch 100 KW pro Betriebsstunde)¹³³ zurückzuführen. Darüber hinaus sind Arbeitserledigungskosten zur Fütterung und Wartung der Biogasanlage zu berücksichtigen. Für den Arbeitsaufwand von 2,5 AKh pro Tag werden 15 € / AKh berechnet. Anfallende Kosten für die Nutzung eines Radladers werden aufgrund der bereits vorhandenen Technik und der geringfügigen Mehrbelastung der Maschine komplett von dem Kompostwerk übernommen.

¹³² Hoffmann B. (2006) HMULV Gespräch (Telefonat vom 27.7.06)

¹³³ Geier (2006) Komptech Anfrage (Telefonat vom 23.7.06)

Bei der Gärrestverwertung kann insgesamt ein relativ niedriger Kostenansatz von 2 € je m³ Gülle für die Ausbringung berücksichtigt werden, da davon ausgegangen wird, dass für die Lagerung der geringen Substratmengen das Gärrestlager der NawaRo-Anlage kostenlos mitgenutzt werden kann, solange kein Düngewert geltend gemacht wird. Gleichzeitig ist durch die Verdünnung in der NawaRo-Gülle (5:1) eine unbedenkliche Entsorgung der Presssaftgülle realisierbar.

In dem dritten Posten werden die technisch und baulich bedingten Reparatur- und Wartungskosten durch eine prozentuale Orientierung am jeweiligen Anschaffungswert bzw. anhand der Betriebsleistung der Produktions- und Aufbereitungstechnik errechnet. Auch hier sind die Instandhaltungs- und Reparaturkosten, die in Verbindung mit der Separationstechnik stehen, auffällig hoch.

Im letzten Posten werden jährliche Festkosten für Versicherung, Buchführung und Substratanalysen pauschal veranschlagt und einmalige Kosten für besondere Eigenleistungen bei 3,5 % Verzinsung über den Produktionszeitraum der Vergärungsanlage verteilt. Um insgesamt eine gesunde wirtschaftliche Basis im Unternehmen zu erreichen, sollten zumindest die jährlichen Betriebskosten, die unten in der Aufstellung 7.2 ausgewiesen sind, durch die Erträge aus der Bioenergieproduktion gedeckt werden.

Tabelle 7.2: Betriebskostenaufstellung Unternehmen A

Aufstellung Betriebskosten (Bezug auf Netto-Investitionen)

Jährliche Kosten (bei 3,5 % Kalkulationszinssatz)

Afa Fermenter	20 Jahre	2.252 €	
Afa Gasspeicher und Gasstrecke	20 Jahre	493 €	
Afa Gelände	20 Jahre	1.829 €	
Afa Abwicklungs- und Planungskosten	20 Jahre	563 €	
Afa Separationstechnik	15 Jahre	33.645 €	
Afa Pump- und Hygienisierungstechnik	12 Jahre	828 €	
Afa für Gasreinigung	12 Jahre	155 €	
Afa bauliche Einrichtungen (Biodieseltank)	10 Jahre	240 €	
Afa für Elektrik	8 Jahre	873 €	
Afa für Messtechnik	7 Jahre	409 €	
Afa für BHKW (37 KW)	6 Jahre	5304 €	
Förderung (Zuschuss)	20 Jahre	-5.277 €	
Rückbaukosten	20 Jahre	212 €	= 41.525 €

(nach VDI 2067 und Afa-Tabelle des BMF (2000), siehe Literaturverz.)

Jährliche Verbrauchskosten

Biodieserverbrauch (98 ct / l)	Anteil 10 %	8.953 €	
Personalkosten (15 € / AKh)	2,5 Akh / d	13.688 €	
Gärrestausbringung	2 € / m ³	6.016 €	= 28.656 €

Jährliche Wartungs- und Reparaturkosten

Wartung BHKW	1,8 ct / kWh	4.475 €	
Wartung für Pump- und Einbringtechnik	5 % v. Anschw.	400 €	
Reparatur und Wartung der Messtechnik / Gasreinigung	4 % v. Anschw.	160 €	
Reparatur und Wartung der Separationstechnik	3 % v. Anschw.	11.625 €	
Reparatur und Wartung des Strom- und Wärmesystems	2 % v. Anschw.	120 €	
Wartung an baulichen Einrichtungen	1 % v. Anschw.	410 €	= 17.190 €

(nach VDI 2067 und AfA-Tabelle des BMF (2000), siehe Literaturverz.)

Sonstige jährliche Kosten

Kosten für Versicherung	€ / a	1.780 €	
Kosten für Eigenleistung in der Bauphase (15 € / AKh)	120 AKh auf 20 a	127 €	
Kosten für Laboruntersuchungen	€ / a	2.150 €	
Buchführung / Büro etc.	€ / a	1.500 €	= 5.557 €

Betriebskosten insgesamt = 92.928 €

Quelle: Eigene Darstellung

7.1.3 Gewinnabschätzungen

Ab Inbetriebnahme der Anlage in 2008 kann inklusive der Energie aus dem Biodiesel über den garantierten Vergütungszeitraum von 20 Jahren eine jährliche Energieleistung des Reaktors von 813.039 kWh angenommen werden. Nach Abzügen für Trafo- (0,5 %) und Leitungsverlusten (1,5 %) bleibt bei einem η_{el} von 27,8 % eine Netto-Stromproduktion von 243.654 kWh_{el} / a übrig. Durch den hohen Eigenstrombedarf kann die vergütbare Strommenge (55.655 kWh_{el}) auf weniger als ein Viertel der eigentlichen Stromproduktion gesenkt und auf Basis der Bestimmungen im EEG vom örtlichen Netzbetreiber (Stadtwerke Witzenhausen) zu einer Grundvergütung von 10,82 ct / kWh abgenommen werden.

Zusätzlich steht bei einem thermischen Wirkungsgrad des Zündstrahlaggregates von 52,3 % eine Jahreswärmemenge von 467.741 kWh_{therm} pro Jahr zur Verfügung. Abzüglich der Umwandlungs-, Abstrahlungs- und Austragsverluste (8 % der erzeugten Wärme = 37.419 kWh_{therm}) sowie des betriebsinternen Wärmeverbrauchs von Hygienisierung, Hochleistungsreaktor und den Bürogebäuden (274.000 kWh_{therm}) können demnach 156.322 kWh_{therm} / a an die Unternehmen B und C ausgekoppelt werden. Allerdings reicht aller Voraussicht nach diese Wärmemenge nicht zur Versorgung der Unternehmen aus.

Bezogen auf die extern nutzbare Wärme können zum einen 6 ct / kWh_{therm} aus dem Verkauf der Wärmeenergie an die benachbarte NawaRo-Anlage und zum anderen 2 ct / kWh_{therm} für den KWK-Bonus erzielt werden. Weiterhin sind mit der eigenen Energieversorgung der Büro- und Aufenthaltsräume am Kompostwerk die bisher gezahlten Energiekosten als Ertrag des Unternehmens anrechenbar. In folgender Tabelle wird die Gesamtsumme der Betriebserlöse den produktionsbedingten Kosten zur Gewinn- bzw. Verlustabschätzung gegenüber gestellt.

Tabelle 7.3: Ermittlung des Unternehmergewinns A**Berechnung des zu erwartenden Unternehmergewinns pro Jahr****Aufstellung der Erträge (bei Netzanschluss in 2008)**

Stromerlöse inkl. Biodiesel (Grundverg. = 10,82 ct/kWh)	20 Jahre	55.655 kWh	6.025 €	
Wärmeverkauf bei 6 ct/kWh	20 Jahre	156.322 kWh	9.379 €	
KWK-Bonus (Stromkennzahl 0,74)	20 Jahre	0,02 ct/kWh	2.314 €	
Bisherige Kosten für Eigenwärmenutzung Burgberg		€/a	1.955 €	= 19.673 €

Erlöse versus Kosten

Erlöse durch Energieproduktion	€/a	19.673 €	
Kalkulierte Betriebskosten	€/a	92.928 €	= -73.255 €
Kosten Eigenkapitaleinsatz (durchschnittl. Zinssatz 8,5 % auf 4 a)	auf 20 a	-	1.297 €
Aufwand Fremdzinsen (durchschnittl. Zinssatz 5 % auf 14 a)	auf 20 a	-	15.136 €

Jährl. Verlust = -89.688 €**Quelle: Eigene Darstellung**

Unter Annahme einer Fremdkapitalverzinsung von 5 % (auf 14 a) und einem Ansatz von 8,5 % Zinsen (auf 4 a) für den Eigenkapitaleinsatz kommen jährlich Zinszahlungen in Höhe von 16.433 € zustande. Inclusive dieser spezifischen Kapitalkosten wird deutlich, dass bei einem Verlust von - 89.688 € pro Jahr die Wirtschaftlichkeit der Bioabfallvergärungsanlage nicht gegeben ist. Spätestens das Ergebnis der berechneten Gesamtkapitalrentabilität von -0,4 % (Berechnung durch Formel I) zeigt, dass eine Etablierung des dargestellten Unternehmens im Rahmen des Modellkonzeptes unrentabel wäre. Auch die Berechnung der Rentabilität des Eigenkapitals nach Formel II mit dem Wert von - 118 % lässt unter den hier zugrunde gelegten Rahmenbedingungen keine ökonomische sinnvolle Finanzierung des Vorhabens zu.

$$\text{Formel I:} \quad \text{Gesamtkapitalrentabilität [-0,4 \%]} = \frac{\text{Erlöse [19.673 €]} - \text{Kosten für Fremdkapital [21.622 €]}}{\text{Gesamtinvestitionssumme [508.760 €]}} \times 100$$

$$\text{Formel II:} \quad \text{Eigenkapitalrentabilität [-118 \%]} = \frac{\text{Jährlicher Gewinn bzw. Verlust [-89.688 €]}}{\text{einzusetzendes Eigenkapital [76.314 €]}} \times 100$$

Quelle: Deitermann M. (2004)¹³⁴

Deshalb sollten zunächst Wege zur Senkung der Investitions- und Betriebskosten verfolgt werden. Außerdem könnte mittels Substratergänzungen (z.B. aus Lebensmittel- und Essensresten) oder durch zusätzliche Substrataufbereitung (z.B. die vorzeitige Silierung oder Hygienisierung des Bioabfalls könnte zu einem besseren Aufschluss der Zellen führen) eine Optimierung der Gasausbeute je Mg Substrat erreicht werden.

¹³⁴ Deitermann M. (2004) in „Industrielles Rechnungswesen - IKR“ S.339

7.1.4 Sensitivitätsanalyse

Die Ökonomie von Biogasanlagen kann maßgeblich von unterschiedlichsten Einflussfaktoren bestimmt sein. Die wichtigsten Faktoren sind in erster Linie die Wärmenutzung, die Höhe der Anschaffungskosten, die substratbedingte Biogasausbeute sowie das Vergärungsmanagement. Anhand des Betriebsmodells von Unternehmen A werden gezielt drei Szenarien konkretisiert. Da in dem Unternehmen eine vollständige Wärmeausnutzung vorgesehen ist, und deshalb kaum noch Optimierungsoptionen bei der Wärmenutzung bestehen, beschäftigt sich Szenario I mit dem Aspekt der Investitionskostenreduzierung. Eine kostengünstigere Separationstechnik (\emptyset Stromverbrauch 50 KW pro h) der Firma Kufferath wird dabei in die Betriebsstruktur von Unternehmen A implementiert. Dadurch kann einerseits der Eigenstrombedarf der Anlage um 47 % reduziert und andererseits die vergütete Strommenge um 79 % gesteigert werden. Die Investitionskosten der Schneckenpresse (Akupress AS 500, siehe Angebot im Anhang S.88) belaufen sich in Verbindung mit einem Schredder (32.000 €) auf insgesamt 172.200 € netto, so dass sich die Investitionssumme für Unternehmen A um rund 42 % senkt.

Als weitere Alternative wird in Szenario II die Biogasausbeute des Ausgangssubstrates variiert. Um die Seriosität des Angebotes der Firma Komptech zu überprüfen, werden die Produktionsangaben der Firma dem Massenflussdiagramm (siehe Anhang S.97) entnommen. Darin wurde eine identische Inputgröße von 13.500 Mg Bioabfall pro Jahr zugrunde gelegt und gleichzeitig der Einsatz eines BHKWs mit einer installierten Leistung von 115 KW_{el} (mit ca. 34,2 % η_{el} , und ca. 54,3 % η_{therm}) angenommen. Dementsprechend muss diese Biogasertragsberechnung auf einer Annahme von ca. 100 Nm³ / Mg FM Biotonnenpresssaft beruhen. Dies entspricht mehr als der doppelten Biogasausbeute je Mg Presssaftsubstrat, die in Kapitel 5 dieser Arbeit verifiziert wurde. Folglich kann durch eine Steigerung der Betriebserlöse eine deutliche Verlustreduzierung auf -20.225 € / a entstehen.

In Szenario III wird die Wirkung der Szenarien I und II zusammengefasst, die eine Tragfähigkeit des Betriebes durch die Optimierung beider Einflussfaktoren zulässt. Die Erfolgsparameter der Szenarien werden in Tabelle 7.4 mit der Ausgangssituation verglichen.

Tabelle 7.4: Sensitivität Szenario I, II und III im Vergleich

Sensitivitätsanalyse Szenario I, II und III				Ausgangssituation
	Szenario III	Szenario II	Szenario I	(entspr. Kapitel 7)
Eigenstrombedarf	100.000 kWh	188.000 kWh	100.000 kWh	188.000 kWh
Gesamtkapitalrentabilität	30%	18%	6%	-0,4%
Eigenkapitalrentabilität	25%	-23%	-109%	-118%
Aufwand für Zinsen	12.999 €	19.017 €	9.479 €	16.433 €
Investitionssumme	402.460 €	588.760 €	293.460 €	508.760 €
Eigenkapital	60.369 €	88.314 €	44.019 €	76.314 €
Fremdkapital	342.091 €	500.446 €	249.441 €	432.446 €
Betriebskosten	110.165 €	130.012 €	67.776 €	92.928 €
Erlöse	138.330 €	128.804 €	29.199 €	19.673 €
Gewinn / Verlust vor Steuer =	15.166 €	-20.225 €	-48.055 €	-89.688 €

Quelle: Eigene Darstellung

7.2 Zwischenresümee

Nach Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des Unternehmens A wird anhand der betriebswirtschaftlichen Kennzahlen klar, dass aus ökonomischen Gründen unter derzeitigen Produktionsbedingungen das verknüpfte Unternehmenskonzept nicht wie ursprünglich vorgestellt umzusetzen ist. Wiedererwartend reicht außerdem die Primärenergie, die nach den Ertragsergebnissen in Kapitel 5 durch die Presssaftvergärung aus dem biogenen Abfall gewonnen werden kann, nicht zur Deckung des Wärmebedarfes aller Unternehmen am Burgberg aus. Demzufolge müssen im Hinblick auf die beiden von Unternehmen A abhängigen Betriebe (B und C) folgende Konsequenzen in dem weiteren Vorgehen der Konzeptplanung getroffen werden:

- Bis eine ökonomisch nachhaltige Produktionsalternative für Unternehmen A gefunden wird, muss das Gesamtkonzept ohne die Bioenergieleistungen des Vergärungsbetriebs (A) auskommen.
- Das Unternehmen B (NawaRo-Anlage) wird demnach so ausgelegt, dass es ganzjährig zusätzlich zu der kontinuierlichen Biogaslieferung an die Stadtwerke, die die Grundlastversorgung des Nahwärmenetzes Steinstraße sichert, seinen Eigenwärmebedarf aus nachwachsenden Rohstoffen mit abdecken kann. Dementsprechend muss die Bioenergieproduktion erhöht und damit auch die Biogasanlage größer konzipiert werden. Gleichzeitig ist der Biomasseanbau dieser Größenordnung anzupassen.
- Solange dem Unternehmen C (Brennstoff- bzw. Düngerpellettherstellung) durch den Wegfall von Betrieb A einerseits der Biotonnenpresskuchen und andererseits die Trocknungswärme für die Produktion fehlen, wird auch dieser Betrieb vorläufig aus der aktuellen Vorplanung heraus genommen.

Folglich kann aufgrund des zeitlichen Rahmens dieser Arbeit der Focus weiterhin nur noch auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen des Unternehmen B gerichtet sein, so dass die Zielsetzung des Konzeptgedankens zwar erreicht, aber das Modellkonzept momentan nicht mit der angestrebten Verknüpfung von Energie- und Stoffkreisläufen zwischen Stadt und Land etabliert werden kann.

Natürlich könnte, sobald eine wirtschaftliche Tragfähigkeit von Unternehmen A durch bessere Rahmenbedingungen gegeben ist, die Integration von Unternehmen A und C in das Gesamtkonzept nachträglich erfolgen. Allerdings muss dann die überschüssige Bioenergie aus Betrieb B entweder über eine Erweiterung des Nahwärmenetzes Steinstraße oder die entsprechende Auslegung des Unternehmens C kompensiert werden.

7.3 Unternehmen B (NawaRo-Biogasanlage)

Damit die NawaRo-Anlage den Energiebedarf für das BHKW der Stadtwerke (360 KW_{el} = 1100 KW Primärleistung) sowie ihren eigenen Wärmebedarf durch ein 150 KW_{el} BHKW decken kann, muss sie ausreichend Biogas produzieren. Deshalb ist eine Aufstockung der Anbaufläche von NawaRos um ca. 60 ha auf insgesamt 260 ha unumgänglich.

Die Annahmen, die demnach für den Biomasseanbau zur Versorgung von Unternehmen B zu Produktionsbeginn im Herbst 2007 getroffen wurden, versuchen eine relativ realistische Praxissituation widerzuspiegeln. Dabei soll ca. die Hälfte der verfügbaren Ackerfläche (100 ha) alljährlich durch die Zwei-Kultur-Nutzung mit der Erstkultur Grünroggen und der Zweitkultur Mais (Ernte in der Teigreife) bestellt werden, wobei für die Zwei-Kultur-Nutzung den Auengebieten der Werra eine besondere Präferenz zugesprochen wird. Für die andere Hälfte (100 ha) soll überwiegend der so genannte Energiemais (wachsreif geerntet) in dem herkömmlichen Anbausystem etabliert werden. Auf weiteren 60 ha Grünland können bis zu drei Schnitte pro Jahr vorgenommen werden.

Insgesamt kann durchschnittlich bei fachgerechter Konservierung der geernteten NawaRos ein Biogasertrag von 5.909 Nm³ / d erwartet werden, so dass aus bis zu 14.000 Mg FM pro Jahr über die im Kapitel 3.2 erläuterte Vergärungstechnik 2.156.700 Nm³ Biogas mit einem Primärenergiegehalt von 13.155.870 kWh gewonnen werden. Nach Abzug der zuliefernden Bioenergie (9.2334.500 kWh / a = 1.513.852 Nm³ Biogas / a) für das 360 KW-BHKW der Stadtwerke bleiben jährlich ca. 3.921.370 kWh für die Eigenenergieversorgung mittels KWK am Burgberg übrig. Insofern wird der Großteil des NawaRo-Biogases mittels einer 4-Zoll-PET-Gastrasse (250.000 € Invest)¹³⁵ über 2,7 km an das biogastaugliche Aggregat in der Steinstraße transportiert. Sollte aus technischen Gründen die Biogasproduktion der Anlage den gegebenen Energiebedarf überschreiten, und die Gasdomlager bereits aufgefüllt sein, wird das Biogas über eine Gasfackel umweltfreundlich verbrannt und nicht mittels Überdruckventile an die Atmosphäre abgegeben. Der Netto-Verkaufspreis von 0,40 € je Nm³ NawaRo-Biogas frei Nahwärmenetz beruht auf der Basis eines vorläufigen Angebotes der Vogteier Kompost GmbH an die Stadtwerke Witzenhausen.¹³⁶

Da von Seiten der Landwirte schon innerhalb der Gesprächsrunde vom 21.02.06 signalisiert wurde, dass deutlich mehr Fläche für den NawaRo-Anbau zur Verfügung stünde und eine Biomasseproduktion nach dem Zwei-Kultur-Nutzungssystem nicht ausgeschlossen sei, stellen die anbautechnischen Anpassungen zur Kapazitätsausweitung der Biomasseerzeugung sowie die Bereitstellung von mehr LN mit größer Wahrscheinlichkeit kein Problem dar.¹³⁷ Im Zuge der Produktionsausweitung bleiben jedoch die Konditionen für den Biomasseanbau (25 € / Mg FM, inkl. Gärrestaubringung) unverändert.

¹³⁵ vgl. Schwarzer T. (2006) IGW mündliche Aussage (Gespräch vom 07.02.06)

¹³⁶ vgl. Schütz G. (2006) Vogteier Kompost GmbH Angebot Biogaslieferrung vom 10.04.06 (siehe Anhang S.87)

¹³⁷ Roth U. (2006) Kreisbauernverband mündliche Aussage (Besprechung vom 21.02.06)

7.3.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten von Fahrсило, Fermenter und Gärrestlager hingegen sind unter der neuen Anlagenauslegung in der geänderten Vorplanung (Unternehmen B mit eigener Wärmebereitstellung) entsprechend des größeren Biomassedurchsatzes wesentlich höher anzusetzen. Beispielsweise vergrößert sich bei einer angesetzten Raumbelastung von 3 kg oTS / m³ und einer Aufstockung von 24,6 auf 37,4 m³ Biomasse pro Tag das Volumen der Fermenter von 2.600 m³ auf 3.800 m³. Insgesamt kommen durch die größere Auslegung allein in den Posten 1., 3. und 4. der Tabelle 7.5 ein höherer Invest von 283.799 € zum tragen. Die Netto-Investitionskosten für die stehenden Betonfermenter und die Gärrestlager berufen sich auf Angaben der Firma Holz.¹³⁸ Für die Baukosten des 3,5 m hohen Fahrsilos sind einerseits Anschaffungs- und Aufstellungskosten (143.202 €)¹³⁹ der T- und L-Betonsteine von der Firma Vanbockrijck NV sowie andererseits 76.000 € für die Bodenbetonierung (ca. 5.760 m²) der drei Silobuchten in Eigenleistung einkalkuliert. Durch die geplante Neuauslegung kommen außerdem hohe Investitions- und Betriebskosten für ein 150 KW-Zündstrahlaggregat ($\eta_{el} = 34,8 \%$, $\eta_{therm} = 54,7 \%$)¹⁴⁰ hinzu. Inklusive der spezifisch gewählten BHKW-Infrastruktur werden für jedes installierte KW_{el} Investitionskosten von 1088 € berechnet.

Tabelle 7.5: Berechnung der Höhe von Eigen- und Fremdkapital B

Berechnung der Investitionskosten (netto)

1. NawaRo-Fermenter (2 x 1.900 m ³ , mesophil, Naßvergärung)	332.000 €
Gasspeicher und -strecke	43.800 €
Gasfackel und -reinigung	28.500 €
Mess-, Einbring- und Energietechnik	66.500 €
Pump- und Rührtechnik	74.600 €
2. BHKW (150 KW)	134.800 €
Zündölspeicher (Biodieseltank)	7.400 €
Steuerung	8.500 €
Anschluss Strom / Wärme	12.500 €
3. Silo (20.000 m ³ , Höhe 3,5 m, 48 m Breite, 120 m Länge)	219.200 €
4. Gärrestlager (4.100 m ³ + 3150 m ³ , beide mit Abdeckung)	356.000 €
5. Biogasleitung (2,7 km Länge, PET 4 Zoll)	250.000 €
6. Zukauf und Versiegelung Nachbargrundstück Burgberg	65.000 €
7. Abwicklungs- und Planungskosten	104.000 €
	= 1.702.800 € *

Höhe des Eigen- und Fremdkapitalanteils in der Vorkalkulation

Gesamtbetrag der Investition		1.702.800 € *
Eigenkapitalanteil der Investition	bei 15 %	= 255.420 €
Fremdkapitalanteil der Investition	bei 85 %	= 1.447.380 €

Quelle: Eigene Darstellung

¹³⁸ Hüttner A. (2006) IGW mündliche Aussage (Telefonat vom 18.08.06)

¹³⁹ vgl. Hortmanns M. (2006) Angebot Fahrсило vom 18.08.06 (siehe Anhang S.98)

¹⁴⁰ Van Qistorp (2006) Firma Henkelhausen mündliche Aussage (Telefonat vom 25.08.06)

Folglich ergeben sich für Unternehmen B aufgrund der Gesamtinvestitionssumme von 1.702.800 € folgende Kennzahlen. Je m³ Fermentervolumen gilt es 448 € oder im Bezug auf die installierte Leistung pro KW_{el} 3.339 € für die Energieanlage durch den optimalen Kapitaleinsatz zu finanzieren.

Unter den gleichen Annahmen wie sie in der Kalkulation von Unternehmen A getroffen wurden, kann das eingesetzte Eigenkapital in Höhe von 255.420 € (15 % der Investition) über 4 Jahre (Amortisationszeit) bei ein Zinssatz von 8,5 % (8 % / a + 0,5 % / a Zinssteigerung) angelegt werden. Dabei wird jährlich einen Zinsertrag von 21.711 € erwirtschaftet, der dem Betrieb B negativ angerechnet werden kann (siehe Tab. 7.7). Bei einem Fremdkapitalanteil von 85 % und einem Zinssatz von 5 % (4,5 % / a bei KfW + 0,5 % Zinssteigerung) kommen jährlich Kapitalkosten von 72.369 € zustande, da der Kredit nach 14 Jahren ausläuft, werden diese Kosten gleichmäßig auf den angestrebten Produktionszeitraum (20 a) verteilt.

Aufgrund der Tatsache, dass der Fremdkapitalzins (5 %) unter der Gesamtkapitalrentabilität (41 %) liegt, könnte durch Aufnahme weiteren Fremdkapitals (z.B. Fremdkapitalanteil 90 %) die Eigenkapitalrentabilität von 46,6 % auf 69,9 % erhöht werden (Hebelwirkung).¹⁴¹

7.3.2 Kalkulatorische jährliche Kosten

Naturgemäß orientieren sich die Wertverluste von Produktionstechniken (Afa) sowie deren Wartungs- und Reparaturkosten an mehreren Faktoren wie z.B. der Nutzungsdauer, -intensität oder dem Netto-Anschaffungspreis. Insofern basieren die Berechnung der Wertverluste in Unternehmen B auf der spezifisch festgelegten Nutzungsdauer der jeweiligen Technik, bzw. einer linearen Abschreibung (Kapitalzinssatz 3,5 %), so dass in jedem Produktionsjahr ein stetiger Betrag in die Vollkostenrechnung mit einfließt. Die Fördersumme (75.000 €) und die Rückbaukosten von 27.000 € für Abriss- und Entsorgung der Anlage werden ebenso verteilt.

Aufgrund der intensiven Nutzung des BHKWs (8000 h / a) und vielen teuren Verschleißteilen ist die Laufzeit (Nutzungsdauer) mit 6 Jahren relativ moderat angesetzt. Bei gleichzeitig hohen Anschaffungskosten fällt daher in den meisten Afa-Aufstellungen von Biogasanlagen der Kostenpunkt BHKW als kostenintensivster ins Gewicht. Die Kosten für Reparatur und Wartung beziehen sich in der Regel auf einen bestimmten Prozentsatz des Netto-Anschaffungswertes. Eine Ausnahme stellt hierbei häufig das BHKW dar. Denn der Wartungsaufwand sowie die Verbrauchskosten für Öl, Ölfilter, Motorkühlung, etc. sind leistungsbezogen wesentlich besser zu bestimmen. Hingegen wird der Biodieselvebrauch (Zündölsubstitut) des Zündstrahlaggregates pauschal definiert (10 %).

Obwohl für die Fütterung einer NawaRo-Anlage durch den hohen Technisierungsgrad im Grunde 1,5 AKh pro Tag reichen, müssen für verschiedene Kontroll- und Reinigungsarbeiten mindesten 2 AKh / d angesetzt werden. Da dieser Betrieb im Normalfall auf keine weiteren Arbeitskräfte zurückgreifen kann, werden täglich 3 AKh eingeplant. Hinzu kommen unter der

¹⁴¹ vgl. Deitermann M. (2004) in „Industrielles Rechnungswesen - IKR“ S.340

Rubrik „Sonstige Kosten“ 230 AKh für den Arbeitsaufwand in der Bau- und Anfahrtsphase (z.B. Silobetonierung, Gülletransport, Bewachung, etc.). Diese Kosten werden wie in der Afa linear bei 3,5 % Zinsen auf den gesamten Produktionszeitraum umgelegt. Die Entlohnung je AKh wird für beide Posten in Tabelle 7.6 durchschnittlich mit 15 € festgelegt.

Tabelle 7.6: Betriebskostenaufstellung Unternehmen B

Aufstellung Betriebskosten (Bezug auf Netto-Investitionen)

Jährliche Kosten (bei 3,5 % Kalkulationszinssatz)

Afa Fermenter	20 Jahre	23.360 €	
Afa Gasspeicher und –strecke	20 Jahre	3.082 €	
Afa Gelände	20 Jahre	4.573 €	
Afa Gärrestlager	20 Jahre	25.049 €	
Afa Fahrsilo	20 Jahre	15.423 €	
Afa Biogasleitung	20 Jahre	17.590 €	
Afa Abwicklungs- und Planungskosten	20 Jahre	7.318 €	
Afa Pump- und Rührtechnik	12 Jahre	7.720 €	
Afa für Gasfackel und -reinigung	12 Jahre	2.949 €	
Afa bauliche Einrichtungen (Biodieseltank)	10 Jahre	890 €	
Afa für Elektrik	8 Jahre	3.055 €	
Afa für Mess-, Einbring- und Energietechnik	7 Jahre	10.876 €	
Afa für BHKW (150 KW)	6 Jahre	25.298 €	
Förderung (Zuschuss)	20 Jahre	-5.277 €	
Rückbaukosten	20 Jahre	955 €	= 142.860 €

(nach VDI 2067 und Afa-Tabelle des BMF(2000), siehe Literaturverz.)

Jährliche Verbrauchskosten

Biodieserverbrauch (98 ct / l)	Anteil 10 %	43.179 €	
Personalkosten (15 € / Akh)	3 Akh / d	16.425 €	
Biomassebereitstellung frei Silo (inkl. Gärrestausbringung)	25 € / m ³	350.000 €	= 409.604 €

Jährliche Wartungs- und Reparaturkosten

Wartung BHKW	1,8 ct / kWh	27.020 €	
Wartung für Pump- und Rührtechnik	5 % v. Anschw.	3.730 €	
Reparatur / Wartung der Mess-, Einbring- und Energietechnik	4 % v. Anschw.	2.660 €	
Reparatur und Wartung Biogasleitung, -fackel, und -reinigung	2 % v. Anschw.	5.570 €	
Reparatur und Wartung des Strom- und Wärmesystems	2 % v. Anschw.	420 €	
Wartung an baulichen Einrichtungen	1 % v. Anschw.	9.584 €	= 48.984 €

(nach VDI 2067 und Afa-Tabelle des BMF (2000), siehe Literaturverz.)

Sonstige jährliche Kosten

Kosten für Versicherung	€ / a	6.890 €	
Kosten für Eigenleistung in der Bauphase (15 € / Akh)	230 Akh / 20a	343 €	
Nutzungskosten Radlader (inkl. Diesel) + Waage	€ / a	42.500 €	
Kosten für Laboruntersuchungen	€ / a	1.750 €	
Buchführung / Büro etc.	€ / a	3.500 €	= 54.883 €

Quelle: Eigene Darstellung

Betriebskosten insgesamt = 656.330 €

Natürlich ist in der Betriebskostenberechnung einer NawaRo-Anlage besonders dann mit Abstand der größte Kostenansatz für das Substrat zu berücksichtigen, wenn das Pflanzenmaterial wie in diesem Fall betriebsexternen erzeugt wird. Die Bereitstellungskosten von 25 € / m³ Biomasse sind an einen langfristigen Liefervertrag zwischen dem Landwirt und der Betriebsgesellschaft gebunden. Darin ist zudem festgeschrieben, dass die Lieferung frei Biogasanlage und eine auf das Liefervolumen abgestimmte Gärrestrückführung nach Düngeverordnung erfolgen muss. Eine substratabhängige Vergütung der NawaRos im qualitativen Sinne wird nach derzeitigem Stand der Rahmenbedingungen nicht beabsichtigt. Neben einer günstigen Mitbenützungsgebühr der LKW-Waage am Kompostwerk (160 € / a) können die Kosten für die essentielle Nutzung eines Radladers durch einen einfachen Mietvertrag und ein sauber geführtes Fahrtenbuch äußerst niedrig gehalten werden. Inklusive aller Nebenkosten wird ein Stundensatz von 58 € angenommen. Pro Tag wird im Durchschnitt von einer zweistündigen Radladernutzung ausgegangen.

7.3.3 Gewinnabschätzungen

Nach einem kurzem Blick auf Tabelle 7.7 wird sofort deutlich, dass die Haupteinkommensquelle für Unternehmen B der jährliche Erlös aus dem Verkauf von ca. 1.513.582 Nm³ Biogas darstellt. Dies beweist der hohe Anteil von 78 % an den Gesamterlösen. Die Einnahmen durch die Stromeinspeisung von ca. 1.021.068 kWh_{el} / a hingegen belaufen sich trotz des hohen Vergütungssatzes von 16,72 ct / kWh_{el} (Grundvergütung + NawaRo-Bonus bei Netzanschluss in 2007) auf gerade einmal 22 %. Nach Bereinigung durch die kalkulierten Betriebskosten und den errechneten Kapitalkosten kann vor Steuerabzug ein Gewinn von 64.978 € / a verzeichnet werden.

Tabelle 7.7: Ermittlung des Unternehmergewinns B

Berechnung des zu erwartenden Unternehmergewinns pro Jahr

Aufstellung der Erträge (bei Netzanschluss in 2007)

Stromerlöse inkl. Biodiesel (Vergütung = 16,72 ct / kWh)	20 a	1.021.078 kWh	170.768 €	
Biogasverkauf bei 40 ct / Nm ³	20 a	1.513.852 Nm ³	605.541 €	= 776.309 €

Erlöse versus Kosten

Erlöse durch Energieproduktion	€ / a	776.309 €	
Kalkulierte Betriebskosten	€ / a	656.330 €	= 119.978 €
Kosten Eigenkapitaleinsatz (durchschnittl. Zinssatz 8,5 % auf 4 a)	auf 20 a	-	4.342 €
Aufwand Fremdzinsen (durchschnittl. Zinssatz 5 % auf 14 a)	auf 20 a	-	50.658 €

Jährl. Gewinn vor Steuer = 64.978 €

Quelle: Eigene Darstellung

Als ökologisch und ökonomisch nachteilig muss allerdings die unter isolierten Produktionsbedingungen (ohne Verknüpfung mit Betrieb A) große Verlustmenge an BHKW-Abwärme bewertet werden. Nach Abzug der Abstrahlungs-, Umwandlungs- und Austragsverluste (8 % der Netto-Wärmeenergie) sowie dem Bedarf an eigener Wärmeenergie werden ca. 1.472.829 kWh_{therm} pro Jahr ohne jegliche energetische Nutzung an die Umgebung abgegeben. Dies entspricht 62 % der auf dem Burgberg erzeugten Wärmeenergie. Sicherlich ist durch ein cleveres Wärmenutzungskonzept eine gewisse Ausnutzung der Wärmeenergie und damit eine Steigerung der Betriebserlöse denkbar, doch dafür eine Optimallösung zu finden, gestaltet sich nicht immer einfach. Immerhin kann im Vergleich zu anderen dezentralen Anlagen der Großteil der in der KWK frei werdenden Wärme in dem Nahwärmenetz Steinstraße Verwendung finden.

7.3.4 Sensitivitätsanalyse

Erfahrungsgemäß sind Produktionsbedingungen in der Biogaserzeugung mit Unsicherheiten behaftet. Der Rohölpreis könnte sich zukünftig weiter erhöhen, und damit sowohl den Anbau von NawaRos als auch den Biodieselpreis mit beeinflussen, da beide an diesen indirekt gekoppelt sind. Vor diesem Hintergrund versucht die Tabelle 7.8 die wirtschaftlichen Konsequenzen für Betrieb B unter steigenden Substratkosten darzustellen. Dabei wird in drei Sensitivitätsstufen unterschieden, die bei einer Kostensteigerung von 10 % beginnen und bereits nach zwei weiteren 5 %-Schritten die wirtschaftliche Tragfähigkeit des Unternehmens aushebeln. Während die jährlichen Betriebskosten stetig zunehmen (über 10 %), stagnieren die Erlöse, so dass die Eigenkapitalrentabilität immer weiter absinkt und eine Minimierung des Gewinns bis hin zum Unternehmensverlust kaum zu vermeiden ist.

Tabelle 7.8: Sensitivität bei Substratkostensteigerung

Sensitivitätsanalyse bei steigenden Biomassekosten				
	Szenario 10 %	Szenario 15 %	Szenario 20 %	Ausgangssituation
	(27,5 € / m ³)	(28,75 € / m ³)	(30 € / m ³)	(25 € / m ³)
Gesamtkapitalrentabilität	41%	41%	41%	41 €
Eigenkapitalrentabilität	33%	26%	20%	47%
Betriebskosten / a	691.330 €	708.830 €	726.330 €	656.330 €
Erlöse / a	776.309 €	776.309 €	776.309 €	776.309 €
Kapitalkosten / a	55.000 €	55.000 €	55.000 €	55.000 €
Gewinn / Verlust vor Steuer =	29.978 €	12.478 €	-5.022 €	64.978 €

Quelle: Eigene Darstellung

Dementsprechend ist die nachhaltige Bioenergieproduktion durch eine Substratkosten-erhöhung von 5 € / m³ stark gefährdet. Allerdings würde sich bei einer derartigen Preissteigerung der NawaRos durch erhöhte Energiepreise durchaus auch die Erlössituation des Betriebes entsprechend positiv verändern. Jedoch können steigende Anbaukosten auch durch andere Einflussfaktoren der landwirtschaftlichen Produktion verursacht werden.

7.4 Betrachtung des Konzeptverbundes

Dieses Unterkapitel soll zum Schluss der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen des Modellkonzeptes die Unternehmen unter isolierten und kooperativen Produktionsbedingungen polarisieren, um eine Optimierung der Betriebe in der Kapital- und Energieeffizienz vorzunehmen.

Die Konzeptstrategie beruht auf mehreren Synergieeffekten, die nicht nur durch die Verknüpfung der Stoff- und Energiekreisläufe von Stadt und Land sondern auch durch die Kooperation der Unternehmen entstehen. In der ursprünglich eingeplanten Struktur von Unternehmen A wäre das 150 KW-BHKW zur Eigenenergieversorgung beider Anlagen ökonomisch sinnvoll integriert. Deshalb wird in dem folgenden Szenario Betrieb B auf eine Verarbeitungskapazität von nur 10.000 Mg / a NawaRos (200 ha LN) ausgelegt und das 150 KW-Aggregat in Betrieb A angesiedelt. Aus 10.000 Mg landwirtschaftlicher Biomasse können ca. 1.637.825 Nm³ Biogas pro Jahr erzeugt werden. Da das 360 KW-BHKW in der Steinstraße durchschnittlich nur 1.513.852 Nm³ / a verbraucht, könnten kostenneutral ca. 123.972 Nm³ / a des NawaRo-Biogases (756.233 kWh / a Primärenergie) diskontinuierlich an die Bioabfallvergärungsanlage abgegeben werden. Damit diese auch in Versorgungsengpässen den Wärme- und Strombedarf beider Biogasanlagen decken kann, wird das Aggregat durch variable einsetzbare Biodieselennergie unterstützt. In der Betriebsstruktur des Unternehmen A müssen bis auf das größer ausgelegte BHKW und die Gasleitung zur NawaRo-Anlage keine Veränderungen vorgenommen werden. Allerdings sind entsprechend der größeren Modulauslegung höhere Investitions- und Betriebsmittel zu erwirtschaften. Doch durch die deutlich gestiegenen Erträge aus dem Wärme- und Stromverkauf an Unternehmen B kann der jährliche Verlust des Unternehmen A verringert und zugleich die Gesamt- und Eigenkapitalrentabilität verbessert werden. Tabelle 7.9 veranschaulicht die Unterschiede der isolierten und kooperativen Produktion anhand der entscheidenden Betriebskennzahlen.

Tabelle 7.9: Sensitivität der Unternehmen bei kooperativer Produktion

Sensitivitätsanalyse von Unternehmen A & B bei isolierter und kooperativer Produktion

Kennzahlen	Unternehmen A		
	isoliert	kooperativ	Differenz
Biomassebedarf (Mg)	13.500	13.500	= 0
Primärenergieproduktion (kWh)	813.039	1.726.194	= +913.155
Eigenwärmebedarf (kWh therm)	274.000	274.000	= 0
Eigenstrombedarf (kWh el)	188.000	188.000	= 0
Gesamtkapitalrentabilität (%)	-0,4	8	= +8,4
Eigenkapitalrentabilität (%)	-118	-78	= +40
Investitionssumme (€)	508.760	635.700	= +126.940
Eigenkapital (€)	76.314	95.355	= +19.041
Fremdkapital (€)	432.446	540.345	= +107.899
Erlöse (€ / a)	19.673	76.658	= +56.985
Betriebskosten (€ / a)	92.928	130.772	= +37.844
Kapitalaufwand für Zinsen (€ / a)	16.433	20.533	= +4.100
Verlust vor Steuer pro a =	-89.688 €	-74.647 €	= +15.041 €

Kennzahlen	Unternehmen B		
	isoliert	kooperativ	Differenz
Biomassebedarf (Mg)	14.000	10.000	= -4.000
Primärenergieproduktion (kWh)	13.155.870	9.990.733	= -3.165.137
Eigenwärmebedarf (kWh therm)	697.900	511.720	= -186.180
Eigenstrombedarf (kWh el)	450.000	400.000	= -50.000
Gesamtkapitalrentabilität (%)	41	45	= +4
Eigenkapitalrentabilität (%)	47	57	= +10
Investitionssumme (€)	1.702.800	1.235.990	= -466.810
Eigenkapital (€)	255.420	185.385	= -70.035
Fremdkapital (€)	1.447.380	1.050.515	= -396.865
Erlöse (€ / a)	776.309	605.541	= -170.768
Betriebskosten (€ / a)	656.330	499.930	= -156.400
Kapitalaufwand für Zinsen (€ / a)	55.000	39.920	= -15.080
Gewinn vor Steuer pro a =	64.978 €	65.692 €	= +714 €

Quelle: Eigene Darstellung

Infolge der reduzierten Durchsatzmenge an Biomasse kann die NawaRo-Anlage ihren Eigenenergiebedarf um ca. 27 % minimieren. Zudem kann sie durch Investitions- und Betriebskosteneinsparungen in der Vergärungs- und Konservierungstechnik erstens die Eigen- und Gesamrentabilität steigern und zweitens, bei deutlich geringeren Erlösen den Unternehmergewinn ausbauen. Überraschend stabil erweist sich außerdem die Betriebsstruktur bei einer Erhöhung der Substratkosten. Gegenüber der isolierten Variante kann die NawaRo-Anlage im Verbund 25 % anstatt 18 % Preiserhöhung verkraften.

Darüber hinaus kann durch die Kooperation der Unternehmen die enorme Menge an ungenutzter Abwärme des Zündstrahlaggregates (1.472.829 kWh / a) einerseits durch die wärmegeführte Betriebsweise verringert, und andererseits wesentlich effizienter genutzt werden (siehe Berechnungsgrundlagen Konzeptverbund Anhang S.80). Dadurch, dass Betrieb B weniger Silofläche und wesentlich kleinere Grundflächen für die Gärbehälter benötigt, ist mit einer Entspannung der Situation bezüglich der geringen Bauplatzverfügbarkeit am Burgberg zu rechnen.

Selbst die Landwirte können von den Synergieeffekten profitieren. Indem sie insgesamt weniger NawaRos auf den LN kultivieren müssen, werden die Felder im entfernten Umkreis des Anlagenstandortes nicht in die Biomasse erzeugende Rotation miteinbezogen, wodurch sich deren Transportwege verkürzen und damit der zeit- und kostenintensive Logistikaufwand deutlich reduziert wird. Eventuell lassen sich zusätzlich die Fruchtfolgen entsprechend nachhaltiger gestalten.

8. Schlussfolgerung

Der äußerst komplexe und fest strukturierte Aufbau des Modellkonzeptes ist an viele Einflussfaktoren gebunden, die sowohl durch globale als auch regionale Entwicklungen beeinflusst werden. Innerhalb dieser Arbeit wurden überwiegend regionalbedingte Thesen untersucht. Daher können nachfolgende Ergebnisse der zu Beginn aufgestellten Arbeitsthese nur in wenigen Ausnahmen auf andere Standorte übertragen werden.

Ist die Monovergärung von Biotonnenpresssäften machbar?

Obwohl die Biotonnenpresssäfte stofflich oft starke Schwankungen aufweisen, kann eine Monovergärung der Flüssigphase mit Hilfe spezieller Hochleistungsfermentertechnik aus der Abwasserbehandlung (USAB-Reaktoren) problemlos bewerkstelligt werden. Mittels zweistufiger Prozessführung kann dabei neben einer hohen Faulraumbelastung von einer stabilen Reaktorbiologie ausgegangen werden. Zusätzlich können geräumige Vorlagebehälter extreme Substratschwankungen abfangen.

Wie die ausgewerteten Ertragsdaten des Batch-Versuches zeigen, kann unter mesophilen Milieubedingungen ein Methanertrag von $380 \text{ l}_N \text{ CH}_4 / \text{kg oTS FM Presssaft}$ erreicht werden. Da das Presssaftsubstrat im Frühsommer (Mai) gewonnen wurde, wo meist besonders geringe OS-Gehalte im Bioabfall vorzufinden sind, muss davon ausgegangen werden, dass sich die ermittelte Methanausbeute zu anderen Jahreszeiten noch deutlich steigern lässt. Demnach ist zukünftig eine langfristige Analyse des Bioabfalls aus dem Werra-Meißner-Kreis (mindestens ein Jahreszyklus) sowie eine Biogasertragermittlung mit der effizienteren Hochleistungsfermentertechnik vorzunehmen. Darüber hinaus bestehen mehrere modifizierbare Aufbereitungsoptionen (Hygienisierung, Silierung, etc.), die den Biogasertrag zudem optimieren könnten. Ihre Potentiale gilt es ebenfalls in Parallelversuchen zu untersuchen.

Aufgrund der in Betrieb A einkalkulierten Hygienisierung kommt außerdem eine Verwertung von Essensresten aus Großküchen wie die der Uni-Mensa oder die des Krankenhauses sowie die Entsorgung von Lebensmittelüberschüssen von Teegut, Aldi, etc. und die Nutzung von Silosickersäften aus Betrieb B als mögliches Cosubstrat in Betracht. Im Rahmen dieser Arbeit konnten jene Potentiale aus zeitlichen Gründen jedoch nicht weiter verfolgt werden.

Ist eine gesellschaftliche Akzeptanz vorhanden?

Die Installation und der Betrieb einer Energieanlage, die überwiegend mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben wird und dadurch eine Steigerung der ländlichen Wertschöpfung verspricht, stoßen in der Regionalpolitik sowie in der Gesellschaft auf positive Resonanz. Eine extreme Veränderung des Landschaftsbildes ist durch Etablierung der Biogasanlage am Standort Burgberg nicht zu erwarten. Als ein eher bereichernder Landschaftseffekt könnte der abwechslungsreiche Energiepflanzenanbau (Zwei-Kultur-Nutzung) in der Umgebung wahrgenommen werden. Daher kann von einer großen Akzeptanz in der Witzenhäuser

Bevölkerung ausgegangen werden, auch wenn aufgrund der verstärkten Gärrestausbringung in Stadtnähe gelegentlich mit Geruchsbelästigungen zu rechnen ist.

Kritisch zu bewerten, ist allerdings die Erweiterung des Kompostwerkes von 7.000 Mg / a biogene Abfälle auf 13.500 Mg / a. Hier ist durch das ständige Umsetzen der vielen Kompostmieten von einer deutlich zunehmenden Geruchsemissionen besonders im Sommer auszugehen, so dass mit Sicherheit aus der Bevölkerung einige Gegenstimmen zu erwarten sind. Ein positiver Ausgang des Genehmigungsverfahrens zur Bioabfallbehandlung von 13.500 Mg auf dem Burgberg scheint daher fraglich.

Sind die benötigten Biomassen regional verfügbar?

Während einer Gesprächsrunde im Februar 2006 signalisierten einige Landwirte, die sowohl Grünland als auch Ackerflächen in unmittelbarer Nähe des vorgesehenen Anlagenstandortes bewirtschaften, die Bereitschaft auf über 200 ha LN kontinuierlich Energiepflanzen zur Substratversorgung der NawaRo-Anlage anzubauen und frei Silo anzuliefern. Damit eine langfristige Versorgungssicherheit gewährleistet werden kann, sollen zum einen Lieferverträge zu fairen Konditionen (25 € / Mg NawaRo) über längere Perioden geschlossen und zum anderen eine Beteiligung der Landwirte an der Betreibergesellschaft vorgenommen werden. Zusätzlich muss die Hälfte der Biomasse vom Acker über die Zwei-Kultur-Nutzung erzeugt werden, so dass zumindest teilweise eine nachhaltige und artenreiche Energiefruchtfolge den Boden- und Umweltschutz sicherstellt. Dementsprechend kann von einer regionalen Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Biomasse in einer Größenordnung von bis zu 14.000 Mg / a ausgegangen werden. Gleichzeitig sind mit dem Auslaufen der Entsorgungsverträge (zwischen der Firma Fehr und der Vogteier Kompost GmbH) ab 2008 jährlich bis zu 13.5000 Mg Bioabfälle frei Kompostwerk verfügbar.

Kann der Konzeptgedanke realisiert werden?

Gestaltet sich der Betrieb der Unternehmen rentabel?

Zusammenfassend lässt sich nach der wirtschaftlichen Analyse der einzelnen Unternehmen anhand der derzeitigen Produktionsbedingungen festhalten, dass das Modellkonzept nicht gänzlich umzusetzen ist. Die Primärenergie, die nach den Ertragsergebnissen in Kapitel 5 durch die Bioabfallvergärungsanlage aus dem biogenen Abfall gewonnen werden kann, reicht nicht zur ganzjährigen Sicherung des Wärmebedarfes der drei Unternehmen am Burgberg aus. Zudem lässt sich für Unternehmen A derzeit keine nachhaltig ökonomische Energieproduktion unter Einsatz der genannten Separationstechniken realisieren.

Jedoch beweist die Sensitivitätsanalyse in Szenario III, dass mittels einer Investitionskostensenkung auf Basis der günstigeren Separationstechnik sowie einer höheren Biogasausbeute aufgrund einer anderen Vorbehandlung des Substrates die Verlustsituation entschärft und ein positives Betriebsergebnis erreicht werden kann. Demzufolge sollte durch intensive Arbeit an diesen beiden wichtigen Stellschrauben des Bioabfallvergärungsunternehmens schon bald eine betriebswirtschaftlich nachhaltige Ökonomie umsetzbar sein.

Die benötigte Produktionstechnik von Unternehmen B ist zwar hinsichtlich des Kapital- und des Betriebsmitteleinsatzes deutlich umfangreicher als bei vergleichbar konzipierten NawaRo-Anlagen, doch dafür kann man, Dank der zusätzlichen Wärmenutzung in dem Nahwärmenetz Steinstraße, auch entsprechend höhere Erlöse je m³ Biogas (40 ct. / Nm³) einkalkulieren. Dadurch lässt sich ab Inbetriebnahme in 2007 für die Bioenergieanlage unter isolierten Produktionsbedingungen ein jährlicher Unternehmensgewinn von 64.978 € prognostizieren.

Zusätzlich kann bei gewissenhafter Betriebsführung neben einer hohen Investitionssicherheit durch die garantierte EEG-Vergütung (über 20 Jahre) eine stabile Kapitalrendite von 41 % erwartet werden. Sollte sich der Trend an den Energiemärkten wie momentan der Fall weiter nach oben entwickeln, muss einerseits mit einer Gewinnmaximierung durch steigende Wärme- und Stromerlöse und andererseits mit höheren Betriebskosten für die Biomassebereitstellung gerechnet werden. Entscheidend wird sich dabei die Preisgestaltung der einzelnen fossilen Energieträger (Erdöl, Erdgas) auf die Betriebsbedingungen auswirken. Insofern wurde die Sensitivität der NawaRo-Anlage anhand mehrerer Worst-Case-Szenarien betrachtet. Während durch stark steigende Rohölpreise schon nach einer Substratkostensteigerung von 20 % (5 € / Mg FM) eine Verlustsituation des Betriebes auftrat, wurde bewusst auf die Steigerung der Betriebserlöse durch einen angepassten Biogaspreis verzichtet. Demzufolge stellt ein entsprechend agierender Biogasliefervertrag, der in seinen Vertragsklauseln eine flexible Preisgestaltung orientierend an dem aktuellen Erdgaspreisniveau vornimmt, eine entscheidende Komponente in dem Gesamtkonzept dar.

Wäre hingegen eine Substratkostenerhöhung von 5 € / Mg Biomasse durch mehrere andere variable Produktionsfaktoren wie Lohn-, Saatgut- und Düngerkosten in der erzeugenden Landwirtschaft verursacht, könnte die Tragfähigkeit der Biogasanlage mit Sicherheit nicht länger aufrecht gehalten werden.

In der kooperativen Produktionsform ist für die NawaRo-Anlage von Vorteil, dass sie gegenüber isolierten Produktionsbedingungen eine Substratkostenerhöhung wesentlich besser verkraftet. Gleichzeitig ergeben sich mittels koordinierter Zusammenarbeit für Unternehmen A und B mehrere Kostenvorteile, die auf eine energieeffizientere Produktion und auf eine optimale Anlagendimensionierungen zurückzuführen sind. Trotzdem eröffnet das Verbundkonzept den Betrieben zurzeit keine ausreichende ökonomische Stabilität, um gemeinsam eine gesunde Unternehmensstruktur aufzubauen. Wenn allerdings bis 2008 durch eine kombinierte Betriebsoptimierung (Investitionskosten senkung und eine Steigerung der Biogasausbeute) eine solide Tragfähigkeit von Unternehmen A bestehen sollte, gilt es, vor Aufnahme der Planungsaktivitäten für das angepasste Verbundkonzept durch öffentliche Aufklärungs- und Überzeugungsarbeit das Verständnis der Bürger zu gewinnen, um das wichtige Ergebnis eines erfolgreich verlaufenden Genehmigungsverfahrens zu erreichen.

9. Fazit

Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse sprechen derzeit die Kennzahlen der betriebswirtschaftlichen Untersuchungen für eine alleinige Umsetzung der isolierten NawaRo-Anlage am Standort Burgberg. Denn je früher der Einstieg in die Erzeugung erneuerbarer Energien gewagt wird, desto schneller kann erstens die Unabhängigkeit von fossiler Energie, zweitens eine Deeskalation der Klimaerwärmung und Rohstoffkriege sowie drittens ein reibungsloser Betrieb mit viel versprechenden wirtschaftlichen Erfolgen erreicht werden. Zuvor ist jedoch die Aktualität der Annahmen, die zur Berechnung und Erstellung der wirtschaftlichen Betriebsergebnisse getroffen wurden, in der Detailplanungsphase zu überprüfen.

Weiterhin sollten Wege, die eine energetische Nutzung separierter Bioabfälle unter rentablen Produktionsbedingungen erlauben, verfolgt und an das Modellkonzept adaptiert werden. Damit einerseits der Pilotcharakter bezüglich der Energieautarkie der Vergärungsanlagen durch die Eigenenergieversorgung gewährleistet, und andererseits in naher Zukunft eine energieeffiziente Verwertung organischer Abfälle unter den Bedingungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes umzusetzen ist. Denn mit Inkrafttreten der TA Siedlungsabfall, die eine Deponierung von Abfällen mit mehr als 5 % Organikanteil verbietet (siehe KrWAbfG), ist seit dem vergangenen Jahr ein deutlicher Trend zu größeren Massenströmen an biogenen Abfällen zu verzeichnen, was die energetische Abfallverwertung zusammen mit den Grundvergütungsoptionen des EEG zusehends interessanter macht.¹⁴² Insbesondere das Bundesland Hessen hat diesbezüglich große Potentiale, da eine flächendeckende Bioabfallsammlung eingeführt ist, und je Einwohner und Jahr ca. 119 kg Bioabfall anfallen.¹⁴³ Demnach könnte bei 5,5 Mio. Einwohnern jährlich aus 654.500 Mg Bioabfall reichlich Bioenergie gewonnen werden, die bisher als Wärmeenergie aus den Kompostmieten ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird. Pro Jahr ließen sich daraus durchschnittlich knapp 20 Mio. Nm³ Biogas also gut 120 Mio. kWh Primärleistung erzeugen. Mit der Akquise von Fördermitteln aus Politik oder Wirtschaft sollte der Betrieb des Pilotprojektes bis zur selbstständigen Tragfähigkeit durch günstigere Produktionsbedingungen überbrückt werden, damit in dem innovativen Kooperationsmodell rechtzeitig umfangreiche Pionierforschung hinsichtlich der Energie- und Stoffkreisläufe, deren Wirkungen auf den Energiepflanzenanbau sowie den effizienten Synergieeffekten unter realen Praxisbedingungen betrieben werden kann.

Eine weitere Alternative zu dem untersuchten Separationsverfahren könnte eventuell die Vollverstromung der Bioabfälle darstellen. Daher sollte ebenfalls die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage unter zugrunde gelegten Rahmenbedingungen beobachtet werden. Voraussichtlich würden sich dadurch allerdings die Situationen hinsichtlich der Geruchsemissionen und der Verfügbarkeit an Bauplatz auf dem Burgberg entscheidend verschärfen.

¹⁴² Dichtl N. (2005) in „Anaerobtechnik“ S. 278

¹⁴³ Reichenbach J. (2006) Tagungsband „Bio- und Sekundärrohstoffe“ S. 636

10. Ausblick auf die Realisierungsphase

Im Allgemeinen ist vor der Realisierungsphase eine Entscheidung hinsichtlich der an das Modell angepassten Betriebsstrukturen unabdingbar. Außerdem sollte feststehen, welche Anlagentechniken unter den gewählten Produktionsbedingungen zum Einsatz kommen, damit frühzeitig der Kontakt zu Geschäftspartnern geschlossen und zwischen mehreren Angeboten und der am Markt verfügbaren Techniken entschieden werden kann.

10.1 Umsetzung des Modellkonzeptes

Zunächst wird für 2007 der Bau der NawaRo-Anlage mit der Biogasleitung zum Nahwärmenetz Steinstraße forciert werden, da hier schon heute eine ökonomische Tragfähigkeit des Unternehmens gegeben und die benötigte Biomasse aus der Landwirtschaft rechtzeitig zur Fertigstellung der Anlage verfügbar ist.

Hingegen ließe sich die Etablierung der Bioabfallvergärungsanlage (Unternehmen A) frühestens ab 2008 mit Auslaufen der Entsorgungsverträge über die biogenen Abfälle umsetzen. Zumal dafür vorerst eine wesentliche Verbesserung der wirtschaftlichen Produktionsvoraussetzungen notwendig wäre.

10.2 Schritte der Realisierungsphase

Parallel zu dieser Arbeit wurde bereits eine Entwurfsplanung des Projektes von der IGW erstellt, worauf nachfolgende Schritte zur Umsetzung des Modells zu erwarten sind.

1. Endgültige Vernetzung und Aufgabenverteilung unter den Kooperationspartnern aus Landwirtschaft, Stadtwerken und Kompostanlagenbetrieb
 2. Klärung über das Bauamt, welche Änderungen durch die neue Flächennutzung am Burgberg und ggf. durch den Verlauf der Biogasleitung zur Stadt nötig sind
 3. Inangriffnahme von Genehmigungsverfahren
 4. Absicherung der Förderungs- und Finanzierungszusagen
 5. Aufkauf und Einebnung des benachbarten Geländes
 6. Aufstellung eines Rahmenzeitplanes
 7. Erstellung einer Detailplanung für die Teilbetriebe des Konzeptes
 8. Informationsveranstaltung in der Bevölkerung
 9. Anbau der nachwachsenden Rohstoffe für die Konservierung und anschließende Vergärung (2007)
 10. Baubeginn mit aufeinander abgestimmten Trassen- und Anlagenbau (2007)
-

Die Umsetzung des Modellkonzeptes in der geschilderten Größenordnung wird voraussichtlich eine minimale Zeitspanne von 12 - 18 Monaten benötigen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll rechtzeitig Fragen zur Anlagengenehmigung, der Flächenerweiterung auf dem Nachbargrundstück, der Fertigungs- und Lieferfristen von Vergärungstechniken sowie dem Anbau von nachwachsenden Rohstoffen und deren Ernte, Transportlogistik und Konservierung zu klären. Dabei ist es wichtig, mittels vertraglich klar abgesicherten Vereinbarungen, die Planungs- und Bauphase nach den Zielsetzungen des abgesteckten Zeitplans zu beenden, um schnellst möglich in die Produktionsphase einsteigen zu können. Zudem spielt die Kommunikation unter den in der Planung und Umsetzung agierenden Personen eine entscheidende Rolle für den später reibungslos funktionierenden Betriebsalltag der Anlage. Dabei ist zusätzlich die bisher bestehende Situation auf der Kompostanlage und die der Umgebung zu berücksichtigen.

10.3 Mögliche Folgeeffekte des Modellprojektes in der Region

- Mit Hilfe des Projektes könnte das Umwelt-, Werte- und dadurch auch das Wirtschaftsbewusstsein der Bevölkerung vor Ort verändert werden. Wodurch ein nachhaltigeres Handeln der Bürger (z.B. Ökostrom beziehen, Energie sparen, etc.) sowie eine Imageverbesserung der Stadtwerke und der Uni die Folge sein könnte.
 - Über die Einbindung der Lehre und Forschung der Universität Kassel könnte ein interdisziplinäres Netzwerk des Bioenergiesektors in Witzenhausen gebildet werden. Gleichzeitig könnten weitere Bioenergiekonzepte im Kreis folgen, die in Verbindung mit dem neuen Standbein des FB 11 (NawaRo) den Standort stärken.
 - Dadurch, dass neue Stoff- und Energiekreisläufe zwischen Stadt und Land entstehen würden, könnte der Begriff „Regionalität“ in Verbindung mit dem Bioenergiekonzept eine vielseitige Bedeutung bekommen.
 - Durch eine Koppelung einer regionalen Währungseinheit (z.B. REGIODigits) an die erzeugte erneuerbare Energie könnte die Wertschöpfung in der Region gestärkt und eventuell ein wirtschaftlicher Aufschwung ausgelöst werden.
Die Energiegutschriften (kWh-Betrag) könnten von der Beteiligungsgesellschaft, die die geschilderte Energieanlage baut, in Höhe eines bestimmten Wertes gegen Euro eingetauscht werden. Innerhalb der Region wäre sie als komplementäres Zahlungsmittel, das unabhängig von der Euro-Liquidität auf Basis stabiler Wertkonstanz der kWh-Stromeinheit funktioniert, anerkannt. Darüber hinaus könnten die so genannten REGIODigits zur Begleichung der Öko-Stromrechnung dienen. Eventuell könnte über die Bioenergiewährung gleichzeitig ein Bonussystem für Haushalte, die ihre Bioabfälle sauber von ihrem Restmüll trennen oder große Biomasse mengen abgeben, eingeführt werden.
-