

**Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn**

**Landwirtschaftliche Fakultät**

The logo consists of the letters 'U', 'S', and 'L' in a stylized, hand-drawn font. The 'U' is green, the 'S' is black, and the 'L' is red. The letters are positioned above two parallel green diagonal lines that extend from the bottom right towards the center.

---

**Lehr- und Forschungsschwerpunkt**

**„Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“**

## **Forschungsbericht**

**Nr. 160**

# **Charakterisierung und Optimierung von NawaRo-Biogasanlagen in typischen Ackerbau- regionen in NRW**

Verfasser:

Jenny Roitsch und Prof. Dr. agr. Wolfgang Büscher

**Herausgeber:** Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Meckenheimer Allee 172 15, 53115 Bonn  
Tel.: 0228 – 73 2285; Fax.: 0228 – 73 1776  
www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen  
Bonn, August 2009

ISSN 1610-2460

**Projektleitung:** Prof. Dr. Wolfgang Büscher

**Projektbearbeiter:** M. Sc. agr. Jenny Roitsch

Institut für Landtechnik

Nussallee 5

53111 Bonn

**Zitiervorschlag:**

ROITSCH, J. UND W. BÜSCHER (2009): Charakterisierung und Optimierung von NawaRo-Biogasanlagen in typischen Ackerbauregionen in NRW. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 160, 154 Seiten





## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung .....	2
<b>2</b>	<b>Literaturanalyse</b>	<b>3</b>
2.1	Grundlagen der Biogaserzeugung .....	3
2.2	Anaerobe Vergärung .....	3
2.3	Verfahrenstechnik.....	10
2.3.1	Einteilung der Verfahren zur Biogaserzeugung .....	12
2.3.2	Rührwerkstechnik.....	13
2.3.3	Pumpen und Substratleitungen .....	15
2.3.4	Verstromung .....	17
2.3.5	Abwärmenutzung .....	18
2.4	Einflussfaktoren und Prozessparameter.....	24
2.4.1	Temperatur .....	24
2.4.2	pH-Wert.....	25
2.4.3	Organische Säuren und Pufferkapazität .....	25
2.4.4	Hemmstoffe .....	26
2.4.5	Gaszusammensetzung.....	27
2.4.6	Faulraumbelastung .....	30
2.4.7	Verweilzeit .....	30
2.4.8	Spurenelemente .....	31
2.5	Substrateinsatz bei NawaRo-Biogasanlagen .....	32
2.5.1	Nachwachsende Rohstoffe .....	32
2.5.2	Wirtschaftsdünger.....	33

---

2.6	Gesetzlicher Hintergrund .....	34
2.7	Grundlagen der Wirtschaftlichkeit .....	39
2.8	Grundlagen des Qualitätsmanagements .....	40
2.8.1	Qualitätsbegriff.....	40
2.8.2	Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung.....	41
2.8.3	Auditarten.....	42
2.8.4	Zertifizierung.....	44
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>45</b>
3.1	Auswahlkriterien und Anlagenbeschreibung .....	45
3.1.1	Praxisanlage A.....	45
3.1.2	Praxisanlage B.....	51
3.1.3	Vergleichsanlagen mit Flüssigmistbeschickung .....	52
3.2	Messkonzept.....	53
3.3	Langzeituntersuchung .....	53
3.3.1	Analyse des Gärsubstrates.....	53
3.3.2	Gasanalyse.....	56
3.3.3	Erfassung technischer und energetischer Parameter .....	56
3.3.4	Analyse der Inputmaterialien .....	57
3.3.5	Gärversuche.....	58
3.3.6	Datenaufzeichnung.....	59
3.3.7	Störfallanalyse.....	60
3.4	Optimierungsprozess.....	60
3.5	Erstellung eines QM-Handbuches.....	62
<b>4</b>	<b>Darstellung und Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>82</b>
4.1	Inputmaterialien .....	82

---

4.2	Qualität der Inputmaterialien.....	87
4.3	Untersuchungsergebnisse des Gärsubstrates .....	89
4.3.1	Trockensubstanz .....	89
4.3.2	Organische Trockensubstanz.....	92
4.3.3	pH-Wert.....	94
4.3.4	Salzgehalt und Leitfähigkeit.....	96
4.3.5	Fettsäuren und FOS/TAC .....	97
4.3.6	Essigsäureäquivalent .....	99
4.3.7	Vergleich der Prozessstabilität zwischen zwei Anlagentypen .....	101
4.4	Gasanalyse .....	102
4.4.1	Methan.....	102
4.4.2	Schwefelwasserstoff.....	106
4.4.3	Sauerstoff.....	108
4.5	Spurenelemente .....	109
4.6	Darstellung der energetischen Parameter .....	110
4.6.1	Temperatur .....	110
4.6.2	Leistung .....	113
4.7	Untersuchungsergebnisse der Gärversuche im Batchfermenter.....	116
4.8	Störfallanalyse .....	121
4.9	Ergebnisse des Qualitätsmanagements.....	122
4.9.1	Auswertung des Audits.....	137
4.9.2	Vergleich der Ergebnisse mit anderen NawaRo-Biogasanlagen.....	139
4.9.3	Bewertung der Methode des Qualitätsmanagements.....	140
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>142</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>147</b>

**7 Literaturverzeichnis**

**149**

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1: Der vierstufige Abbauprozess der anaeroben Vergärung .....</b>	<b>4</b>
<b>Abbildung 2: Darstellung der Verfahrensschritte bei der Biogasproduktion (FNR, 2006) .....</b>	<b>11</b>
<b>Abbildung 3: Tauchmotorrührwerk (KTBL, 2007).....</b>	<b>14</b>
<b>Abbildung 4: Paddelrührwerk (KTBL, 2007) .....</b>	<b>14</b>
<b>Abbildung 5: Unterschiedliche Energiegehalte von Nadelholz- Hackgut getrocknet und Na-delholz- Hackgut waldfrisch (ARGRE KOMPOST UND BIOGAS, 2008).....</b>	<b>22</b>
<b>Abbildung 6: Tragluftdach mit integriertem Gasspeicher (Quelle: FA Baur).....</b>	<b>46</b>
<b>Abbildung 7: Eintragstechnik „Quick Mix“ (Quelle: Vogelsang).....</b>	<b>47</b>
<b>Abbildung 8: Pumpenstation auf dem Untersuchungsbetrieb A.....</b>	<b>48</b>
<b>Abbildung 9: Beispiel eines Umpump-Protokolles der Anlage A.....</b>	<b>48</b>
<b>Abbildung 10: Gärstrecke bestehend aus vier Behältern .....</b>	<b>49</b>
<b>Abbildung 11: Einsatz des Tauchmotorrührwerks (Quelle: FA Stallkamp) .....</b>	<b>49</b>
<b>Abbildung 12: Paddelrührwerk (Quelle: FA Agrikomp).....</b>	<b>50</b>
<b>Abbildung 13: Blockheizkraftwerk (FA Jenbacher) .....</b>	<b>50</b>
<b>Abbildung 14: Praxisanlage B.....</b>	<b>51</b>
<b>Abbildung 15: Fütterungssystem auf Untersuchungsbetrieb B .....</b>	<b>51</b>
<b>Abbildung 16: Prinzip und Aufbau des Messkonzeptes.....</b>	<b>53</b>
<b>Abbildung 17: Gasanalysegerät (Quelle: FA ExTox).....</b>	<b>56</b>
<b>Abbildung 18: Gärversuch im Batchfermenter .....</b>	<b>59</b>
<b>Abbildung 19: Aufbau der QM-Dokumentation .....</b>	<b>64</b>
<b>Abbildung 20: Darstellung des Prozesses der Messung, Bewertung und Verbesserung von Leistungen .....</b>	<b>72</b>
<b>Abbildung 21: Konzept zur Risikoanalyse.....</b>	<b>77</b>
<b>Abbildung 22: Massenanteile im gesamten Versuchszeitraum (Anlage A).....</b>	<b>83</b>
<b>Abbildung 23: Massenanteile der Komponenten NawaRo und Festmist (BGA A).....</b>	<b>83</b>
<b>Abbildung 24: Massenanteile im gesamten Versuchszeitraum (Anlage B) .....</b>	<b>85</b>
<b>Abbildung 25: Massenanteile der Komponenten NawaRo und Festmist (Anlage B).....</b>	<b>85</b>
<b>Abbildung 26: Anteile der Biogasanlagen nach Substratgemisch (KTBL, 2006) .....</b>	<b>86</b>
<b>Abbildung 27: Lagerung der Maissilage auf Anlage B und Nacherwärmung.....</b>	<b>87</b>
<b>Abbildung 28: Trockensubstanzgehalt der Biogasanlage A im Zeitverlauf.....</b>	<b>90</b>
<b>Abbildung 29: Trockensubstanzgehalt der Biogasanlage B im Zeitverlauf.....</b>	<b>91</b>
<b>Abbildung 30: Organischer Trockensubstanzgehalt Anlage A .....</b>	<b>92</b>
<b>Abbildung 31: Organischer Trockensubstanzgehalt Anlage B .....</b>	<b>93</b>
<b>Abbildung 32: Verlauf der pH-Werte im Versuchszeitraum (Anlage A).....</b>	<b>94</b>
<b>Abbildung 33: Verlauf der pH-Werte im Versuchszeitraum (Anlage B) .....</b>	<b>95</b>
<b>Abbildung 34: Beziehung zwischen dem Salzgehalt und der Leitfähigkeit.....</b>	<b>97</b>
<b>Abbildung 35: Essigsäureäquivalente – Untersuchungsbetrieb A .....</b>	<b>100</b>
<b>Abbildung 36: Essigsäureäquivalente – Untersuchungsbetrieb B .....</b>	<b>100</b>

---

<b>Abbildung 37: Beziehung zwischen Essigsäureäquivalent und FOS/TAC .....</b>	<b>101</b>
<b>Abbildung 38: Methangehalt der Anlage A im Versuchszeitraum.....</b>	<b>103</b>
<b>Abbildung 39: Boxplot zur Darstellung des Methangehalts bei BGA A .....</b>	<b>104</b>
<b>Abbildung 40: Methangehalt Anlage B.....</b>	<b>105</b>
<b>Abbildung 41: Boxplot zur Darstellung des Methangehalts bei BGA B .....</b>	<b>105</b>
<b>Abbildung 42: Schwefelwasserstoffgehalte der Anlage A .....</b>	<b>106</b>
<b>Abbildung 43: Abhängigkeit des Methangehaltes vom Schwefelwasserstoff nach Eisenzugabe .....</b>	<b>107</b>
<b>Abbildung 44: Schwefelwasserstoffgehalt Anlage B.....</b>	<b>107</b>
<b>Abbildung 45: Sauerstoffgehalt der Anlagen A und B .....</b>	<b>108</b>
<b>Abbildung 46: Substrateinsatz und BHKW-Leistung nach Spurenelementzugabe BGA A .....</b>	<b>110</b>
<b>Abbildung 47: Darstellung des Temperaturverlaufs im Versuchszeitraum (BGA A).....</b>	<b>111</b>
<b>Abbildung 48: Darstellung des Temperaturverlaufs im Versuchszeitraum (BGA A).....</b>	<b>112</b>
<b>Abbildung 49: Leistungsverlauf auf Basis der Mittelwerte (Anlage A) .....</b>	<b>114</b>
<b>Abbildung 50: Leistungsverlauf auf Basis der Mittelwerte (Anlage B).....</b>	<b>115</b>
<b>Abbildung 51: Wirkungsgrad Anlage B.....</b>	<b>116</b>
<b>Abbildung 52: Auswertung der Störfälle .....</b>	<b>121</b>
<b>Abbildung 53: Kontrollempfehlung .....</b>	<b>146</b>

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1: Stoffumsetzung in der hydrolytischen Phase und Beispiele beteiligter Mikro-organismen</b> (SCHULZ ET AL., 1982).....	5
<b>Tabelle 2: Stoffumsetzungen in der acidogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikro-organismen</b> (SCHULZ ET AL., 1982; GRAF, 1999; OTTOW, 1997).....	7
<b>Tabelle 3: Stoffumsetzungen in der acetogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen</b> (SCHULZ ET AL., 1982; KLEEMANN UND MELIB, 1993; WENZEL, 2002) .....	8
<b>Tabelle 4: Stoffumsetzungen in der methanogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen</b> (KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001; WENZEL, 2002).....	10
<b>Tabelle 5: Vergleich der Pumpenbauarten .....</b>	15
<b>Tabelle 6: Erforderliche Konzentrationen der Spurenelemente (SAHM, *MUNDRACK; KUNST);....</b>	31
<b>Tabelle 7: Schwankungsbreite bei Zusammensetzung und Biogasertrag verschiedener Gülle- und Mistarten im mesophilen Temperaturbereich .....</b>	33
<b>Tabelle 8: Messparameter .....</b>	74
<b>Tabelle 9: Unterteilung der Gefährdungen nach deren Art bzw. Herkunft .....</b>	79
<b>Tabelle 10: Risikobeurteilungsmodell.....</b>	80
<b>Tabelle 11: Mittelwerte der täglichen Inputmengen[kg/d] Anlage A .....</b>	82
<b>Tabelle 12: Mittelwerte der täglichen Inputmengen [kg/d] Anlage B.....</b>	84
<b>Tabelle 13: Ergebnisse der Temperaturmessung am Silo.....</b>	87
<b>Tabelle 14: Ergebnisse der Analyse der Maissilage (Anlage A) .....</b>	88
<b>Tabelle 15: Stromwert der Silage (THAYSEN, 2007).....</b>	89
<b>Tabelle 16: Kennzahlen zum TS-Gehalt (BGA A).....</b>	90
<b>Tabelle 17: Kennwerte zum TS-Gehalt (BGA B) .....</b>	91
<b>Tabelle 18: Kennwerte zum oTS-Gehalt (BGA A) .....</b>	93
<b>Tabelle 19: Kennwerte zum oTS-Gehalt (BGA B) .....</b>	94
<b>Tabelle 20: Kenngrößen zum pH-Wert (Anlage A).....</b>	95
<b>Tabelle 21: Kenngrößen zum pH-Wert (Anlage A).....</b>	95
<b>Tabelle 22: Darstellung der Salzgehalte und Leitfähigkeit beider Biogasanlagen.....</b>	97
<b>Tabelle 23: Vergleich von Essigsäuregehalt und FOS/TAC beider Untersuchungsbetriebe .....</b>	98
<b>Tabelle 24: Kennwerte der Propionsäuregehalte von Untersuchungsbetrieb A und B .....</b>	99
<b>Tabelle 25: Gehalt an Spurenelementen 1.Termin .....</b>	109
<b>Tabelle 26: Gehalt an Spurenelementen 2.Termin (Kontrolltermin) .....</b>	109
<b>Tabelle 27: Betriebsstunden des BHKW (BGA A).....</b>	113
<b>Tabelle 28: Abwärmenutzung der BGA A im Versuchszeitraum.....</b>	114
<b>Tabelle 29: Vergleich der Gaserträge aus der Maissilage (oben/mitte Anlage A) vom 26.5.09 .....</b>	117
<b>Tabelle 30: Kennwerte der Maissilage von Untersuchungsbetrieb A.....</b>	117
<b>Tabelle 31: Gasertrag des Hähnchenmistes (Anlage A) vom 26.05.09.....</b>	118
<b>Tabelle 32: Gaserträge der Maissilage oben (Anlage B) vom 26.05.09 .....</b>	119

---

<b>Tabelle 33: Auswertung der Gärversuche (Anlage B) vom 26.05.09 .....</b>	<b>119</b>
<b>Tabelle 34: Gasertrag des Rindermistes (Anlage B) vom 26.05.09 .....</b>	<b>120</b>
<b>Tabelle 35: Auswertung der Gärversuche (Anlage B) vom 26.05.09 .....</b>	<b>120</b>
<b>Tabelle 36: Checkliste – Verantwortung der Leitung.....</b>	<b>123</b>
<b>Tabelle 37: Checkliste – Ziele des Anlagenbetreibers.....</b>	<b>123</b>
<b>Tabelle 38: Checkliste - Umweltaspekte.....</b>	<b>124</b>
<b>Tabelle 39: Checkliste – Qualifikation von Mitarbeitern .....</b>	<b>124</b>
<b>Tabelle 40: Checkliste - Qualitätsmanagement-Handbuch .....</b>	<b>126</b>
<b>Tabelle 41: Checkliste – Technischer Betrieb.....</b>	<b>127</b>
<b>Tabelle 43: Checkliste – Ökonomie des Betriebes .....</b>	<b>128</b>
<b>Tabelle 44: Checkliste – Wartung, Reinigung und Schädlingsbekämpfung.....</b>	<b>128</b>
<b>Tabelle 45: Checkliste – Grundstück und Erschließung .....</b>	<b>129</b>
<b>Tabelle 46: Checkliste – Anlage und Ausrüstung.....</b>	<b>130</b>
<b>Tabelle 47: Checkliste - Substratbeschaffung.....</b>	<b>130</b>
<b>Tabelle 48: Checkliste - Betriebsmittel.....</b>	<b>131</b>
<b>Tabelle 49: Checkliste – Verwertung von Gärresten .....</b>	<b>132</b>
<b>Tabelle 50: Checkliste – Abnahme von Gas, Strom und Wärme.....</b>	<b>133</b>
<b>Tabelle 51: Checkliste – Messung technischer und biologischer Parameter .....</b>	<b>134</b>
<b>Tabelle 52: Checkliste – Reklamation und Beschwerde .....</b>	<b>134</b>
<b>Tabelle 53: Checkliste – Störfallmanagement und Fehlerbehebung .....</b>	<b>135</b>
<b>Tabelle 54: Checkliste - Sicherheit .....</b>	<b>135</b>
<b>Tabelle 55: Checkliste -Rückverfolgbarkeit .....</b>	<b>136</b>
<b>Tabelle 56: Checkliste – Mess- und Prüfmittel.....</b>	<b>136</b>
<b>Tabelle 57: Checkliste – Interne Audits .....</b>	<b>137</b>
<b>Tabelle 58: Auswertung des QM-Systems auf Untersuchungsbetrieb A .....</b>	<b>138</b>
<b>Tabelle 59: Vergleich der Ergebnisse des Qualitätsstandards .....</b>	<b>139</b>

**Abkürzungsverzeichnis**

BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BP	Beobachtungspunkt
CCM	Corn Cob Mix
CCP	Critical Control Point
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
F	Fermenter
FM	Frischmasse
g	Gramm
h	Stunde
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
l	Liter
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
n	Anzahl der Wiederholungen
oTS	organische Trockensubstanz
pH	pH-Wert
s	Standardabweichung
t	Tonne
TM	Trockenmasse



## 1 Einleitung

### 1.1 Problemstellung

Die Bereitstellung von Energie im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit stellt eine der großen globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Trotz begrenzter Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe steigt der Energiebedarf der Weltbevölkerung ungebremst an. Um die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung nicht zu bremsen und sich den abzeichnenden CO<sub>2</sub>-bedingten klimatischen Veränderungen entgegenzustellen, muss ein Umstieg auf andere Energiequellen erfolgen. Die Nutzung von Biomasse zur Erzeugung von Strom, Wärme und Biokraftstoffen spielt dabei eine zentrale Rolle für die Erreichung der europäischen und nationalen Klimaschutzziele sowie für den in der europäischen Union bis 2020 angestrebten Ausbau erneuerbarer Energie auf 25 %. Vor dem Hintergrund der globalen Anstrengungen zur Reduzierung der anthropogenen Treibhausgasemissionen hat die Nutzung von Biomasse als nachhaltige Energiequelle den entscheidenden Vorteil, dass die Energie nahezu CO<sub>2</sub>-neutral produziert werden kann, da nur das klimawirksame Kohlendioxid freigesetzt wird, das zuvor bei der Entstehung der Biomasse der Atmosphäre entnommen wurde (BMU, 2008).

Eine viel versprechende Möglichkeit bietet dabei die Biogasproduktion durch die Vergärung geeigneter Biomasse. Vor allem in viehlosen Betrieben der Ackerbauregionen ist im Zuge der aktuellen agrarpolitischen Entwicklungen (wie z.B. Zuckermarktreform) mit Umstrukturierungen zu rechnen. So kann die Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse zur Energiegewinnung eine wichtige Stellung bei der zukünftigen Ausrichtung landwirtschaftlicher Betriebe einnehmen.

Es ist festzustellen, dass Biogasanlagen für die Vergärung nachwachsender Rohstoffe in reinen Ackerbauregionen errichtet werden, da dort ausreichend Flächen zur Verfügung stehen und hohe Flächenerträge erzielt werden können. Aufgrund fehlender Tierhaltung in diesen Regionen steht für den Gärprozess innerbetrieblich kein Flüssigmist zur Verfügung. Somit fehlt dem Gärprozess die Flüssigkeit für die Verdünnung und Homogenisierung sowie deren puffernde Eigenschaft. Außerdem sind die Trockenmassegehalte im Gärsubstrat erheblich höher, was wiederum Auswirkungen auf die Rühr- und Pumpentechnik haben kann. Aufgrund erster Erfahrungen mit diesem Anlagentyp wird davon ausgegangen, dass bei Biogasanlagen, die auf den kontinuierlichen Einsatz von Flüssigmist verzichten, die biologischen Prozesse sensibler bzw. instabiler sind und somit die Anlagen schwieriger in der Handhabung sind.

## 1.2 Zielsetzung

An der beschriebenen Problematik setzen die Projektuntersuchungen an. Es sollen zwei typische NawaRo-Biogasanlagen in einer 12-monatigen Langzeituntersuchung messtechnisch und analytisch begleitet werden, um spezielle Handhabungsprobleme innerhalb eines kompletten Jahreszyklus aufzudecken.

Projektziele sind eine Zustandsbeschreibung und anschließende Optimierung von NawaRo-Biogasanlagen, dazu werden folgende Teilziele bearbeitet:

- Es werden Laborversuche und Analysen der Substrate zur Abschätzung der Potenzialreserven durchgeführt. Aus den Inputmaterialien wird das Biogaspotenzial bestimmt, aus dem Gärrest des Endlagers dagegen das Restgaspotenzial.
- Grundsätzlich soll eine Einschätzung der Prozessstabilität im Vergleich zu konventionellen Biogasanlagen mit Flüssigmistzugabe erfolgen. Für diesen Vergleich werden Laborergebnisse von entsprechenden Anlagen hinzugezogen.
- Die Wirtschaftlichkeit dieses Anlagentyps soll mit Hilfe von Langzeit-Begleituntersuchungen berücksichtigt werden.
- Als eine zusätzliche Optimierungs-Methode wird der von der DLG entwickelte Qualitätsstandard für NawaRo-Biogasanlagen hinzugezogen. Weiterhin soll die Methode des Qualitätsstandards auf ihre Eignung zur Schwachstellenanalyse geprüft werden.
- Auf dieser umfangreichen Datenbasis soll die Erarbeitung einer Schwachstellenanalyse erfolgen. Dabei werden stoffliche, biologische, technische und menschliche Aspekte berücksichtigt, so dass letztendlich eine Beratungsempfehlung für die landwirtschaftliche Praxis gegeben werden kann.

## 2 Literaturanalyse

### 2.1 Grundlagen der Biogaserzeugung

„Unter Sauerstoffabschluss entsteht aus organischer Masse im wässrigen Milieu durch die anaerobe Fermentation ein wasserdampfgesättigtes Mischgas, das so genannte Biogas. Es ist aufgrund seines Methangehaltes brennbar und damit energetisch nutzbar“ (KALTSCHMITT ET AL., 1993). Dieser Prozess ist in der Natur weit verbreitet und findet im Verdauungstrakt von Wiederkäuern, in Sümpfen, Mooren oder auf dem Grund von Ozeanen oder Seen statt. Grundsätzlich kann aus jeglichen organischen Materialien Biogas gewonnen werden (EDER UND SCHULZ, 2006).

Dieses setzt sich aus ca. 50 - 75 Vol.-% Methan ( $\text{CH}_4$ ), 25-45 Vol.-% Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), 2 - 7 Vol.-% Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ), 20-20000 ppm Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), < 2 Vol.-% Stickstoff ( $\text{N}_2$ ), < 2 Vol.-% Sauerstoff und < 1 Vol.-% Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) zusammen. Für den Biogasanlagenbetreiber ist zunächst der Methangehalt interessant, da hieraus die zu gewinnende Energie resultiert (FNR, 2006).

### 2.2 Anaerobe Vergärung

Durch die Umwandlung von Energie werden die Lebensvorgänge auf der Erde ermöglicht. Wasserstoff spielt dabei als Energiequelle eine bedeutende Rolle für alle aeroben Lebewesen. Die Strahlungsenergie der Sonne wird bei der Photosynthese in chemische Energie umgewandelt, wobei Wasser von phototrophen Organismen zu Sauerstoff und Wasserstoff gespalten wird. Wasserstoff wird dabei mit Kohlenstoff zu Glukose ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) und anderen organischen Stoffen umgesetzt.

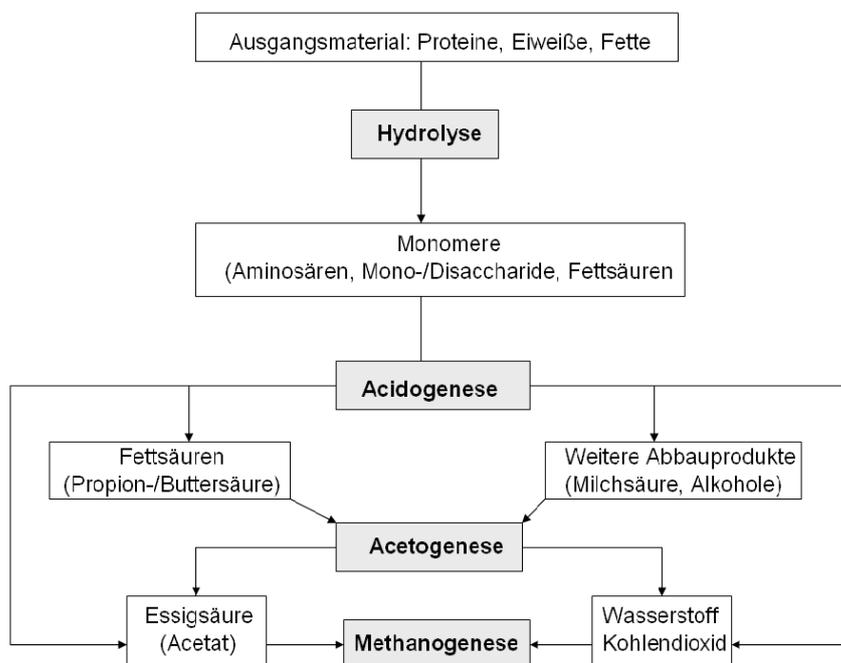
Im Gegensatz zur aeroben Atmung steht im anaeroben Milieu den Organismen kein aus der Atmosphäre gelöster Sauerstoff zur Verfügung. Anaerobier müssen den für die Zellteilung und Zellerhaltung notwendigen Energiebedarf durch Substratphosphorylierung decken. Der freiwerdende Wasserstoff wird beim Abbau organischer Verbindungen unter ATP-Bildung auf andere Verbindungen übertragen (GOSCH, 1984).

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen dem aeroben und anaeroben Abbau besteht in der Höhe des Energiegewinns, den die Organismen aus einem bestimmten Stoffwechselschritt erreichen. Beim aeroben Abbau von Glucose stehen letztendlich -1.100 kJ/mol den Organismen als *freie Energie* für die Bildung von 38 ATP zur Verfügung. Bei

der anaeroben Vergärung dagegen wird der Energiegehalt der Glucose hauptsächlich in Biogas überführt, wobei als Energiegewinn lediglich eine *freie Energie* von -58 kJ/mol verbleibt, die die Bildung von 2 ATP ermöglicht. Der anaerobe Stoffwechsel weist gegenüber dem aeroben einen sehr geringen Energiegewinn beim Umsatz eines Moles des gleichen Substrates auf, was zur Folge hat, dass anaerobe Organismen vergleichsweise langsamer wachsen. Ein ausreichender Rückhalt von anaeroben Organismen im System stellt daher die wichtigste Anforderung zur Gewährleistung eines stabilen Biogasbetriebs dar (BISCHOFBERGER ET AL., 2004).

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen verschiedenen Organismenarten. Es gibt fakultativ anaerobe und obligat anaerobe Organismen. Fakultative Anaerobier können sowohl im sauerstoffhaltigen als auch im sauerstofffreien Milieu überleben. Solange der Sauerstoffeintrag nicht zu groß ist, können diese Bakterien den Sauerstoff verbrauchen bevor die streng anaerob lebenden Bakterien geschädigt werden. Die obligaten Anaerobier sind dagegen auf einen absolut sauerstofffreien Lebensraum angewiesen. Gelöster Sauerstoff hat eine toxische Wirkung auf diese Organismen (GOSCH, 1984).

Während der anaeroben Vergärung wird der in den Substraten enthaltene Kohlenstoff zu Biogas umgesetzt. Dies geschieht in vier Abbauschritten (s. Abb. 1).



**Abbildung 1: Der vierstufige Abbauprozess der anaeroben Vergärung**

## 1. Hydrolyse

Der erste Schritt der Biogasentstehung ist die Hydrolyse. Hier werden die komplexen organischen Makromoleküle wie Kohlenhydrate, Fette und Proteine durch Exoenzyme verschiedener Bakteriengattungen in ihre Monomere (Monosaccharide, Aminosäuren, kurzkettige Fettsäuren) zerlegt (GERADI, 2003). Die an diesem Prozess beteiligten Mikroorganismen scheiden dabei Enzyme aus, die das organische Material biologisch in die organischen Bestandteile spalten (EDER UND SCHULZ, 2006).

**Tabelle 1: Stoffumsetzung in der hydrolytischen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (SCHULZ ET AL., 1982)**

Substrate	Mikroorganismen	Produkte
Kohlenhydrate	<i>Clostridium</i> spp.	Monosaccharide
Proteine	<i>Bacillus</i> spp.	Aminosäuren
Fette	<i>Pseudomonas</i> spp.	Kurzkettige Peptide Langkettige Fettsäuren Glycerin

Die Stoffgruppen der Hydrolyse lassen sich durch folgende Eigenschaften beschreiben:

- **Kohlenhydrate** (Zucker, Hemicellulose, Cellulose, Pektin, Lignin) lassen sich unterschiedlich gut aufschließen. Zucker und Hemicellulosen sind sehr gut hydrolysierbar, während die Hydrolyse von Cellulosen und Pektine deutlich langsamer abläuft (BISCHOFBERGER ET AL., 2004). Der Abbau von Lignin und Kohlenwasserstoffen kann durch eine einfache hydrolytische Spaltung nicht erfolgen. Um das persistente Lignin (10-30 % der Masse von Gefäßpflanzen) abzubauen, wird molekularer Sauerstoff benötigt (FUCHS, 2007).
- Der Abbau von **Eiweißen** ist wesentlich komplexer als bei anderen Stoffgruppen, da bis zu 20 verschiedene Aminosäuren gebildet werden. Die Hydrolyserate ist geringer als bei Kohlenhydraten und oft sogar niedriger als bei Fetten.

- Die Hydrolyse von **Fetten** verläuft langsam und kann nur erfolgen, wenn eine Oberflächenvergrößerung durch Emulgierung des Fettes stattgefunden hat, damit fettspaltende Lipasen besser angreifen können.

Wichtige Einflussfaktoren auf die Hydrolyse sind die Art des Substrates und die Partikelgröße, das Alter des Gärslamms, die Temperatur, der pH-Wert sowie die Mikroorganismenkonzentration und die Durchmischung des Fermenters. Für die optimale Hydrolyse bezogen auf Praxisanlagen bedeutet das, dass eine ausreichend lange Verweilzeit im Fermenter realisiert werden muss, eine hohe Temperatur und ein guter pH-Wert eingestellt werden müssen (BISCHOFBERGER ET AL., 2004).

Die Hydrolyse stellt aufgrund des Abbaus vieler pflanzlicher Gerüstsubstanzen wie Cellulose, Hemicellulose und Lignin den geschwindigkeitsbestimmenden Prozess dar (KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001).

## 2. Acidogenese

Die entstandenen Zwischenprodukte der Hydrolyse, mit Ausnahme der langkettigen Fettsäuren, werden in der folgenden Acidogenese (Versäuerungsphase) in weitere Bausteine zerlegt (Katabolismus). Anschließend erfolgt im Intermediärstoffwechsel (Amphibolismus) eine Umsetzung in zahlreiche organische Säuren und Phosphatester, welche der Synthese zelleigener Substanzen dienen. Der Aufbau einzelner Bausteine sowie die Synthese makromolekularer Verbindungen werden als Synthesestoffwechsel bezeichnet (Anabolismus). Dehydrogenasen sind die für die Oxidation des Substrates verantwortlichen Enzyme, die den freiwerdenden Wasserstoff überwiegend auf eines der beiden frei dissoziierbaren Coenzyme  $\text{NAD}^+$  (Nikotinamid-Adenin-Dinucleotid) bzw.  $\text{NADP}^+$  (Nikotinamid-Adenin-Dinucleotid-Phosphat) übertragen. Die Coenzyme verlassen das Dehydrogenase-Protein und geben den Wasserstoff nach Bindung an eine andere Dehydrogenase an einen H-Akzeptor ab. In dieser Form überträgt  $\text{NADH}_2$  den Wasserstoff auf Vorstufen von Gärprodukten oder auf H-Akzeptoren und regeneriert zu  $\text{NAD}$  (REHM UND HAMMAR, 2005). Die auf diesem Weg reduzierten Verbindungen werden von der Zelle ausgeschieden, wodurch es zu einer Anreicherung im Fermenter kommt. Die speziellen Gärungen werden nach ihren Ausscheidungsprodukten benannt; als Alkoholgärung, Milchsäuregärung, Propionsäuregärung und Essigsäuregärung.

Die Abbaumechanismen der einzelnen Stoffgruppen werden nachfolgend beschrieben:

- Zucker werden über den Fructose-1,6-Diphosphat-Weg (FDP-Weg) zu Brenztraubensäure (Pyruvat) abgebaut. Diese C<sub>3</sub>-Verbindung stellt eine wichtige Vorstufe für weitere Abbau-, Umwandlungs- und Syntheseprozesse dar. Die Aufspaltung von Pyruvat erfolgt in Abhängigkeit von der Bakterienart in Ameisensäure (C<sub>1</sub>), Essigsäure (C<sub>2</sub>), Äthanol, Wasserstoff und Kohlendioxid.
- Aminosäuren werden durch die Stickland-Reaktion zu Essigsäure, Ammoniak und Kohlendioxid abgebaut. Bei dieser Reaktion wird eine Aminosäure unter ATP-Bildung oxidiert, die andere Aminosäure zur Reoxidation des gebildeten NADH reduziert wird. Wasserdampf flüchtige organische Säuren wie Propionsäure (C<sub>3</sub>), Buttersäure (C<sub>4</sub>), Valeriansäure (C<sub>5</sub>) und Capronsäure stellen weitere Abbauprodukte dar.

**Tabelle 2: Stoffumsetzungen in der acidogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (SCHULZ ET AL., 1982; GRAF, 1999; OTTOW, 1997)**

Substrate	Mikroorganismen	Produkte
Monosaccharide	<i>Clostridium</i> spp.	Flüchtige Fettsäuren (Acetat, Propionat, Butyrat)
Aminosäuren	<i>Bacteroides</i> spp.	Aldehyde, Alkohole
Kurzkettige Peptide	<i>Butyrivibrio</i> spp.	Ketone, Ammoniak
Langkettige Fettsäuren		Kohlendioxid, Wasserstoff
Glycerin		

### 3. Acetogenese

In der acetogenen Phase werden die flüchtigen Fettsäuren (C<sub>3</sub>-C<sub>5</sub>) sowie die langkettigen Fettsäuren in Acetat, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O umgewandelt. Alle Fettsäuren werden nach dem Prinzip der  $\beta$ -Oxidation umgewandelt und um C<sub>2</sub>-Einheiten verkürzt (BISCHOFBERGER ET AL., 2004). Dabei werden Essigsäure und Wasserstoff freigesetzt. Durch die Reduktion von Coenzymen wird der Wasserstoff jedoch entfernt. Durch die zunehmende Konzentration des eigenen Stoffwechselproduktes Wasserstoff wird die Aktivität der obligat anaeroben Essigsäurebildner gehemmt. Nur durch eine kontinuierliche Reduzierung der Wasserstoff-

konzentration durch die Methanbakterien kann die Aktivität der Essigsäurebildner gewährleistet werden. Acetogene Mikroorganismen müssen in Symbiose mit methanogenen Mikroorganismen leben, damit die Acetogenen nicht durch den erhöhten Wasserstoffpartialdruck geschädigt werden (GREPMEIER, 2002). Um die Methanbildung nicht durch lange Diffusionswege des Wasserstoffs einzuschränken, muss der Wasserstoffübergang direkt erfolgen. Daher sollten in der Praxis erhöhte Turbulenzen und Scherkräfte im Fermenter vermieden werden, um derartige Zellverbindungen nicht zu zerstören.

Die Endprodukte dieser 3. Abbaustufe, die von den Methanbakterien verwertet werden können, sind: Essigsäure, Wasserstoff, CO<sub>2</sub>, Ameisensäure und Methanol (GOSCH, 1984). Essigsäure bildet dabei die wichtigste Grundlage zur Bildung von Methan in der nächsten Phase.

**Tabelle 3: Stoffumsetzungen in der acetogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (SCHULZ ET AL., 1982; KLEEMANN UND MELIB, 1993; WENZEL, 2002)**

Substrate	Mikroorganismen	Produkte
Flüchtige Fettsäuren (Acetat, Propionat, Butyrat)	<i>Clostridium</i> spp. <i>Eubacterium</i> spp.	Acetat Kohlendioxid Wasserstoff
Aldehyde		
Alkohole		
Ketone		

#### 4. Methanogenese

Während der Methanogenese wird aus den Abbauprodukten der Acetogenese Methan gebildet, wobei 70 % der Methanbildner acetotroph und 30 % hydrogenotroph sind. Die acetotrophen Methanbildner produzieren aus Essigsäure Methan, während die hydrogenotrophen Methanbildner Wasserstoff und Kohlenstoff verwerten (LINKE ET AL., 2003).

Die methanogenen Bakterien sind für den Biogasprozess die wichtigsten Mikroorganismen. Es handelt sich dabei um Archaeobakterien (*Methanococcus*- und *Methanobacterium*-Arten), die extreme Lebensräume der Erde seit etwas 3,5 Milliarden Jahren besiedeln

(CAMPELL, 1997). Fast alle Spezies sind in der Lage  $H_2+CO_2$  umzusetzen, aber nur wenige Organismen können Essigsäure zu Methan umwandeln (BISCHOFBERGER ET AL., 2004).

Methanbakterien sind streng anaerob und unterscheiden sich von anderen Bakterien in folgenden Punkten:

- die Zellwand enthält kein Murein
- die Cytoplasmamembran besteht aus Isoprenoidlipiden anstatt Fettsäureglycerinestern
- es sind spezielle Coenzyme enthalten wie Coenzym M und Coenzym  $F_{420}$ .

Die Einteilung der Coenzyme der Methanogenese erfolgt in zwei Klassen. Während die eine Gruppe für den Transport der  $C_1$ -Einheit vom Ausgangssubstrat ( $CO_2$ ) zum Endprodukt ( $CH_4$ ) zuständig ist, stellt die andere Gruppe die für die Reduktion von  $CO_2$  zu  $CH_4$  notwendigen Elektronen bereit.

Am ersten Schritt der Methanogenese ist das Coenzym Methanofuran beteiligt, was den fünfgliedrigen Furanring und ein Aminostickstoffatom enthält, das  $CO_2$  bindet. Das Coenzym Methanopterin ist der  $C_1$ -Carrier in den Zwischenschritten der Reduktion von  $CO_2$  und  $CH_4$ . Der letzte Schritt der Methanogenese umfasst die Umwandlung einer Methylgruppe ( $CH_3$ ) zu  $CH_4$  durch das Coenzym M.

An der Methanogenese sind nicht nur  $C_1$ -Carrier, sondern auch Redoxcoenzyme beteiligt, wobei die Coenzyme  $F_{420}$  und das Coenzym B als Elektronendonoren fungieren.

In der letzten Phase des vierstufigen Abbauprozesses erfolgt die biologische Produktion von Methan aus Kohlendioxid. Die  $CO_2$ -Reduktion lässt sich durch folgende Schritte beschreiben:

- Aktivierung von  $CO_2$  durch ein methanofuranhaltiges Enzym.
- Reduzierung von  $CO_2$  auf Formylniveau.
- Übertragung der Formylgruppe durch Methanofuran auf ein Enzym, das Methanopterin enthält.
- Dehydrierung auf Methen- und Methylniveau und Reduzierung.
- Übertragung der Methylgruppe auf ein Enzym, das CoM enthält.
- Methyl CoM wird durch das Methylreduktasesystem zu Methan reduziert, dabei entfernt das Coenzym  $F_{430}$  die  $CH_3$ -Gruppe vom  $CH_3CoM$  und bildet einen  $Ni^{2+}$ - $CH_3$ -Komplex. Anschließend reduzieren Elektronen aus CoB diesen Komplex und produzieren  $CH_4$  und einen Disulfidkomplex.

- Durch die Reduktion dieses Komplexes mit  $H_2$  werden freies CoM und CoB regeneriert. Diese Reaktion sorgt für die Energiegewinnung in der Methanogenese (MADIGAN ET AL., 2004).

**Tabelle 4: Stoffumsetzungen in der methanogenen Phase und Beispiele beteiligter Mikroorganismen (KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001; WENZEL, 2002)**

Substrate	Mikroorganismen	Produkte
Acetat	<i>Methanosarcina</i> spp.	Methan
Kohlendioxid	<i>Methanosaeta</i> spp.	Kohlendioxid
Wasserstoff	<i>Methanobacterium</i> spp.	

Das Endprodukt der anaeroben Vergärung ist ein Gasgemisch, das als Biogas bezeichnet wird. Die Gaszusammensetzung ist von diversen Parametern, wie Substratzusammensetzung und Betriebsweise abhängig, daher können Schwankungen innerhalb bestimmter Grenzen auftreten. Qualitätsunterschiede bestehen in Abhängigkeit vom Methangehalt, da der Brennwert mit der Methankonzentration steigt (GRUBER, 2007).

In einstufigen Biogasanlagen laufen die vier Schritte des anaeroben Abbaus gleichzeitig in einem Fermenter ab. Es muss daher ein Kompromiss gefunden werden, um für alle beteiligten Mikroorganismen mit unterschiedlichen Ansprüchen an den Lebensraum optimale Lebensbedingungen zu schaffen. Die Milieubedingungen im Fermenter werden normalerweise an die Methanbakterien angepasst, da diese eine langsame Wachstumsrate aufweisen und besonders empfindlich auf Prozessstörungen reagieren (FNR, 2006).

In zweistufigen Anlagen erfolgt eine Trennung der Hydrolyse und Acidogenese von der Aceto- und Methanogenese. Ziel dieser Trennung ist eine bessere Anpassung der Lebensbedingungen der verschiedenen Organismenarten, um dadurch eine höhere Abbauleistung zu bewirken. Allerdings sind an dieses Verfahren höhere Investitionen gekoppelt (WEILAND, 2001).

### 2.3 Verfahrenstechnik

Landwirtschaftliche Biogasanlagen verfolgen das Ziel, aus Wirtschaftsdüngern und nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) Energie zu gewinnen.

Weitere Vorteile der anaeroben Vergärung zur Energiegewinnung sind eine Geruchsmin-  
derung der Substrate durch den stofflichen Abbau und die verbesserte Pflanzenverfügbar-  
keit des Stickstoffs durch Umwandlung von organisch gebundenem Stickstoff in pflanzen-  
verfügbaren Ammonium-N. Dadurch ist eine gezieltere Düngung möglich. Der Anteil or-  
ganischer Säuren wird verringert und somit die pflanzenschädigende Ätzwirkung herabge-  
setzt (GRUBER, 2007). Außerdem wird eine schnellere Infiltration der flüssigen Biogasgülle  
in den Boden erzielt, wodurch eine bessere Nährstoffverwertung gewährleistet werden  
kann. Stickstoffverluste können somit deutlich reduziert werden (JUNGBLUTH ET AL.,  
2005).

Grundsätzlich können die Verfahrensschritte einer landwirtschaftlichen Biogasanlage wie  
folgt dargestellt werden:

- a) Substrathandling: Anlieferung, Lagerung, Aufbereitung, Transport, Einbringung;
- b) Biogasgewinnung;
- c) Gärrest: Lagerung, Aufbereitung, Ausbringung;
- d) Biogasspeicherung, -aufbereitung, -verwertung.

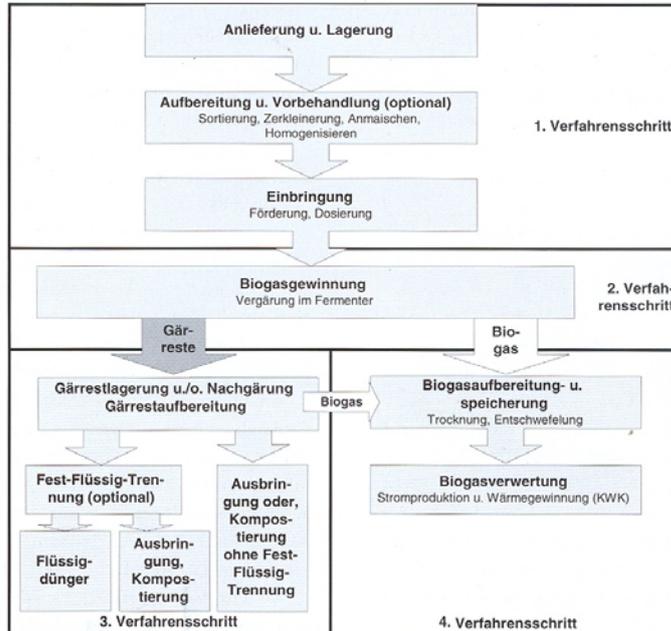


Abbildung 2: Darstellung der Verfahrensschritte bei der Biogasproduktion (FNR, 2006)

### 2.3.1 Einteilung der Verfahren zur Biogaserzeugung

Die Anlagentechnik zur Biogaserzeugung weist ein großes Spektrum auf, wobei sich die verschiedenen Verfahren nach folgenden Kriterien einteilen lassen:

Das erste Kriterium stellt die Anzahl der Prozessstufen dar. Es gibt einstufige, zweistufige oder mehrstufige Prozesse. In der landwirtschaftlichen Praxis überwiegen jedoch die einstufigen Verfahren. Hier findet keine Trennung der Vergärungsphasen statt, während bei zweistufigen Anlagen eine räumliche Trennung der Abbauphasen auf verschiedene Behälter erfolgt. Weiterhin kann zwischen unterschiedlichen Prozesstemperaturen unterschieden werden. Es gibt psychrophile, mesophile und thermophile Temperaturbereiche. Diese werden im Kapitel 2.4.1 näher erläutert.

Die Art der Beschickung ist ein weiteres Unterscheidungsmerkmal. Die Verfügbarkeit an frischem Substrat für die Mikroorganismen wird überwiegend durch die Art der Einbringung bestimmt und hat damit einen großen Einfluss auf die Biogasproduktion. Es kann eine Einteilung in diskontinuierliche und kontinuierliche Verfahren vorgenommen werden. Der diskontinuierlichen Beschickung kommt bei der Trockenfermentation eine besondere Bedeutung zu, während hier zwischen Batchverfahren und Wechselbehälterverfahren unterschieden wird. Bei der kontinuierlichen Beschickung finden Durchfluss- oder Speicherverfahren Anwendung. Vorteilhaft ist eine Beschickung in kleinen Mengen mehrmals am Tag.

In der Praxis ist das Durchflussverfahren bei kontinuierlicher Beschickung die übliche Arbeitsweise (FNR, 2006).

Entsprechend dem Trockensubstanzgehalt im Fermenter können die Verfahren zur Biogasproduktion in Nass- und Trockenvergärungsanlagen unterteilt werden (BISCHOFBERGER ET AL., 2004). In Nassvergärungsanlagen liegt eine pumpfähige Mischung aus Substrat und Gärrest oder Prozesswasser vor, wobei der Trockenmassegehalt im Fermenter von 15 % nicht überschritten werden sollte, um die Pump- und Rührfähigkeit nicht einzuschränken (KTBL, 2007). Das Konzept der Nassvergärung ist am weitesten verbreitet. Bei der Trockenfermentation können schüttfähige oder stapelbare Substanzen mit einem Trockensubstanzgehalt bis zu 35 % verarbeitet werden.

### 2.3.2 Rührwerkstechnik

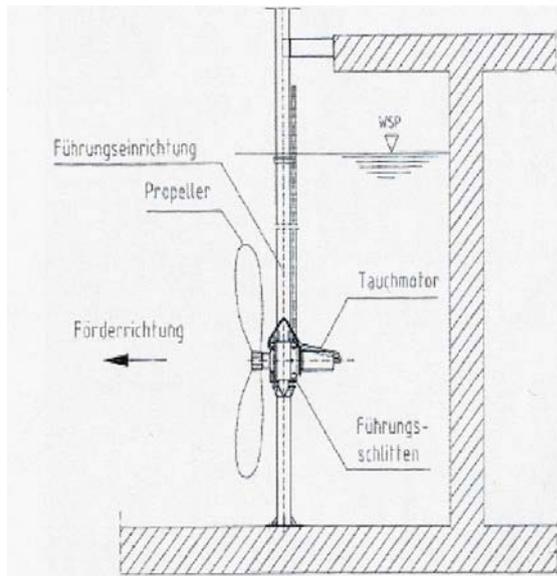
Ein wesentlicher Aspekt bei der Verfahrenstechnik zur Biogaserzeugung stellt der Einsatz von Rühraggregaten dar. Für einen optimalen Vergärungsprozess muss eine vollständige Durchmischung des Gärsubstrates gewährleistet werden. Ein Ausfall der Durchmischung kann in kürzester Zeit eine Schwimmschichtenbildung hervorrufen und damit die Methanproduktion einschränken. Die Wahl einer bestimmten Rührwerkstechnik sowie die Einstellung von Ruhe- und Betriebsintervallen erfolgt anlagenindividuell (KARIM ET AL., 2005) und sind abhängig von der Art der eingesetzten Substrate (BURTON UND TURNER, 2003). Allerdings spielt auch das Durchmesser-Höhen-Verhältnis des Fermenters eine wichtige Rolle. Die Dimensionierung sollte so gewählt werden, dass der Behälterinhalt in allen Zonen erfasst und gleichmäßig verteilt wird. Die Anordnung der Rührwerke sollte bei stark zu Sinkschichten bildenden Substraten im unteren Fermenterbereich erfolgen, bei Schwimmschichtenbildung ist das Rührwerk im oberen Bereich anzubringen.

Die Rührwerkstechnik bewirkt das Vermischen des frischen Substrates mit dem faulenden, um eine Animpfung mit aktiven Bakterien zu erzielen. Weiterhin soll eine gleichmäßige Fermentertemperatur durch das Durchmischen gewährleistet werden. Schwimm- und Sinkschichten sollen zerstört werden. Der Stoffwechsel der Bakterien wird durch das Austreiben der Biogasblasen und Heranführen frischer Substrate verbessert (HENNING ET AL., 2006)

#### Einteilung der Rührwerkstypen:

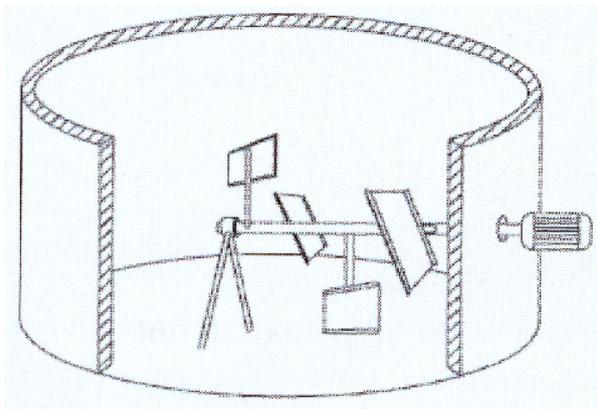
Grundsätzlich kann zwischen mechanischen und hydraulischen Rührwerken unterschieden werden. Zu den mechanischen Rühraggregaten zählen die Haspel-, Paddel- und Propeller-rührwerke. Eine Zusatzeinteilung kann in Langsam- und Schnellläufer vorgenommen werden (EDER UND SCHULZ, 2006).

Tauchmotorrührwerke kommen häufig in stehenden Fermentern zum Einsatz, wobei der Antrieb durch getriebelose Elektromotoren erfolgt. Sie werden komplett in das Substrat eingetaucht und lassen sich meist in ihrer Höhe und Neigung verstellen, allerdings weisen sie auch einen hohen Energieverbrauch auf.



**Abbildung 3: Tauchmotorrührwerk (KTBL, 2007)**

Langsam laufende Paddel-, Haspel-, schräge Langachs- oder Zentralrührwerke haben einen niedrigeren Energieverbrauch. Der Motor dieser Rührwerke liegt außerhalb des Fermenters, wodurch Wartungsarbeiten einfach durchzuführen sind.



**Abbildung 4: Paddelrührwerk (KTBL, 2007)**

Paddel- oder Haspelrührwerke werden bauartbedingt häufig in liegenden Fermentern eingebaut, die nach dem Pfropfenstromprinzip arbeiten. Die Durchmischung wird durch Paddel auf der horizontalen Rührachse realisiert (FNR, 2006). Hydraulische und pneumatische Rührwerke erreichen nicht die Leistung wie Mechanische und werden höchsten in Kombination zu diesen eingesetzt (GRUBER, 2007). Bei der pneumatischen Durchmischung wird Biogas über den Fermenterboden eingeblasen und bewirkt eine vertikale Bewegung des Gärsubstrates durch das Aufsteigen von Gasblasen. Die hydraulische Durchmischung be-

ruht auf dem Prinzip des Absaugens und Einleitens von Gärsubstrat, wodurch der Fermenterinhalt vollständig durchmischt werden soll.

### 2.3.3 Pumpen und Substratleitungen

In jeder Biogasanlage müssen Substrate in flüssiger oder pastöser Form dem Fermenter zugeführt werden; der Gärrest wird anschließend zum Nachgärer und Endlager transportiert. Oftmals sind in vielen Biogasanlagen zusätzliche Rücklaufvolumenströme erforderlich. All diese Transportaufgaben sind von entsprechenden Pumpen und Rohrleitungen zu erfüllen (KTBL, 2009).

Der Einsatz von Pumpen zum Substrattransport in der Biogastechnologie gleicht denen, die in der Gülletechnik Anwendung finden. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch in der Antriebstechnik, da dieser Pumpentyp ausschließlich von fest installierten Elektromotoren betrieben wird. Da es trotz ausführlicher Planung zu Verstopfungen kommen kann, muss die Pumpe gut zugänglich eingebaut und leicht zu öffnen sein, damit die Möglichkeit einer schnellen Beseitigung der Problematik gewährleistet werden kann. Weiterhin sind bewegliche Teile der Pumpen grundsätzlich als Verschleißteile einzustufen, die gelegentlich ausgetauscht werden müssen. Eine regelmäßige Kontrolle und Wartung der Bauteile sollte gegeben sein, ohne dass ein Betriebsausfall der Biogasanlage stattfindet.

Unter Betrachtung der spezifischen Eigenschaften können grundsätzlich Kreiselpumpen oder Verdrängerpumpen in der Praxis eingesetzt werden (s. Tab. 5).

**Tabelle 5: Vergleich der Pumpenbauarten**

Typ	Kreiselpumpe	Verdrängerpumpe
Bauweise	Tauchkreiselpumpe Kreiseltauchpumpe	Exzentrerschneckenpumpe Drehkolbenpumpe
Eigenschaft	Hohe Förderleistung, geringer Druck, nicht grundsätzlich selbstansaugend	Dosierbar, selbstansaugend, konstanter Druck, auch für dickflüssige Materialien geeignet

Kreiselpumpen sind mit oder ohne Schneidwerk aus der Gülletechnik bekannt und werden vorzugsweise für den Transport einer größeren Menge eines eher dünnflüssigen Materials mit einem Trockensubstanzgehalt unter 10 % eingesetzt. Die Leistungsaufnahme beträgt zwischen 3 und 15 kW und die Förderleistung liegt bei 2 - 6 m<sup>3</sup>/min. Das Ansaugen von Fördermedien ist eine Schwachstelle der Kreiselpumpe, daher sollte sie so angeordnet werden, dass sie nicht frei saugen muss (BIOGASHANDBUCH BAYERN, 2007; KTBL, 2009).

Zu den Verdrängerpumpen zählen die Exzentrerschnecken- und Drehkolbenpumpe, welche sich für den Einsatz bei dickflüssigem Material eignen. Exzentrerschneckenpumpen saugen aus einer Tiefe von bis zu 8,5 m selbst an, wobei sie einen Druck von bis zu 24 bar erzeugen. Bei langfaserigen Bestandteilen besteht eine Verstopfungsanfälligkeit. Im Vergleich zu den Kreiselpumpen ist die Förderleistung geringer.

Drehkolbenpumpen erreichen bei Drücken von 2 - 10 bar und Leistungsaufnahmen von 7,5 bis 55 kW eine Fördermenge von 0,5 - 4 m<sup>3</sup>/min. Sie sind wesentlich unempfindlicher gegenüber langfaserigen Materialien im Fördermedium. Daher wird dieser Pumpentyp häufig bei Biogasanlagen eingesetzt, wenn die Inputmaterialien aus Maissilage, Grassilage oder Festmist bestehen. Die hohe Förderleistung bewirkt, dass in kurzer Zeit große Mengen an frischem Substrat in den Fermenter gelangen, was sich wiederum nachteilig auf den Biogasprozess auswirken kann, indem eine Temperaturabsenkung und kurzzeitige Stoßbelastung für die Mikroorganismen hervorgerufen wird. Die Befüllintervalle und Pumpenlaufzeit sind daher kurz zu wählen. Alternativ bietet sich der Einsatz einer drezahlregelbaren Verdrängerpumpe oder einer langsamlaufenden Exzentrerschneckenpumpe (BIOGASHANDBUCH BAYERN, 2007).

Insbesondere bei der Verwendung von Kofermenten sind Verdrängerpumpen vorteilhaft. Die geförderte Menge kann über die Zahl der Umdrehungen ermittelt werden, was eine sehr genaue Dosierung ermöglicht und eine stabilere Prozesssteuerung bewirkt.

Bei den Substratleitungen wird zwischen Druckleitungen und drucklosen Leitungen unterschieden. Erstere weisen einen Druck größer dem atmosphärischen Druck auf und sie befinden sich meist in dem Bereich vor oder nach einer Pumpe, was eine druckbeständige Materialwahl erfordert. Um Druckverluste zu minimieren und Verstopfungen zu vermeiden, sollte der Rohrdurchmesser mindestens 100 bis 125 mm betragen, für längere Strecken eher 150 mm. Eine zu große Nennweite der Rohre verringert jedoch die Fließgeschwindigkeit und ermöglicht eine Sedimentation im Rohr, welches sich dadurch verengt und der

Rohrdurchschnitt verkleinert wird. Drucklose Leitungen sollten eine Nennweite von mindestens 200 - 300 mm haben. Die Rohrweite sollte also dem zu transportierenden Material angepasst werden und ein leichtes Gefälle zum nächsten Behälter von ca. 2 % aufweisen (BIOGASHANDBUCH BAYERN, 2007; KTBL, 2009).

#### **2.3.4 Verstromung**

Das entstandene Biogas wird selten direkt verstromt, sondern in der Regel erst in Gasspeichern zwischengelagert. Voluminöse Gasspeicher sind hierbei von Vorteil, da so anfallende Reparaturarbeiten oder Wartungsarbeiten am Blockheizkraftwerk überbrückt werden können, ohne dass das Biogas ungenutzt vernichtet werden muss.

Von dem Gasspeicher aus gelangt das Biogas zur Energieumwandlung in ein Blockheizkraftwerk (BHKW), in diesem wird es durch Verbrennung in einem Motor in mechanische und thermische Energie umgewandelt. Die mechanische Energie wird anschließend über einen Generator in elektrische Energie verwandelt. Dieses Prinzip der gleichzeitigen Erzeugung von Kraft (bzw. Strom) und Wärme wird als Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bezeichnet. Hierzu werden überwiegend Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Verbrennungsmotoren verwendet, die mit einem Generator gekoppelt sind. Der produzierte Strom kann nun nach den Vergütungssätzen des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) 2009 in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden, während die anfallende Wärme aus der Kühlung und dem Abgas des BHKW-Motors einer sinnvollen Wärmeverwendung zur Verfügung gestellt werden kann (FNR, 2006). Wie viel Strom und Wärme aus Biogas erzeugt werden kann, hängt hauptsächlich von der Größe und der Bauart des verwendeten Blockheizkraftwerks ab. Die elektrische Anschlussleistung des BHKW gibt die Leistung der gesamten Biogasanlage an. Der Gesamtwirkungsgrad eines BHKW liegt dabei zwischen 80 und 90 Prozent. Das bedeutet, dass zwischen 80 und 90 Prozent der eingesetzten Energie aus dem Biogas in Wärme und Strom umgesetzt werden. Der elektrische Wirkungsgrad liegt je nach Leistung und Bauart zwischen 30 und 45 Prozent. Bei der Energieumwandlung fallen also grob gerechnet ca. 40 % der Energie in Form von Elektroenergie und ca. 50 - 60 % als Wärme an.

Grundsätzlich wird zwischen Gas-Otto-Motoren und Zündstrahlmotoren unterschieden. Erstere sind speziell für die Verwertung von Gasen konstruiert und weisen eine Standzeit von ca. 60.000 Betriebsstunden auf. Der Leistungsbereich liegt bei bis zu 2 MW<sub>el</sub>, der

elektrische Wirkungsgrad bei 30-41 %, der thermische Wirkungsgrad bei 34 - 56 %. Ein Mindestmethangehalt von 45 % wird empfohlen. Zündstrahlmotoren haben eine kürzere Standzeit von nur ca. 35.000 Stunden und werden in einem Leistungsbereich von bis zu 540 kW<sub>el</sub> eingesetzt. Im unteren Leistungsbereich ist der elektrische Wirkungsgrad höher im Vergleich zu Gas-Otto-Motoren, dieser liegt bei 35-45 %, der thermische Wirkungsgrad bei 40-43 %. Nachteilig ist der Einsatz eines zusätzlichen Brennstoffes und beim Schadstoffausstoß werden die TA-Luft-Grenzwerte oft nicht eingehalten. Durch das zugesetzte Zündöl wird ein Mindestmethangehalt nicht benötigt (KTBL, 2007).

### 2.3.5 Abwärmenutzung

Um eine Biogasanlage wirtschaftlich zu betreiben, wird es aus ökonomischen Gründen immer wichtiger, neben der elektrischen Energie auch die thermische Energie vollständig zu nutzen. So kann beispielsweise Energie zur Beheizung eines landwirtschaftlichen Betriebes substituiert und gleichzeitig überzählige Wärmeenergie anderweitig verwendet oder an geeignete Verbraucher verkauft werden.

Für viele Arten von Wärmenutzung ist ein Nahwärmenetz erforderlich. Dazu werden wärmeisolierte Rohre im Erdboden verlegt und das erwärmte Wasser mittels einer Pumpe zu den jeweiligen Abnehmern verteilt bzw. auf die Heizkreise übertragen. Unberücksichtigt bleibt aber häufig, dass gerade bei größeren Biogasanlagen weitaus mehr thermische Energie zur Verfügung steht als für die Beheizung von Ställen und Wohngebäuden benötigt wird. Speziell in den Sommermonaten wird kaum Wärmeenergie gebraucht, dieses Potential bleibt häufig ungenutzt. Eine weitere Alternative bietet der Verkauf der thermischen Energie an andere Verbraucher. Hier ist der Standort der Biogasanlage von entscheidender Bedeutung. Da eine Biogasanlage in der Regel nicht in der Nähe von Wohngebieten oder Gewerbeflächen errichtet wird, stellt sich die meist große Entfernung zu möglichen Wärmeabnehmern häufig als nicht mehr interessante Alternative heraus. Aufgrund der immensen Kosten für die Verlegung und Genehmigung von Fernwärmeleitungen kommt es eher selten vor, dass ein Fernwärmenetz zur nächsten Ortschaft oder zu anderen Abnehmern gebaut wird, so dass das Potential der überschüssigen Wärmeenergie oft ungenutzt bleibt (EDER UND SCHULZ, 2006).

Um die Möglichkeiten der Abwärmenutzung einer Biogasanlage genau zu planen, ist es zunächst erforderlich zu wissen, wie viel Abwärme anfällt bzw. nutzbar gemacht werden

kann. Wichtig ist dabei zu beachten, dass ein Teil der Wärmemenge für die Prozesswärme im Fermenter benötigt wird und deshalb von der gesamten Wärmemenge abgezogen werden muss. Wie groß dieser Anteil ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen muss das Gärsubstrat zum Beispiel durch innen liegende Fermenterheizungsrohre auf ein Temperaturniveau zwischen 35°C und 40°C aufgeheizt und auch gehalten werden. Da mehrmals täglich neues Substrat eingespeist und altes entnommen wird, ist eine ständige Aufheizung des Substrats notwendig. Zum anderen spielen die bauphysikalischen Eigenschaften des Fermenters hinsichtlich der Wärmedämmung eine große Rolle. Diese Wärmeverluste werden auch als Transmissionsverluste bezeichnet und ergeben sich aus dem Wandaufbau des Fermenters. Aus diesem Grund ist eine ausreichende Wärmedämmung der Dach-, Boden- und Wandflächen enorm wichtig. Nicht zu unterschätzen ist zudem der sich verändernde Wärmebedarf bei unterschiedlichen Außentemperaturen. So wird im Sommer weit weniger Energie zur Aufrechterhaltung der optimalen Fermentertemperatur benötigt als im Winter. Wegen der vielen schwankenden Einflussgrößen wird nach Literaturangaben insgesamt von einem Prozesswärmebedarf für den Fermenter zwischen 10 bis 30 % der erzeugten Wärmeenergie ausgegangen. Während bei guter Dämmung der Verbrauch über das ganze Jahr relativ gleich bleibt und bei unter 20 % liegt, steigt der Verbrauch bei wenig gedämmten Anlagen im Winter wesentlich an und kann bis zu 30 % der Jahresleistung des BHKW betragen.

### **Wärmeauskopplung am Blockheizkraftwerk (BHKW)**

Im Verbrennungsmotor entsteht Abwärme, welche an Kühlwasser, Schmieröl und Abgas sowie über Wärmetauscher an das Heizungswasser abgegeben wird. Weiterhin können die Wärmestrahlung des Motors und die Generatorabwärme als Wärmequelle genutzt werden. Die Temperaturen des Kühlwassers und Schmieröls betragen etwa 80 bis 90°C, während die Abgastemperaturen in dem Bereich von 400 bis 600°C liegen (SUTTOR, 2006).

Vor der Planung eines Wärmenutzungskonzeptes sind die Informationen über die Besonderheiten der eingesetzten BHKW Technik von besonderer Bedeutung. Das gilt vor allem für die hydraulischen Verhältnisse im Wärmeverteilungssystem und im Mess- und Regelsystem. Ferner sind die Vorschriften und technischen Daten der BHKW-Hersteller zu beachten. Das gilt für die Temperaturen, Volumenströme, Drücke ebenso wie für die Qualität des eingesetzten Speisewassers in den Kreisläufen.

Im folgenden Abschnitt werden einige verfahrenstechnische Möglichkeiten der Abwärmenutzung bei Biogasanlagen vorgestellt. Im Mittelpunkt steht dabei vor allem die technische, praxisnahe und wirtschaftliche Realisierbarkeit.

### **Trocknung land- und forstwirtschaftlicher Güter**

Die Trocknung von land- und forstwirtschaftlichen Produkten durch Biogasabwärme kann dazu dienen, diese zu konservieren und damit die Marktfähigkeit und den Verkaufswert eines Produktes zu erhöhen. Durch die Absicherung der Qualität und Lagerfähigkeit sowie Haltbarkeit land- und forstwirtschaftlicher Produkte durch eine technische Trocknung mittels erwärmter Luft lassen sich marktfähige Produkte erzeugen. Die alternativ mögliche natürliche Trocknung dagegen ist sehr von der Witterung abhängig und kann zu erheblichen Verlusten bzw. Risiken führen. Grundsätzlich sind für eine technische Trocknung Produkte wie Grüngut (Gräser und Leguminosen), Getreide, Kräuter, Energieholz (Holzhackschnitzel, Holzpellets, Scheitholz), Schnittholz und Grünschnitt aus Landschaftspflegeholz interessant. Zu beachten ist aber, dass einige der in Frage kommenden Produkte nur in kurzen Zeiträumen anfallen und unverzüglich getrocknet werden müssen.

Für die Trocknung können unterschiedliche Anlagen eingesetzt werden. Es gibt kostengünstige Satzrockner, vielseitige Band- und Schubwendetrockner, Trommelrockner sowie Kammertrockner. Alle Trockner werden dabei mit erwärmter Luft betrieben. Als Wärmequellen kann der Heizwasserkreislauf oder das Abgas des BHKW genutzt werden.

### **Getreidetrocknung**

Die Trocknung von Getreide kann für landwirtschaftliche Betriebe eine geeignete, wenn auch zeitlich begrenzte Nutzung der Biogasabwärme sein. Immerhin muss ca. 50 % des jährlich in Deutschland geernteten Getreides technisch getrocknet werden, da es die für eine dauerhafte Lagerung erforderliche Feuchte von < 14 % bis zur Ernte nicht erreicht hat. Nachteilig ist jedoch, dass die Getreidetrocknung nur während der Ernteperiode stattfindet, sodass lediglich mit einer Auslastung der Abwärmenutzung von maximal 4 bis 6 Wochen im Jahr gerechnet werden kann. Diese Option der Nutzung der Biogasabwärme ist nur eine sinnvolle Lösung, wenn noch zusätzlich andere Möglichkeiten der Abwärmenutzung vorhanden sind.

Von den technischen Ausführungen her sind die Getreidetrockner sehr variantenreich und reichen von kleinen, einfachen Satzrocknern über verschiedene Arten von Umlaufrocknern bis hin zu verschiedenen Durchlaufrocknern.

Bei Satzrocknern bzw. auch Wagentrocknern wird das Getreide beispielsweise mittels eines Gebläses mit erwärmter Luft durchströmt. Die erhitzte Luft wird üblicherweise durch Öl oder Gas erzeugt. Wird der Brenner durch einen Wärmetauscher ersetzt, können fossile Energieträger durch die Nutzung der BHKW-Abwärme substituiert werden. Die erforderlichen Trocknungstemperaturen richten sich nach der späteren Verwendung des Getreides.

### **Energieholz Trocknung**

Die Trocknung von Energieholz mit Abwärme aus Biogasanlagen ist eine weitere interessante und nahe liegende Option der Abwärmenutzung. Aufgrund steigender fossiler Energiepreise und seiner günstigen CO<sub>2</sub>-Bilanz, stellt das Heizen mit Holz einen immer wachsenden Zukunftsmarkt dar. Gleichzeitig erfolgt die Bereitstellung von Energieholz oftmals landwirtschaftsnah, da Land- und Forstwirtschaft häufig räumlich und strukturell miteinander verknüpft sind (BIOGAS JOURNAL, 2009).

Bei der Energieholztrocknung geht es hauptsächlich um die Verdunstung des freien Wassers aus dem Holzkörper. Frisches Holz hat beispielsweise einen Wassergehalt von über 50 %, frisches Pappelholz sogar von 65 %. Erst ab Wassergehalten < 25 % ist Holz dauerhaft lagerungsfähig, da erst dann die biologischen Zersetzungsprozesse durch Bakterien und Pilze zum Erliegen kommen. Wie Abbildung 5 zeigt ist der Heizwert des Holzes stark vom Wassergehalt des Brennstoffes abhängig. Je mehr Wasser im Brennstoff enthalten ist, desto geringer wird sein Heizwert, da während des Verbrennungsvorgangs Wasser unter Energieaufwand verdampf werden muss (WITTKOPF, 2005).

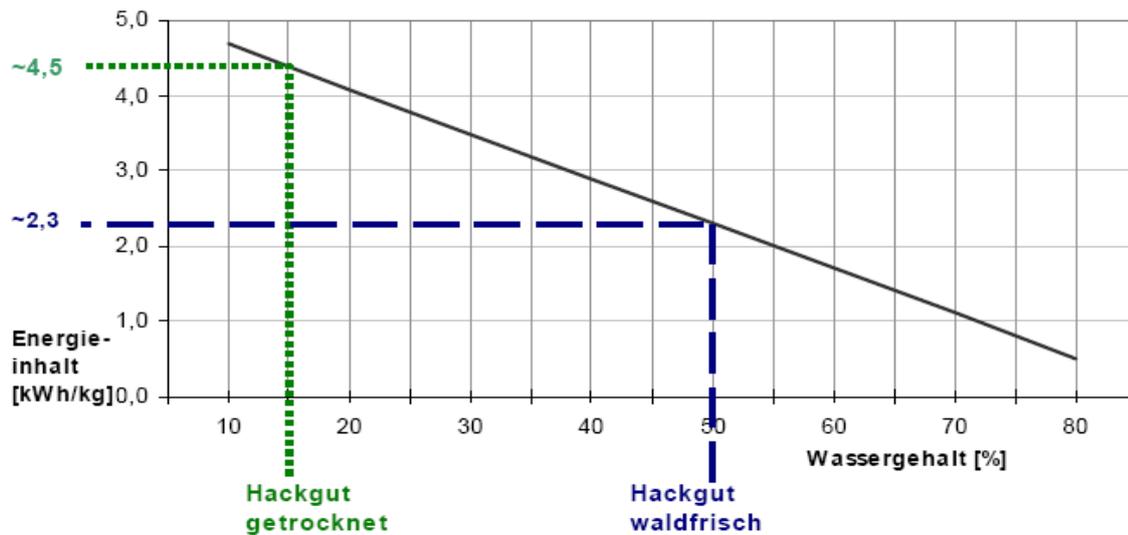


Abbildung 5: Unterschiedliche Energiegehalte von Nadelholz- Hackgut getrocknet und Nadelholz- Hackgut waldfresh (ARGRE KOMPOST UND BIOGAS, 2008)

### Gärrestetrocknung

Eine weitere Möglichkeit der Abwärmenutzung von Biogasanlagen ist die Trocknung von Gärresten zur Erhöhung der Transportwürdigkeit des Produktes. Gerade bei größeren Biogasanlagen oder in Regionen mit hohem Überschuss an Nährstoffen ist eine hofnahe Ausbringung der Gärrückstände oft nur eingeschränkt möglich. In manchen Fällen ist deshalb eine Separierung der Gärreste sinnvoll. Die Durchsatzleistung des kontinuierlich laufenden Trockners hängt unter anderem vom Inputmaterial, dem angestrebten Trocknungsziel und der zur Verfügung stehenden Wärme ab. Zur Erzielung eines optimalen Trocknungsergebnisses muss das dem Trockner zugeführte Gut tropffrei sein.

Bei weiterer Entwicklung kann die Gärrestetrocknung unter Umständen in den nächsten Jahren dazu beitragen, die Kosten der Ausbringung zu reduzieren, indem die Transport- und Lagerkosten bei der Gärrestverwertung vermindert werden. Aufgrund der damit erreichten Massenreduzierung könnte im Vergleich zur Ausbringung von unbehandelten Gärresten insbesondere bei Ausbringungsflächen in größeren Entfernungen eine deutliche Kostensenkung erreicht werden (BREMER ENERGIE INSTITUT, 2007). Zudem ist diese Form der Prozesswärmenutzung des BHKW auf der Positivliste des Anhang 4 des neuen EEG vermerkt und deshalb KWK-Bonus berechtigt (BUNDESGESETZBLATT, 2008, Anlage 4). Dies gilt allerdings nur, wenn die Gärreste zur Düngemittelherstellung dienen. Es besteht

also die Gefahr, dass Landwirte weit reichende Voraussetzungen schaffen müssen, um als Düngemittelhersteller eingestuft werden zu können.

### **Beheizung von Gebäudekomplexen**

Eine weitere Option der Abwärmenutzung von Biogasanlagen ist die Wärmeversorgung von Gebäudekomplexen.

Die Beheizung der Ferkelaufzucht eines landwirtschaftlichen Betriebs ist eine weitere, häufig genutzte Form der Abwärmenutzung bei Biogasanlagen. Nicht umsonst gilt dieser Bereich auch als einer der größten Energieverbraucher in einem Ferkelerzeugerbetrieb. Speziell in den Bereichen der Ferkelproduktion und Ferkelaufzucht gilt es, den unterschiedlichen Temperaturansprüchen der Tiere in Abhängigkeit ihres Alters gerecht zu werden. In der Regel benötigt man pro Platz in der Ferkelaufzucht 170 bis 190 Kilowattstunden (kWh) Wärme pro Jahr. Dies entspricht etwa 24 kWh pro Ferkel. Um den Wärmebedarf zu decken, ist eine Heizleistung von 60 bis 80 Watt pro Ferkel zu installieren. Der exakte Bedarf sollte aber für jeden Stall individuell berechnet werden (KTBL, 2007).

### **Kälteerzeugung aus Abwärme**

Wärme aus Biogasanlagen kann nicht nur zu Heizzwecken verwendet werden, es besteht auch die Möglichkeit aus Wärme Kälte zu erzeugen. Dieser Prozess wird auch als Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) bezeichnet. Üblicherweise geschieht dies mittels Kompressionskältemaschinen, bei denen der Verdichter des Kältemittels über einen Elektromotor angetrieben wird. Bei der so genannten Absorptionskältemaschine wird dagegen thermische Energie (Wärme) anstatt Strom zur Kälteerzeugung verwendet.

## 2.4 Einflussfaktoren und Prozessparameter

Der Biogasprozess ist von vielen chemischen und physikalischen Faktoren beeinflusst. Nachfolgend werden die wichtigsten Prozessparameter beschrieben.

### 2.4.1 Temperatur

Die Temperatur spielt eine besonders wichtige Rolle bei der anaeroben Vergärung. Für die am Abbauprozess beteiligten Bakterien existieren unterschiedliche Temperaturoptima.

Im psychrophilen Temperaturbereich ( $< 25^{\circ}\text{C}$ ) gedeihen kältefreundliche Bakterien. Der Wärmebedarf ist zwar gering, aber ebenso sind die Abbauleistung und Gasausbeute geringer (HAUER, 1993). Die Prozessstabilität ist wiederum besonders hoch (TRÖSCH UND WEILAND, 1998). In der landwirtschaftlichen Praxis findet eine Biogaserzeugung in diesem Temperaturbereich keine Anwendung (KTBL, 2007).

In Deutschland werden die meisten landwirtschaftlichen Biogasanlagen (ca. 85 %) bei mesophilen Temperaturbedingungen von  $32 - 42^{\circ}\text{C}$  betrieben (KTBL, 2007). In der Regel tolerieren die Mikroorganismen Temperaturschwankungen von  $3 - 4^{\circ}\text{C}$  (DISSEMOND ET AL., 1993). In diesem Temperaturbereich werden eine relativ hohe Gasausbeute sowie eine gute Prozessstabilität gewährleistet. Ein weiterer Vorteil ist der niedrige Bedarf an Prozessenergie zur Aufrechterhaltung der Temperatur im Behälter.

Die thermophile Vergärung bietet sich an, wenn durch Hygienisierung des Substrates gesundheitsschädliche Keime abgetötet werden sollen (MÜLLER, 1998) oder Substrate eingesetzt werden sollen, die mit hoher Eigentemperatur anfallen wie z.B. Prozesswasser. Die Prozesstemperatur liegt bei diesem Verfahren zwischen  $50 - 57^{\circ}\text{C}$ . Eine höhere Gasausbeute wird erreicht und es besteht ein geringerer Bedarf an Faulraum. Nachteilig ist in diesem Temperaturbereich, dass mehr Energie für das Aufheizen des Gärprozesses benötigt wird. Außerdem ist der Gärprozess empfindlicher gegenüber Störungen durch Hemmstoffe, Unregelmäßigkeiten in der Substratzufuhr oder der Betriebsweise des Fermenters.

Zwischen ca.  $40$  und  $50^{\circ}\text{C}$  besteht eine Hemmung der Methanbakterien. Dieser Bereich stellt den Übergang zwischen dem mesophilen und thermophilen Temperaturbereich dar (GERADI, 2003).

### 2.4.2 pH-Wert

Der pH-Wert einer Lösung ist definiert als der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoff-Ionenkonzentration und dient zur Angabe der Wasserstoff- oder Hydroxid-Ionenkonzentration in wässriger Lösung und zur Kennzeichnung der basischen oder sauren Verhältnisse.

Ähnlich wie bei den Temperaturverhältnissen gibt es auch beim pH-Wert unterschiedliche Optima für die verschiedenen Bakterienarten. Hydrolysierende und säurebildende Bakterien bevorzugen einen pH-Wert zwischen 4,5 und 6,3 (WELLINGER, 1991), während essigsäure- und methanbildende Bakterien einen pH-Wert im neutralen Bereich von 6,8 und 8,0 benötigen (BRAUN, 1982). Sollte der pH-Wert hiervon stark abweichen, kann dies Auswirkungen auf die Gasausbeute und Gaszusammensetzung haben, wobei sich der CO<sub>2</sub>-Anteil erhöhen kann (KOSTER, 1989; HAUER, 1993).

Der Abbau eines proteinhaltigen Substrates führt zur Bildung von Ammonium, welches eine Lauge darstellt und somit den Anstieg des pH-Wertes auslösen kann (GREPMEIER, 2002).

Liegen die Carbonsäuren im Überschuss vor, können sie nicht weiter zu Methan umgesetzt werden und reichern sich im Fermenter an. Dadurch sinkt der pH-Wert.

Bei einem stabilen Prozess stehen die Säureproduktion durch Säurebildner und der Abbau durch die Methanbildner im Gleichgewicht. Der pH-Wert bleibt aufgrund des freigesetzten Kohlendioxids im neutralen Bereich (KALTSCHMITT, 2001).

### 2.4.3 Organische Säuren und Pufferkapazität

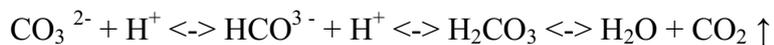
Aus dem anaeroben Substratabbau gehen vor allem die niedermolekularen organischen Säuren als wichtige Zwischenprodukte hervor, da sie die metabolische Vorstufe zu CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> bilden. Die häufigsten Fettsäuren sind Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Valeriansäure.

Durch eine zu hohe Belastung der Bakterien durch Substratüberfütterung oder häufigen Wechsel der Inputsubstrate kann es zu einer Ansammlung der Essigsäure kommen. In Abhängigkeit davon sinkt der Methangehalt (BRANDAU, 2002).

Grundvoraussetzung für eine konstante Biogasproduktion ist das Gleichgewicht zwischen Säureproduktion und Säureverbrauch. Wird Essigsäure aufgrund einer Hemmung nicht

mehr zu CH<sub>4</sub> abgebaut, reichert sie sich im Fermenter an. Die dadurch hervorgerufene pH-Absenkung wirkt hemmend auf den Gärprozess (HILL, 1982).

Puffersysteme verhindern ein Absinken des pH-Wertes durch Neutralisierung der H<sup>+</sup>-Ionen bei vermehrter Säureproduktion. Daher wirken sich insbesondere bei hohen Pufferkonzentrationen erst sehr hohe Säurekonzentrationen auf den pH-Wert aus (MCCARTY, 1964; GERADI, 2003). Der Hydrogencarbonat-/ Carbonatpuffer hat aufgrund seiner Konzentration und des pKs-Wertes im pH-Optimum der Methanbakterien für den Biogasprozess die größte Bedeutung. Die gebildeten organischen Säuren werden durch ihn abgepuffert (HECHT ET AL., 2007). Die Wirkung des Carbonatpuffers basiert auf den pH-abhängigen Gleichgewichtsreaktionen zwischen Carbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) und Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sowie zwischen Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) und Kohlensäure (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), wobei die Kohlensäure zu 99 % in Form von Wasser und CO<sub>2</sub> vorliegt.



Das Ammonium/Ammoniak-Puffersystem spielt für die Pufferung organischer Säuren im Fermenter nur eine untergeordnete Rolle, da der pKs dieses Systems bei einem pH von 9,25 liegt.

#### 2.4.4 Hemmstoffe

Hemmstoffe können zum einen durch die Fermentation selbst gebildet werden wie z.B. Ammoniak und Schwefelwasserstoff, welche aus Zwischenprodukten der einzelnen Abbauschritte hervorgehen. Andererseits können sie durch hemmstoffhaltige Substratchargen in den Biogasfermenter eingebracht werden, welche sich insbesondere auf Rückstände aus der tierischen Produktion beziehen.

##### Bildung von Hemmstoffen

Die Fermenterbiologie reagiert höchst empfindlich auf Hemmstoffe, welche in der Regel eher die acetogenen und methanogenen Bakterien negativ beeinflussen als die gärenden Bakterien (GUJER, 1983). Daher haben diese Hemmungen meistens einen versauernden Charakter.

Laut KASPAR (1978) tritt eine Aktivitätshemmung der acetogenen Mikroorganismen bei einem zu hohen Wasserstoff-Partialdruck ein. Dies gilt insbesondere für die Bakterien, die

Propionsäure in Essigsäure und Wasserstoff umwandeln. Der energetische Ablauf dieser Umwandlung ist bis zu einem Wasserstoff-Partialdruck von 5 - 6 Pa bei ca. 35°C vorteilhaft.

#### Eintrag von Hemmstoffen

Da die acetogenen und methanogenen Mikroorganismen auf einen strikt anaeroben Lebensraum angewiesen sind, kann der Eintrag von Sauerstoff eine toxische Wirkung auslösen. Allerdings sind im Gärsubstrat auch fakultativ anaerobe Mikroorganismen vorhanden, die geringe Sauerstoffmengen verbrauchen und somit die Methanbakterien vor einer Schädigung schützen können.

Weiterhin kann der Eintrag von Wirtschaftsdüngern problematisch sein, wenn in diesem erhöhte Konzentrationen von Desinfektionsmitteln aus der Stallhygiene, Antibiotika, Schwermetallen oder Spurenelementen enthalten sind (FNR, 2006).

### **2.4.5 Gaszusammensetzung**

Der Einsatz entsprechender Messgeräte bietet die Möglichkeit einer kontinuierlichen Gasanalyse zur Prozessüberwachung. Die Messwerte können zur Steuerung des Gärprozesses genutzt werden. In der Praxis werden üblicherweise die Gasbestandteile Methan, Schwefelwasserstoff, Kohlendioxid und Sauerstoff bestimmt. Zur Bestimmung von Methan und Kohlendioxid haben sich Infrarotsensoren etabliert, während für Schwefelwasserstoff und Sauerstoff elektrochemische Sensoren verwendet werden (FNR, 2006).

#### **Methan**

Ein besonders wichtiger Parameter bei der Gaszusammensetzung ist der Methangehalt, da daraus die zu gewinnende Energie für die Verstromung im Blockheizkraftwerk oder Gas-einspeisung resultiert. Der erreichbare Methangehalt im Biogas schwankt zwischen 50 und 75 Vol.-%. Folgende Kriterien können den Methangehalt beeinflussen (EDER UND SCHULZ, 2006):

- **Prozessführung:** Bei einstufigen Biogasanlagen fällt das gesamte Gas als Mischgas an, da der anaerobe Abbau in einer Stufe erfolgt. Bei zweistufig betriebenen Biogasanlagen kann der Methangehalt deutlich gesteigert werden, da nach der ersten

Phase die nicht nutzbaren Gase abgeführt werden, so dass in der zweiten Phase Methangehalte von bis zu 80 Vol.-% erzielt werden können.

- Substrate: Die Menge und Zusammensetzung der eingesetzten Substrate spielen eine wichtige Rolle bei der Erzeugung des Biogases. Die Energieträger für die Biogasproduktion sind Fette, Proteine und Kohlenhydrate, wobei die spezifischen Methanausbeuten in der genannten Reihenfolge abnehmen. Der Grad des Substrataufschlusses sowie der Wassergehalt beeinflussen ebenfalls den Methangehalt.

Das Biogasmess-Programm belegt, dass 84 % aller NawaRo-Anlagen Methangehalte unter 60 Vol.-% erreichen (FNR, 2005).

- Substrattemperatur: Mit steigender Temperatur im Fermenter sinkt der Methangehalt im Biogas. Dies hängt mit der unterschiedlichen Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Abhängigkeit von der Temperatur zusammen, was eine Reduzierung des CH<sub>4</sub>-Volumenanteils durch das zusätzliche CO<sub>2</sub> zur Folge hat.

Bei der Berechnung des Methanertrages muss die Gasmenge in Normgas umgerechnet werden. Das Volumen des Gases wird durch die Temperatur, den Luftdruck und den Dampfdruck des Wassers beeinflusst:

$$V_N = V_G * P_L * 0,269 / (273 + T_G).$$

$V_N$  = Normvolumen

$V_G$  = Gasvolumen [m<sup>3</sup>] \* Luftdruck [hPa]

$P_L$  = Luftdruck [hPa] – Unterdruck in der Gasregelstrecke (ca. 10-15 hPa) [hPa]

$T_G$  = Gastemperatur [°C]

### Schwefelwasserstoff

Durch den Abbau von proteinhaltigen Substraten entsteht Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) im Biogas, welches zu erheblichen Problemen bei der Gasnutzung führen kann. Bei erhöhten Schwefelgehalten kann es zu Korrosionserscheinungen an Bauteilen wie z.B. Blockheizkraftwerk oder Fermenter kommen, wenn Schwefelwasserstoff an der Luft oxidiert wird und daraus Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) entsteht. Weiterhin können eine schnellere Versäuerung des Motoröls oder eine mikrobiologische Hemmung des Abbauprozesses auf einen hohen H<sub>2</sub>S-Gehalt zurückgeführt werden. Daher ist eine Entschwefelung des Biogases aus

sowohl materialtechnischen als auch mikrobiologischen Gründen erforderlich (PESTA, 2004)

Die verschiedenen Verfahren zur Entschwefelung lassen sich in chemisch-physikalische und biologische Verfahren gliedern. Das chemische Entschwefelungsverfahren kann durch die Zugabe von Eisensalzen erfolgen. Aus physikalischer Sicht kann mit Hilfe eines Aktivkohlefilters entschwefelt werden, wodurch eine Reinigungsleistung bis unter einen ppm  $\text{H}_2\text{S}$  erzielt werden kann. Das gängige Verfahren ist die biologische Entschwefelung, wobei gezielt geringe Außenluftmengen in den Gasraum des Fermenters geleitet werden (EDER UND SCHULZ, 2006). Sauerstoff und das Bakterium *Sulfobacter oxydans* wandeln Schwefelwasserstoff in elementaren Schwefel um.

### **Kohlendioxid**

Ein Hauptbestandteil des Biogases mit einem Anteil von 25 bis 45 Vol.-% ist das Kohlendioxid, welches eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff ist. Eine Zunahme des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes kann auf einen sinkenden pH-Wert zurückgeführt werden (BRUNERT, 2007).

Die Qualität des Gases wird durch das Verhältnis von Methan zu Kohlendioxid bestimmt, da  $\text{CO}_2$  das Gas nur verdünnt und somit Kosten verursacht, besonders bei der Gasspeicherung. Aus diesem Grund ist ein hoher Methangehalt und niedriger  $\text{CO}_2$ -Gehalt anzustreben (EDER UND SCHULZ, 2006).

### **Sauerstoff**

Der Anteil des Sauerstoffs im Gasgemisch dient der Kontrolle des Biogasprozesses, da zu hohe Sauerstoffmengen im Fermenter die Mikroorganismen negativ beeinflussen können. Zum einen gibt der Sauerstoffwert aber auch einen Hinweis auf den Erfolg der Gasreinigung, da durch gezieltes Einblasen von Luft die Entschwefelung des Gases erfolgt.

### 2.4.6 Faulraumbelastung

Die Faulraumbelastung ist ein wichtiger Betriebsparameter und bezeichnet die Menge an organischer Trockensubstanz, die dem Fermenter pro Tag und pro Kubikmeter Netto-Fermentervolumen zugeführt wird. Dieser Wert ist für jede Anlage individuell und abhängig von der Fermentertemperatur und der Verweilzeit. Mit zunehmender Verweilzeit steigt die Gefahr der Anlagenüberlastung, da die Bakterien des Abbauprozesses an ihre Leistungsgrenze stoßen. Ab einer Faulraumbelastung von 4 - 5 kg oTS/m<sup>3</sup>/d nimmt die Bakterienleistung soweit ab, dass eine verminderte Gasproduktion zu verzeichnen ist (LINKE, 2005). Somit ist bei einer Anlage mit einer hohen Faulraumbelastung auch ein erhöhter Überwachungsaufwand notwendig. Die meisten Biogasanlagen befinden sich in einem Bereich von 2-3 kg oTS/m<sup>3</sup>/d. Die Faulraumbelastung  $B_R$  lässt sich rechnerisch folgendermaßen herleiten (FNR, 2006):

$$B_R = m \cdot c / V_R$$

( $m$  = zugeführte Substratmenge je Zeiteinheit [kg/d];  $c$  = Konzentration der organischen Substanz [%];  $V_R$  = Reaktorvolumen [l])

### 2.4.7 Verweilzeit

Die hydraulische Verweilzeit ist definiert als die rechnerische Zeitdauer, die ein zugeführtes Substrat im Fermenter bis zu seinem Austrag verbleibt. Es handelt sich bei der Verweilzeit um einen wichtigen Parameter für den Biomasse-Umsetzungsgrad. Nach OSTEROTH (1992) werden bei kurzen Verweilzeiten nur die leicht abbaubaren Substrate umgesetzt. Je länger die Verweilzeit desto größer ist die Biogausausbeute pro Kilogramm organischer Trockenmasse bis Erreichens eines Maximalwertes. Bei einer Erhöhung der Substratzufuhr wird die Verweilzeit verringert, es besteht also eine Abhängigkeit der Verweilzeit von der Durchsatzmenge der eingebrachten Frischmasse. Zur Berechnung der hydraulischen Verweilzeit (HRT) wird das Reaktorvolumen ( $V_R$ ) ins Verhältnis zu zugeführten Substratvolumen ( $V$ ) gesetzt:  $HRT = V_R / V$

### 2.4.8 Spurenelemente

Spurenelemente sind Nährstoffe, die in kleinsten Mengen eine Wirkung in biologischen Prozessen haben und für den normalen Ablauf von Lebensvorgängen unerlässlich sind. Für den anaeroben Abbau zählen Kobalt, Molybdän, Nickel, Selen, Chrom, Mangan und Blei zu den wichtigsten Elementen, die den Organismen zur Verfügung stehen müssen. Um optimal und effizient arbeiten zu können, brauchen die Bakterien Spurenelemente. Denn diese steigern die Wachstumsgeschwindigkeit der Organismen und optimieren deren Zellaktivität. Vor allem in Biogasanlagen, in denen nachwachsende Rohstoffen wie z.B. Mais-silage vergoren werden, sind die Mikroorganismen darauf angewiesen, dass sie zusätzlich Spurenelemente erhalten. Denn diese Rohstoffe verfügen nicht von Natur aus über die notwendige Konzentration der Spurenelemente. SAHM (1981) gibt für einen optimalen anaeroben Prozess folgende Konzentrationen an:

**Tabelle 6: Erforderliche Konzentrationen der Spurenelemente (SAHM, \*MUNDRACK; KUNST;)**

Substanz	Konzentration [mg/l]
Kobalt	0,06
Molybdän	0,05
Nickel	0,006
Selen	0,0080
Mangan	0,005 – 50
Eisen	1 – 10*

Ein Mangel an Spurenelementen kann dazu führen, dass das Wachstum der für den Abbau benötigten Bakterien eingeschränkt wird (BISCHOFBERGER, 2004). Spurenelemente stabilisieren den biologischen Prozess im Fermenter und haben somit einen Einfluss auf die Gasbildung.

## **2.5 Substrateinsatz bei NawaRo-Biogasanlagen**

Grundsätzlich eignen sich alle organischen Stoffe zur Vergärung in einer Biogasanlage, jedoch wird die Biogasproduktion wesentlich durch das Ausgangssubstrat beeinflusst. Daher sollte die Zusammensetzung der täglich eingebrachten Stoffmengen annähernd konstant bleiben, damit die langen Anpassungszeiten der Mikroorganismen an einen Substratwechsel vermieden werden und somit eine kontinuierliche Gasproduktion gewährleistet werden kann (DISSEMOND ET AL., 2003). Nachfolgend wird hauptsächlich auf die in den untersuchten Praxisanlagen eingesetzten Substrate eingegangen.

### **2.5.1 Nachwachsende Rohstoffe**

Landwirtschaftliche Kulturen wie Gras, Getreide und Mais können als „Energiepflanze“ gezielt für die Vergärung in Biogasanlagen angebaut werden. Für die Biomethanisierung geeignete Pflanzen zeichnen sich durch gute Silierfähigkeit und hohe spezifische Methanbildungspotenziale aus (FNR, 2008). Die C<sub>4</sub>-Pflanze Mais eignet sich aufgrund des hohen Massewachstums besonders gut. Die gut entwickelte Produktionstechnik und Konservierung in Form von Silage (Silomais) sind weitere Kriterien, die den Mais als Energiepflanze interessant machen. Zukünftig werden spätere Maissorten mit höheren Siloreifezahlen mehr Bedeutung erlangen, da sie auch noch im Herbst bei günstigen Temperaturverhältnissen einen Zuwachs an Masse erlangen (KARPENSTEIN-MACHAN, 2005). Dass das höhere Leistungspotenzials später Sorten unter den klimatischen Bedingungen in Deutschland erzielt werden kann und der Trockenmasseertrag im Vergleich zu konventionellen Futtermaissorten gesteigert werden kann, zeigen verschiedene Untersuchungen (GAUDCHAU ET AL., 2004; LANDBECK UND SCHMITT, 2005). Der optimale Erntetermin ist abhängig von der Silierfähigkeit, der Verdaulichkeit und den Witterungsverhältnissen. Mais wird in der Regel zwischen der Milch- und Teigreife geerntet und weist einen TS-Gehalt von 28-35 % auf, wobei die Trockenmasseerträge zwischen 120 und 270 dt/ha schwanken können. Die Gasausbeute liegt zwischen 300 und 380 l/kg oTS (EDER UND SCHULZ, 2006).

#### **Silierung von nachwachsenden Rohstoffen**

Da die Substrate zur Beschickung der Biogasanlage ganzjährig bereit gestellt werden müssen, erfolgt eine Konservierung meistens durch Silierung. Die Bereitung von Silage soll den Nährwert der pflanzlichen Substanz weitestgehend erhalten (JEROCH et al., 1999; PAHLOW, 2006). Unter Luftabschluss werden pflanzliche Kohlenhydrate in organische

Säuren umgewandelt. Der pH-Wert sinkt dadurch in einen Bereich, in dem konkurrierende Mikroorganismen und die meisten Enzyme inaktiviert werden. Voraussetzungen für diesen Prozess sind ein ausreichender Feuchtigkeitsgehalt, genügend vergärbare Zucker, eine sauerstofffreie Umgebung und siliertaugliche Milchsäurebakterien.

### 2.5.2 Wirtschaftsdünger

Als Wirtschaftsdünger kann sowohl Flüssig- als auch Festmist eingesetzt werden. Die Zusammensetzung variiert in Abhängigkeit von der Tierart, der Nutzungsrichtung und Haltungsform sowie dem Leistungsniveau und der Fütterung. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Wirtschaftsdüngern werden in der folgenden Tabelle aufgeführt (EDER UND SCHULZ, 2006).

**Tabelle 7: Schwankungsbreite bei Zusammensetzung und Biogasertag verschiedener Gülle- und Mistarten im mesophilen Temperaturbereich**

	Tierart	Rind	Rind	Schwein	Huhn
	Einheit	Flüssigmist	Festmist	Flüssigmist	Kot
TS	%	7 - 17	25 - 40	2,5 – 13	20 – 34
oTS	% der TS	44 - 86		52 – 84	70 – 8
Anfall	kg oTS/GV/d	3,0 - 5,4		2,5 – 4,0	5,5 – 10
pH-Wert		6,2 – 8		6,5 – 7,6	7 – 8
Rohfaser	% der TS	12 – 24		17	12
Rohfett	% der TS	2 – 5,0		9	2
Rohprotein	% der TS	10 - 18		24	26
NFE	% der TS	20 - 43		32	27
Gesamt N	g/l	3,3 – 9,9		3,9 – 8,0	17
Gasausbeute	l/kg oTS	176 – 520		220 – 637	327 – 722
Gasleistung	m <sup>3</sup> /GV/d	0,56 – 1,5	1,5 – 2,9	0,6 – 1,25	3,5 – 4,0
Durchschnittliche Gasleistung	m <sup>3</sup> /GV/d	1,11	2,0	0,88	3,75

Die Biogasausbeute ist bei Rindergülle zwar relativ gering, allerdings besitzt sie einen hohen Anteil an Methanbakterien, was für die Vergärung von entscheidender Bedeutung ist. Grundsätzlich ist festzustellen, dass Schweinegülle einen niedrigen, Rindergülle einen mittleren und Hühnerkot einen hohen Trockensubstanzgehalt aufweist. Exkremente aus der Hühnerhaltung sind gut vergärbar und erzeugen im Vergleich zu Rinder- und Schweinegülle höhere Gasausbeuten. Der pH-Wert ist bedingt durch den Kalkgehalt am höchsten. Aufgrund der hohen Anteile an Kalk und Sand kann die Bildung von Sinkschichten begünstigt werden, was spezielle verfahrenstechnische Maßnahmen erfordert (TRÖSCH UND WEILAND, 1998). Der Strohanteil kann eine positive Auswirkung auf die Gasproduktivität haben (OCHSENER UND GOSCH, 1998).

## **2.6 Gesetzlicher Hintergrund**

Die Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen verzeichnet seit Jahren ein deutliches Wachstum. Grundlage dafür stellt zunächst das Stromeinspeisungsgesetz vom 7.12.1990 dar, das dem Einspeiser erstmalig einen gesetzlichen Anspruch auf Abnahme und Vergütung des regenerativen Stroms zusichert. Am 01.04.2000 trat das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) mit 13 Paragraphen in Kraft. Mit der ersten Novellierung des EEG zum 1.08.2004 erhöht sich die Zahl der Paragraphen auf 21, während es sich 4 Jahre später, im Zuge der zweiten Novellierung zum 1.01.2009, auf 66 Paragraphen erweitert (WERNSMANN, 2008).

### Erneuerbare-Energien-Gesetz 2009

Die aktuelle Grundlage für die Abnahme und Vergütung des regenerativen Stroms in Deutschland bildet die vom Bundestag beschlossene Fassung des EEG seit dem 1. Januar 2009. Ziel dieses Gesetzes ist es, bis zum Jahr 2020 die Stromversorgung auf 25 bis 30 % aus erneuerbaren Energien zu decken. Für die Biogasbranche liegt nach der Novellierung der Fokus der Förderung nicht mehr auf dem Einsatz nachwachsender Rohstoffe, sondern auf einer Verbreiterung der Rohstoffbasis. Grundlegende Änderungen des EEG finden sich beispielsweise im Bereich der Grundvergütung sowie neuer oder geänderter Bonus-Vergütungen (Boni). So wurden die Voraussetzungen für nachwachsende Rohstoffe (Na-

waRo-Bonus), den KWK-Bonus und den Technologie-Bonus neu definiert. Erstmals gibt es zudem einen Bonus für den Einsatz von Wirtschaftsdüngern (Gülle-Bonus), für den Einsatz von Landschaftspflegematerial (Landschaftspflege-Bonus) und einen Bonus für die Einhaltung der Formaldehydgrenzwerte nach TA-Luft (Luftreinigungs-Bonus). Die unterschiedlichen Vergütungsvorschriften für den aus Biomasse produzierten und eingespeisten Strom werden in § 27 des neuen EEG geregelt. Damit fällt auch der aus Biogas produzierte Strom unter diesen Paragraphen.

Die verschiedenen Vergütungssätze, die je kWh Strom gewährt werden, sind größten Teils nach der Anlagenleistung gestaffelt. Die angegebene Anlagenleistung bezieht sich jedoch nicht auf die installierte elektrische Leistung, sondern dient zur Berechnung der jeweiligen Jahresstrommengen, für die die unterschiedlichen Vergütungen gezahlt werden. Um die Strommenge zu ermitteln, für die der entsprechende Vergütungssatz gezahlt wird, muss man die angegebene Leistung mit der Jahresstundenzahl multiplizieren. Die Vergütung bis einschließlich einer Anlagenleistung von 150 kW bedeutet damit, dass die ersten 1.314.000 kWh (angenommene 8.760 Jahresstunden multipliziert mit 150 kW) mit dem entsprechenden Satz vergütet werden, alles darüber hinaus mit dem nächst niedrigeren Satz (FNR 2006).

Eine weitere wichtige Änderung beschreibt der § 20 des in Kraft getretenen EEG, indem die Degressionen der Vergütungssätze der jeweiligen Erneuerbaren-Energien festgelegt sind. Diese beschreibt die jährliche Senkung der Vergütungssätze. Der Strom aus einer aus Erneuerbaren-Energien produzierenden Anlage wird für 20 Jahre fest mit dem Satz vergütet, der in dem Jahr gilt, in dem die Anlage das erste Mal Strom einspeist (FNR 2006, S. 138). Im EEG 2004 unterlag lediglich die Grundvergütung für die Einspeisung von Strom aus Biogas der Degression. Diese betrug jährlich 1,5 % (EEG 2004, § 8 Abs. 5). Das neue EEG regelt hingegen, dass sowohl Grundvergütung wie neuerdings auch alle gewährten Boni jährlich um nur 1 % gesenkt werden (BUNDESRAT 2008, § 20 Abs. 2 Nr. 5).

### **Grundvergütung**

Die Grundvergütungssätze für das Jahr 2008 betragen nach dem EEG 2004 bis einschließlich einer Anlagenleistung von 150 kW 10,67 Cent, bis 500 kW 9,18 Cent, bis 5 MW 8,25 Cent und darüber hinaus 7,79 Cent je kWh eingespeisten Strom (EEG 2004, § 8 Abs. 1 Nr. 1 bis 5). Im neuen EEG wird grundsätzlich nur die Grundvergütung bis einschließlich einer

Anlagenleistung von 150 kW um 1 Cent erhöht auf 11,67 Cent je Kilowattstunde eingespeisten Strom (BUNDESRAT 2008, § 27 Abs. 1 Nr. 1). Biogasanlagen bis einschließlich einer Anlagenleistung von 500 kW können darüber hinaus eine um 1 Cent/kWh eingespeisten Strom zusätzlich erhöhte Grundvergütung erhalten, wenn sie die Formaldehydgrenzwerte der TA Luft einhalten und dies bei der zuständigen Behörde mittels einer Bescheinigung nachgewiesen wird (BUNDESRAT 2008, § 27 Abs. 5). Die Anhebung der Grundvergütung ist Bestandteil der angestrebten Vergütungsverbesserung für Biogasanlagenbetreiber und soll landwirtschaftlichen Biogasanlagenbetreibern helfen, die gestiegenen Rohstoffpreise der vergangenen Jahre zumindest teilweise zu kompensieren.

### **NawaRo-Bonus**

In Anlage 2 des EEG 2009 sind die Anforderungen für den NawaRo-Bonus in etwa gleich geregelt wie im EEG 2004, jedoch sind sie präziser formuliert. Bis einschließlich einer Anlagenleistung von 500 kW wird ein Bonus von 7,0 Cent und bis 5 MW von 4,0 Cent je kWh eingespeisten Strom gewährt. Die Anlagenbetreiber, die den NawaRo-Bonus beanspruchen, sind zudem seit dem 1. Januar 2009 verpflichtet, ein Einsatzstoff-Tagebuch mit Angaben und Belegen über Art, Menge und Herkunft der eingesetzten Stoffe zu führen (WERNSMANN, 2008).

Die Regelungen zur Bestimmung der Substrate, die als nachwachsende Rohstoffe gelten, wurden aus dem EEG 2004 übernommen und durch eine Positiv- und Negativliste ergänzt. Neu ist, dass zukünftig die in der Positivliste der rein pflanzlichen Nebenprodukte bestimmten Einsatzstoffe, die eigentlich Abfallstoffe sind, in NawaRo-Anlagen vergoren werden können, ohne dass der Anspruch auf den Bonus verloren geht. Es wird allerdings nur der Strom mit dem NawaRo-Bonus prämiert, der aus nachwachsenden Rohstoffen oder aus Gülle erzeugt worden ist. Der Strom, der aus pflanzlichen Nebenprodukten produziert wurde, wird nur mit der Grundvergütung und gegebenenfalls mit dem Technologie- und dem KWK-Bonus vergütet. Soweit pflanzliche Nebenprodukte vergoren werden, ist der Anteil des Stroms, der aus nachwachsenden Rohstoffen oder Gülle erzeugt worden ist, wieder über ein Zertifikat eines Umweltgutachters nachzuweisen. Des Weiteren wird zur Minderung der Methanemissionen der NawaRo-Bonus für Strom nach dem neuen EEG nur gewährt, wenn die Gärrestlager gasdicht abgedeckt und zusätzliche Gasverbrauchsein-

richtungen für eine Betriebsstörung oder für eine Überproduktion vorhanden sind (BUNDESGESETZBLATT, 2008).

### **Gülle-Bonus**

Im Zuge der Novellierung des EEG wurde der so genannte Gülle-Bonus ganz neu eingeführt. Dieser Bonus sieht bis einschließlich einer elektrischen Anlagenleistung von 150 kW eine Zusatzvergütung in Höhe von 4 Cent pro Kilowattstunde und für den Leistungsbereich von 150 kW bis einschließlich 500 kW eine Zusatzvergütung in Höhe von 1 Cent pro Kilowattstunde vor. Die maßgebliche Leistungsgrenze bestimmt sich dabei nach der tatsächlichen Einspeiseleistung. Für Anlagen mit einer Leistung von 500 kW bedeutet dies in der Summe eine Erhöhung um 1,8 Cent/kWh, da größere Anlagen den Bonus anteilig geltend machen können. Der Anspruch auf den Gülle-Bonus setzt aber voraus, dass jederzeit mindestens dreißig Masseprozent Wirtschaftsdünger eingesetzt werden. Der Mindestanteil ist durch einem Umweltgutachter jährlich nachzuweisen (LFL, 2008).

Ziel dieser Prämienveränderung ist es, bei bestehenden und zukünftigen Biogasanlagen den Fokus weg von nachwachsenden Rohstoffen stärker hin zur Verwendung von Gülle zur Biogasproduktion zu lenken. Bis Ende 2008 wurden lediglich 20 % der Gülle in Deutschland in Biogasanlagen verarbeitet. Mit der Verwertung in den Anlagen sollen vor allem die Direktausbringung von Gülle auf die Felder und damit klimaschädliche Methanemissionen in der Tierproduktion reduziert werden. Mit der stärkeren Abstufung von 150 kW bis 500 kW will der Gesetzgeber vor allem kleinere Anlagen fördern und damit aufwendige Gülletransporte verhindern (NEUMANN, 2008).

### **KWK-Bonus**

Neu geregelt hat die Politik auch den Bonus für die Kraft-Wärme-Kopplung, kurz KWK-Bonus. Diesen erhalten Betreiber, wenn sie bei der Stromerzeugung anfallende Abwärme außerhalb der Biogasanlage nutzen. Die Aufheizung des eignen Fermenters wird also nicht gefördert. Wie in Anlage 3 des neuen EEG geregelt, steigt der Bonus unter Einhaltung verschärfter Auflagenbedingungen von 2 auf 3 Cent/kWh. Der Anspruch besteht aber nur dann, wenn es sich um Strom im Sinne von § 3 Abs. 4 des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes handelt und eine Wärmenutzung im Sinne der Positivliste Nummer III

aus Anlage 3 des neuen EEG vorliegt oder durch die Wärmenutzung nachweislich fossile Energieträger in einem Umfang der fossilen Wärmenutzung vergleichbaren Energieäquivalent ersetzt und die Mehrkosten, die durch die Wärmebereitstellung entstehen, nachweisbar sind und mindestens 100 Euro pro Kilowatt Wärmeleistung betragen. Laut KWK-Gesetz 2002 ist KWK-Strom, das rechnerische Produkt aus Nutzwärme und Stromkennzahl der KWK-Anlage, wobei Nutzwärme die aus einem KWK-Prozess ausgekoppelte Wärme, die außerhalb der KWK-Anlage für die Raumheizung, die Warmwasserbereitung, die Kälteerzeugung oder als Prozesswärme verwendet wird, ist. Ferner ist unter Stromkennzahl das Verhältnis von elektrischem Wirkungsgrad zum thermischen Wirkungsgrad der KWK-Anlage zu verstehen. Die Einhaltung ist dabei wieder mit einem Umweltgutachten einmalig bei Inbetriebnahme der Kraft-Wärme-Kopplung zu erbringen. Ist die Wärmenutzung allerdings in der Positivliste aufgeführt, kommt es auf den Nachweis der Mehrkosten und der Ersetzung nicht mehr an, ausgenommen sind Stallgebäude und Unterglasanlagen. Dazu zählen beispielsweise:

- Beheizung oder Kühlung von Gebäuden bis zu einem Wärmeeinsatz von 200 kWh pro m<sup>2</sup> Nutzfläche im Jahr,
- Die Wärmeeinspeisung in ein Nahwärmenetz von mindestens 400 Metern,
- Nutzung als Prozesswärme für industrielle Zwecke, u.a. die Herstellung von Holzpellets als Brennstoff,
- Beheizung von Ställen, wobei je Tierart Höchstgrenzen aufgeführt sind, für die der Bonus gezahlt wird. Das sind z.B. 150 kWh pro Sau und Jahr, 4,2 kWh pro Ferkel oder 4,3 kWh pro Mastschwein und Jahr,
- Gärrestetrocknung zu Düngerzwecken.

Nach der Negativliste fällt dagegen die Nutzung der Wärme zur Verstromung, z.B. in ORC-Anlagen sowie Gebäude, die nicht in der Energieeinspar-Verordnung aufgeführt sind nicht unter den KWK-Bonus. Für Altanlagen mit Inbetriebnahme vor 2009 und bestehendem Wärmekonzept können allerdings weiterhin die vorgesehenen 2 Cent des alten EEG genutzt werden, ohne die neuen Auflagen erfüllen zu müssen (WERNSMANN, 2008)

### **Technologie-Bonus**

Der Technologie-Bonus beträgt im neuen EEG weiterhin 2,0 Cent/kWh eingespeisten Strom bis einschließlich einer Anlagenleistung bis 5 MW. Zusätzlich werden Boni gewährt, für Strom, der aus zuvor auf Erdgasqualität ins Gasnetz eingespeistem Biogas pro-

duziert wird. Die Gewinnung von Biogas aus Trockenfermentation reicht dagegen nicht mehr aus, um den Technologie-Bonus zu erhalten. Nach wie vor bekommen nur Anlagen den Technologie-Bonus, die auch die Abwärme nach Anlage 3 nutzen oder einen elektrischen Wirkungsgrad von mindestens 45 % erreichen (BUNDESRAT 2008, Anlage 3).

### **Landschaftspflegebonus und Luftreinhaltungsbonus**

Neben dem Güllebonus sieht das neue EEG erstmalig bis zu einer Leistung von 500 kW auch einen Landschaftspflege-Bonus in Höhe von 2 Cent/kWh vor. Der Anspruch auf diesen Bonus setzt aber voraus, dass ein Anspruch auf den NawaRo-Bonus besteht und überwiegend (> 50 %) Pflanzen und Pflanzenbestandteile eingesetzt werden, die im Rahmen der Landschaftspflege anfallen. Als Landschaftspflegematerial gelten beispielsweise Grasschnitt aus der Landschaftspflege, kommunaler Grasschnitt, Grünschnitt von Golf- und Sportplätzen oder aus privaten Gärten.

Einen weiteren Bonus in Höhe von einem Cent/kWh kann für Strom aus nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) genehmigungsbedürftigen Biogasanlagen beantragt werden, wenn die dem Emissionsminimierungsangebot der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) entsprechenden Formaldehydgrenzwerte eingehalten werden und die Einhaltung der Grenzwerte durch eine Bescheinigung der zuständigen Behörde nachgewiesen wird. Dies gilt allerdings nur bis zu einer elektrischen Anlagenleistung von einschließlich 500 kW (BUNDESRAT 2008, Anlage 3).

## **2.7 Grundlagen der Wirtschaftlichkeit**

Die wichtigste Einnahmequelle bei der Biogasproduktion ist bis zum jetzigen Zeitpunkt der Stromverkauf. Die Ablösung des Stromeinspeisungsgesetzes im Jahr 2000 durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz eröffnete der Energieerzeugung aus Biomasse eine neue Perspektive. Die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage ergibt sich aus einer konstanten Gasproduktion und einem davon abhängigen BHKW-Volllastbetrieb.

Aus dem Gutachten „Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung“ geht hervor, dass bei den aktuellen Rahmenbedingungen der Betrieb einer NawaRo-Biogasanlage auf Maisbasis ohne Abwärmenutzungskonzept nicht wirtschaftlich ist (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT AGRARPOLITIK, 2007). Von daher spielt nicht nur der Verkauf von Strom, sondern auch von Wärme eine bedeutende Rolle bei der Biogaserzeugung.

## 2.8 Grundlagen des Qualitätsmanagements

Der Aspekt des Qualitätsmanagements in der Biogasproduktion spielt eine entscheidende Rolle, da viele komplexe Einzelschritte und Arbeitsabläufe die gesamte Prozesskette ausmachen. Weiterhin ist Qualitätsmanagement die Voraussetzung eines sicheren und kontrollierten Betriebes sowie ein unverzichtbares Instrument bei der Betriebsoptimierung. „Optimierung“ wird laut BROCKHAUS (1991) folgendermaßen definiert:

*„Angewandt in technischen, betriebs- und volkswirtschaftlichen Zusammenhänge, dient die bereits im Planungsstadium eingesetzte Optimierung dazu, knappe Ressourcen (Produktionsfaktoren, Umweltgüter wie Luft, Wasser und Naturflächen) so effektiv wie möglich zu verwenden bzw. ein gewünschtes Ergebnis mit möglichst geringem Ressourcenverbrauch zu erreichen (Ökonomisches Prinzip).“*

Bei der Biogasproduktion steht die Methanerzeugung als Folgeschritt des Rohstoffeinsatzes und mikrobiellen Abbaus im Vordergrund. Eine optimale Gasausbeute kann nur erzielt werden, wenn die mikrobiellen Abläufe mit den verfahrenstechnischen Abläufen einwandfrei aufeinander abgestimmt sind. Deshalb müssen die mikrobiellen und verfahrenstechnischen Abschnitte nach dem Soll-Ist-Prinzip bekannt sein, um geregelt werden zu können. Es sollte dokumentiert werden, wie Arbeitsabläufe und Prozesse durchgeführt werden und welche Kontrollen in dieser Kette angelegt sind. Eine Prozessoptimierung kann nur erreicht werden, wenn die gesamte Handhabung aller Einzelkomponenten betrachtet wird. Durch eine hohe Prozessqualität lassen sich Fehlerkosten minimieren und somit kann die wirtschaftliche Situation des Unternehmens bzw. der Biogasanlage verbessert werden. Zur Sicherstellung der Qualität eines Produktionsprozesses gehören als zweckgerichtetes Maßnahmenziel Methoden der Messtechnik und der Statistik.

### 2.8.1 Qualitätsbegriff

„Qualität“ stammt aus dem lateinischen von „qualitas“ und wird mit dem Wort „Beschaffenheit“ übersetzt. Im Bereich des Qualitätsmanagements besteht dieser Begriff seit dem Jahr 1972, ab dem er eine Maßzahl zwischen der festgestellten und realisierten Beschaffenheit zum Ausdruck bringt (ZOLLONDZ, 2001).

Der Begriff „Qualität“ ist von subjektiver Natur, da jeder Betrachter seine eigenen Vorstellungen von den Anforderungen an ein Produkt oder eine Dienstleistung hat, womit eine

einheitliche Definition in der Literatur nicht zu finden ist. Nach der DIN-Norm 55350 wird „Qualität“ wie folgt beschrieben:

*„Die Gesamtheit von Eigenschaften und Merkmalen eines Produktes oder einer Tätigkeit, die sich auf deren Eignung zur Erfüllung gegebener Erfordernisse bezieht“.*

Eine weitere Definition basiert auf einem hohen Erfüllungsgrad der Kundenerwartung bezüglich der gewünschten Eigenschaften (KÜHL, 1998):

*„Qualität ist die Erfüllung der vorher festgelegten Eigenschaften“.*

Gemäß der DIN ISO 9000 lautet die Definition:

*“Vermögen einer Gesamtheit inhärenter Merkmale eines Produktes, Systems oder Prozesses zur Erfüllung von Forderungen von Kunden und anderen interessierten Parteien.“*

Qualität ist dann gegeben, wenn die Anforderungen des Kunden sich mit den Wahrnehmungen des Kunden decken. Diese Definition verdeutlicht, dass eine alleinige Betrachtung der Qualität aus Sicht des Unternehmens nicht ausreichend ist. Die Kundenanforderungen müssen Bestandteil der Definition von „Qualität“ sein. Dabei besagt der Begriff Qualität nicht, dass das Produkt eine besondere Beschaffenheit aufzeigt, sondern dass die im Vorhinein geplanten Eigenschaften erfüllt werden. Die entsprechenden Leistungsstandards vorzugeben liegt im Ermessensspielraum der Unternehmen (KUTSCHERA, 2003).

Um Qualität messbar zu machen, muss ein Bezugspunkt festgelegt werden, um die Zielerreichung zu verifizieren. Der Durchführungsablauf sollte soweit beherrschbar und nachvollziehbar sein, dass die vorher definierten Eigenschaften auch erfüllt werden können. Somit steht nicht nur die Produktqualität, sondern auch die Prozessqualität im Vordergrund, da die Produktqualität maßgeblich von der Prozessqualität abhängig. Eine Dokumentation der Arbeitsabläufe und Prozessdurchführung ist von besonderer Wichtigkeit, um die Kontrolle der gesamten Prozesskette bewahren zu können. Fehlerhafte Produkte verursachen Kosten, die zu vermeiden sind. Die Prozessqualität hat also Einfluss auf Kosten, Gewinn und Geschäftserfolg (GEMBRYNS UND HERMANN, 2007).

## **2.8.2 Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung**

Unter Qualitätsmanagement werden nach DIN ISO 9000:2000 *„aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zur Leitung und Lenkung einer Organisation bezüglich Qualität“* verstanden.

Das Qualitätsmanagement knüpft an die vorgegebenen Kriterien der Qualität an, da es die Vorgaben zur Erreichung einzelner Kriterien macht. Es handelt sich dabei um alle geplanten und systematischen Tätigkeiten, die in einem QM-System implementiert sind. Es ist festzulegen, welche Prozesse die Qualität beeinflussen können, und welche personellen Verantwortlichkeiten im Unternehmen vorzufinden sind. Es werden die Zuständigkeiten, Verfahren, Prozesse und Mittel für die Ausführung des Qualitätsmanagements beschrieben. Ziel ist, den Herstellungsprozess zu sichern. Fehler im Prozess und fehlerhafte Produkte sollen durch geeignete Maßnahmen ausgeschaltet werden.

Qualitätsmanagement umfasst alle Maßnahmen, die zur Umsetzung der Qualitätsziele benötigt werden. Dokumentiert werden diese Ziele im Qualitätsmanagementhandbuch. Ein QM-Handbuch setzt die Struktur des QM-Systems fest und dient gleichzeitig als ständige Referenz bei der Verwirklichung, Aufrechterhaltung und Verbesserung des Systems (KERSTEN ET AL., 2003). Ein wichtiger Bestandteil der Unternehmensziele ist die Qualitätspolitik, in ihr sind die Qualitätsplanung, Qualitätslenkung, Qualitätssicherung und Qualitätsverbesserung enthalten. Durch die Qualitätsplanung werden im Vorfeld die notwendigen Aufgaben festgelegt, Einzelanforderungen formuliert und Qualitätsmerkmale ausgewählt. Die Qualitäts- und Prozesslenkung enthält die vorbeugenden, überwachenden und korrigierenden Tätigkeiten, um die Qualitätsanforderungen einhalten zu können.

Die Aufgabe der Qualitätssicherung besteht in der Messung und Dokumentation qualitätsbezogener Aktivitäten. Dadurch wird gleichzeitig der Qualitätsstatus des Produktes erfasst und ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt. Die Qualitätsverbesserung setzt an der letzten Stelle des Systems an, indem sie bei Überschreitung der zulässigen Grenzwerte eingreift, den Fehler analysiert und Verbesserungsvorschläge angibt. Als Konsequenz ergibt sich eine kontinuierliche Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Wirksamkeit der Prozesse (SEUFERT UND HESSE, 2008; KAMISKE UND BRAUER, 2008)

### **2.8.3            Auditarten**

Ein Audit ist eine systematische unabhängige Untersuchung, um festzustellen, ob die qualitätsbezogenen Tätigkeiten und damit zusammenhängenden Ergebnisse den geplanten Anforderungen entsprechen, und ob diese Anforderungen tatsächlich verwirklicht und geeignet sind, die Ziele zu erreichen.

Das Ziel eines Qualitätsaudit bestimmen die Auditarten. Grundsätzlich kann zwischen internen und externen Audits unterschieden werden. Bei einem internen Audit prüft das Unternehmen sein eigenes System, die Verfahrensanweisungen und die Durchführung im Hinblick auf Nachweis und Übereinstimmung für interne Zwecke. Der Einsatz von Beratern ist zulässig. Externe Audits werden im Auftrag des Unternehmens durch externe Auditoren durchgeführt (GIETL UND LOBINGER, 2004).

Es kann eine weitere Unterscheidung in „Produktaudit“, „Verfahrensaudit“ und „Systemaudit“ vorgenommen werden (KAMISKE UND BRAUER, 2008).

Das **Produktaudit** dient zur Beurteilung der Produktqualität. Produkte werden auf Übereinstimmung mit den vorgegebenen Spezifikationen sowie den Kundenanforderungen untersucht. Zielsetzung ist die Erreichung einer höheren Qualität durch Verbesserungen und Fehlermeidungen. Laut ISHIKAWA (1987) können systematische Fehler und Fehlerschwerpunkte durch Stichprobenprüfungen und statistische Prozessregelung ermittelt werden.

Das **Verfahrensaudit** dient zur Beurteilung der Verfahrens- bzw. Prozessqualität. Die Definition von „Verfahren“ nach DIN ISO 9000 lautet: „Festgelegte Art und Weise, eine Tätigkeit oder einen Prozess auszuführen“. Daher wird die Übereinstimmung, z. B. der Prozessqualität, mit Arbeits- und Prozess- bzw. Verfahrensanweisungen, technischen Produktspezifikationen und Kundenforderungen zusammenhängend begutachtet.

Das **Prozessaudit** unterscheidet sich von dem Verfahrensaudit nur geringfügig. GIETL UND LOBINGER (2004) beziehen sich dabei auf die ISO 9000, in der der Begriff „Prozess“ gesondert definiert ist als „Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt“. Diese Art von Audit kann in allen Prozessen von Unternehmen erfolgen um die funktionale Effektivität und wirtschaftliche Effizienz von Prozessen zu verbessern, aber auch bei Einführung neuer Prozesse.

Das **Systemaudit** basiert auf der Grundlage eines Standards nach ISO 9001. Es beurteilt die Wirksamkeit eines Qualitätsmanagements. In ein Systemaudit können zusätzlich individuelle Anforderungen wie Qualitätspolitik und Organisationsziele als maßgebliche Beurteilungsfaktoren aufgenommen werden.

#### **2.8.4 Zertifizierung**

Die Zertifizierung dient dem Nachweis der Wirksamkeit und Funktionsfähigkeit eines Qualitätsmanagementsystems (KAMISKE UND BRAUER, 2008).

Ein Zertifizierungsverfahren gestaltet sich nach folgendem typischen Ablaufschema (GIETL UND LOBINGER, 2004):

1. Vorinformation des Zertifizierungsunternehmens über die Leistungen;
2. Angebot und Vertragsabschluss;
3. Prüfung der Unterlagen durch den Auditor zum Abgleich der Normanforderungen (Dokumentenprüfung);
4. Gegebenenfalls Durchführung eines Voraudits;
5. Durchführung des Zertifizierungsaudits;
6. Bewertung;
7. Zertifikatserteilung;
8. Erstes Überwachungsaudit zur Feststellung bezüglich Aufrechterhaltung des Qualitätsmanagementsystems und Umsetzung der Korrekturmaßnahmen;
9. Zweites Überwachungsaudit;
10. Wiederholungsaudit vor Ablauf der Gültigkeit des Zertifikats mit dem Ziel der Re-zertifizierung.

Vor der Ausstellung des Zertifikats müssen alle im Abschlussbericht dargestellten kritischen Abweichungen behoben werden. Die nicht kritischen Fehler sind innerhalb von sechs Monaten zu korrigieren. Ein Zertifikat mit einer Gültigkeitsdauer von bis zu drei Jahren wird nach einem positiven Abschlussbericht erteilt (TRAUER UND LOBINGER, 2004). Der Auditor hat die Funktion in Abhängigkeit vom Standard notwendige Korrekturen aufzuzeigen. Es liegt die Entscheidung beim Unternehmen, welche Art der Korrekturmaßnahmen durchgeführt werden soll. Laut SEGEHZZI ET AL. (2007) nimmt das Zertifizierungsunternehmen darauf keinen Einfluss.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Auswahlkriterien und Anlagenbeschreibung

Zunächst wurden zwei repräsentative NawaRo-Biogasanlagen ausgewählt, wobei bestimmte Auswahlkriterien berücksichtigt wurden. Die Anlagen sollten dem aktuellen Stand der Technik entsprechen und dabei Anforderungen an eine umfangreiche Messtechnik und ausführliche Dokumentation erfüllen. Die Betriebsweise sollte sich im mesophilen Temperaturbereich befinden, da sie in der Praxis am weitesten verbreitet sind. In diesem Temperaturbereich kann eine relativ hohe Gasausbeute sowie eine gute Prozessstabilität erreicht werden.

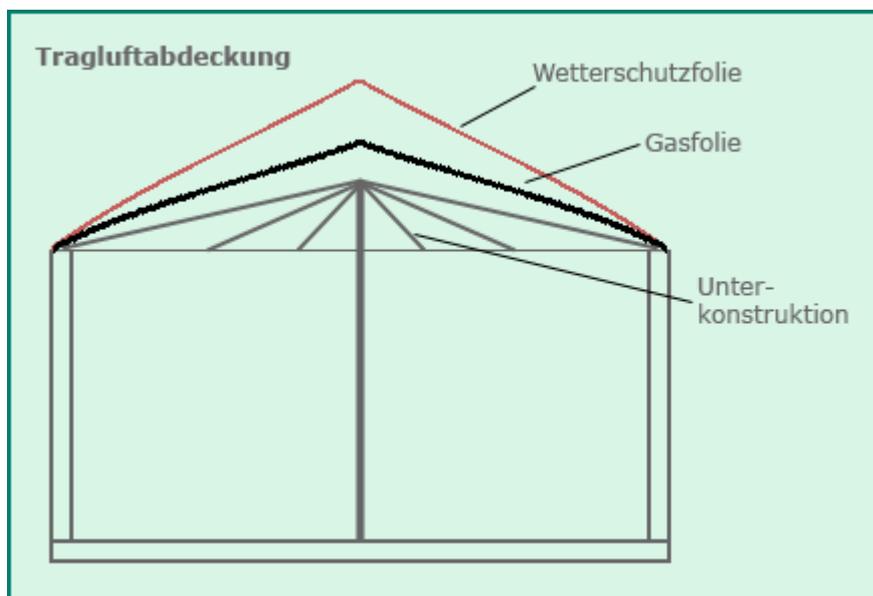
Die Anlagen sollten mindestens 12 Monate in Betrieb sein, um plötzliche Einbrüche der Prozessstabilität nach einer stabilen Animpfphase zu vermeiden. Weiterhin sollte auf den kontinuierlichen Einsatz von Flüssigmist verzichtet werden; auch der Anteil an Festmist sollte ebenso möglichst gering sein. Additive wie Spurenelemente und Enzyme sollten zu Beginn der Datenaufzeichnung nicht eingesetzt werden. Neben diesen Auswahlkriterien wurde darauf Wert gelegt, dass der Betriebsleiter eine gute Kooperationsbereitschaft zeigt, um sicherzustellen, dass die Anlagen für ca. ein Jahr messtechnisch begleitet werden können.

##### 3.1.1 Praxisanlage A

Die Biogasanlage A wurde im Mai 2006 in Betrieb genommen und hat eine installierte elektrische Leistung von 835 kW<sub>el</sub>. Bei den Einsatzstoffen handelt es sich zu 90 % um Maissilage während sich die restlichen 10 % aus CCM und Hähnchenmist zusammensetzen.

Die Anlage besteht aus zwei Fermenter, einem Nachgärer und dem Endlager, in dem der Gärrest bis zur Ausbringung verweilt. Fermenter eins und zwei werden abwechselnd alle zwei Stunde mit frischem Substrat beschickt. Die Behälter bestehen aus Stahlbeton der Festigkeitsklasse C 35/45 mit hohem Wassereindringungswiderstand nach DIN 1045. Um den Behälter vor Korrosion zu schützen, ist das obere Drittel der Fermenterinnenseite, die Grenzschicht zwischen flüssiger und gasartiger Phase, mit einem Epoxidharz angestrichen. Zur Gewährleistung einer stabilen Prozesstemperatur trägt die im Wand- und Bodenbereich angebrachte 6 cm Styropor-Isolierung bei. Die äußere Wand der Fermenter ist mit

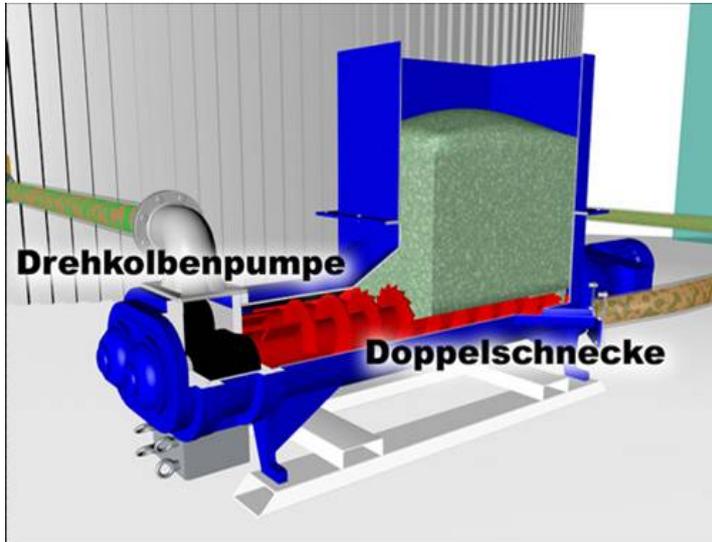
Alutrapezblechen verkleidet, um einen zusätzlichen Schutz vor Witterung und Schadnagern bieten zu können. Das Tragluftdach wird am Rundbehälter mit einer Klemmschiene eine Mauerkronenschutzfolie, eine kegelförmige Gasfolie und Wetterschutzfolie angebracht. Die Gasfolie bildet den Gasspeicherraum, während die Wetterschutzfolie die Gasspeicherfolie vor Witterungseinflüssen schützt. Zwischen den Folien wird durch ein 120 W Radialgebläse ein Stützluftpolster erzeugt. Der Gasspeicher besteht aus einer Folie mit Doppelmembran und einem 30 %igen Dachneigungszuschnitt. Die Innenmembran speichert das produzierte Gas, sie kann sich in Abhängigkeit vom Gasdruck (= Füllstand) ausdehnen oder zusammenziehen. Außerdem ist sie über einen Seilzug mit der Füllstandsanzeige verbunden, die eine Skalierung 100 %, 75 %, 50 %, 25 % und 0 % aufweist. Der Gasspeicherraum ist mit einer außen liegenden Unter- und Überdrucksicherung verbunden, welche für Gasvolumenströme bis 300 m<sup>3</sup>/h geeignet sind.



**Abbildung 6: Tragluftdach mit integriertem Gasspeicher (Quelle: FA Baur)**

Zwischen den Fermentern befindet sich im oberen Bereich eine Arbeitsbühne, die über eine Treppe zu erreichen ist. Von dort aus kann über Schaugläser der Prozess im Inneren visuell kontrolliert werden. In diesem Bereich sind auch eine Über- und Unterdrucksicherung zum Druckausgleich des Gasspeichers sowie eine Sonde zur Füllstandsüberwachung eingebaut. Im unteren Bereich befindet sich auf einer V2A-Muffenplatte Probenhähne, Temperatursensoren und Druckdosen, die der Prozesskontrolle und -regelung dienen.

Die Zu- und Ableitung der Substrate erfolgt über Kunststoffrohrleitungen DN 160 PN 10 (PVC-U) mit einem Durchmesser von 160 mm. Diese Rohre sind 2,5 m über der Fermentersohle angebracht, wobei die Zuleitung waagrecht in den Fermenter verläuft und die Ableitung senkrecht.



**Abbildung 7: Eintragstechnik „Quick Mix“ (Quelle: Vogelsang)**

Die Eintragstechnik besteht aus zwei mit Reißzähnen besetzten Förderschnecken und einer Drehkolbenpumpe, die in einem Aggregat vereint sind. Mit diesem System können in einem Arbeitsgang Suspensionen mit extrem hohen TS-Gehalten angerührt und anschließend gefördert werden. Mittels einer Zuführeinheit wird der Doppelschnecke der Feststoff zugeführt, wobei gleichzeitig von der Seite eine flüssige Phase eingebracht wird. Die Reißzähne der Doppelschnecken zerkleinern nun die Grobstoffe und vermischen sie mit der flüssigen Phase, so dass eine homogene Suspension entsteht. Dabei kann durch Regelung der flüssigen Phase der TS-Gehalt des Gemisches eingestellt werden. Anschließend führt die Doppelschnecke die Suspension der Pumpenkammer zu, die sie dann an verschiedenste Bestimmungsorte fördert.

Als Pumpen werden Drehkolbenpumpen eingesetzt, die eine Leistung von 15 bis 70 m<sup>3</sup>/h und einen maximalen Druck von 10 bar aufweisen. Die Steuerung des Pumpensystems erfolgt per Durchflussmengenmessung, welche jeweils auf der Druckseite direkt nach der Pumpe und vor dem Verteilbalken installiert ist. Die umgepumpten Mengen werden durch die betriebseigene Steuerungssoftware dokumentiert (Abb.9).



Abbildung 8: Pumpenstation auf dem Untersuchungsbetrieb A

### Umpump-Protokoll



Protokolldatum : 01.01.2009  
 Datum der Generierung : 02.01.2009 02:00

Zeit	Nr.	Vorgrube 1 [m³]	Reserve [m³]	Fermenter 1 [m³]	Fermenter 2 [m³]	Fermenter 3 [m³]	Endlager 1 [m³]	Reserve [m³]	Ziel
00:01:03	1	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 3
00:42:52	2	0,00	0,00	0,00	19,48	0,00	0,00	0,00	Fermenter 2
01:33:46	3	0,00	0,00	19,50	0,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 1
02:01:27	4	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 3
02:41:01	5	0,00	0,00	0,00	19,45	0,00	0,00	0,00	Fermenter 2
03:33:49	6	0,00	0,00	19,50	0,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 1
04:02:04	7	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 3
04:41:36	8	0,00	0,00	0,00	19,45	0,00	0,00	0,00	Fermenter 2
05:33:49	9	0,00	0,00	19,53	0,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 1
06:01:21	10	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 3
07:21:50	11	0,00	0,00	0,00	19,43	0,00	0,00	0,00	Fermenter 2
07:55:41	12	0,00	0,00	19,53	0,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 1
08:10:26	13	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	Endlager 1
08:48:30	14	0,00	0,00	0,00	19,45	0,00	0,00	0,00	Fermenter 2
09:33:49	15	0,00	0,00	19,50	0,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 1
09:48:30	16	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	Endlager 1
10:38:53	17	0,00	0,00	0,00	19,45	0,00	0,00	0,00	Fermenter 2
11:01:42	18	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	Fermenter 3
11:40:17	19	0,00	0,00	0,00	19,45	0,00	0,00	0,00	Fermenter 2
11:55:00	20	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	Endlager 1

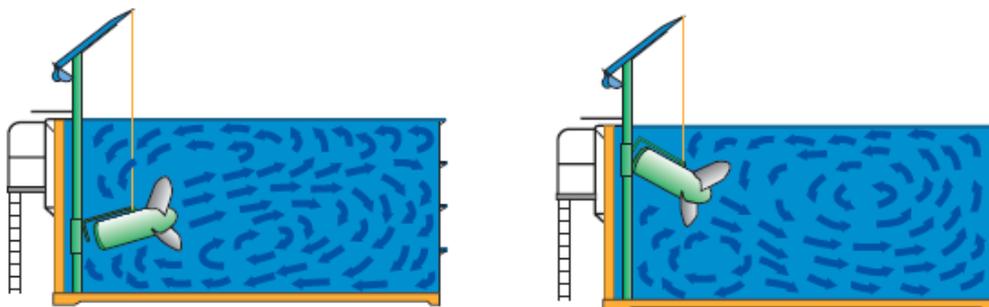
Abbildung 9: Beispiel eines Umpump-Protokolles der Anlage A

Die Biogasanlage besteht aus vier baugleichen Standardbehältern, die in der technischen Ausführung nur Unterschiede bezüglich der Rührtechnik aufweisen. Das nutzbare Fermentervolumen beträgt ca. 2500 m<sup>3</sup>.



**Abbildung 10: Gärstrecke bestehend aus vier Behältern**

In jedem Behälter sind zwei gegenüberliegende Tauchmotorrührwerke (17,0 kW) der Firma Erich Stallkamp installiert. Diese Rührwerke eignen sich für den Einsatz zur Nassvergärung aufgrund der wartungsfreien Bauform. Sie bestehen aus korrosionsfreiem V2A und sind mit 2-Komponenten-Schutzlack beschichtet. Tauchmotorrührwerke sind aufgrund einer aus V2A bestehenden Führungsschiene in der Höhe manuell verstellbar und um 360° drehbar. Somit kann jederzeit individuell auf Schwimm- und Sinkschichten sowie auf Strömungssituationen in jedem Fermenter reagiert werden (s. Abb.11). Die Propellerform erzeugt mit einem Durchmesser von 700 mm und einer Drehzahl von 300 Umdrehungen/min einen guten Flüssigkeitsstrahl.



**Abbildung 11: Einsatz des Tauchmotorrührwerks (Quelle: FA Stallkamp)**



Technische Daten:

- Motorleistung 15 kW
- Dreistufiges Planetengetriebe
- Rührwelle 10 U/min

**Abbildung 12: Paddelrührwerk (Quelle: FA Agrikomp)**

In Kombination zum Tauchmotorrührwerk wird in den ersten drei Behältern zusätzlich ein Paddelrührwerk der Firma Agrikomp eingesetzt. Dieser eignet sich speziell für Substrate mit einem hohen Anteil an faserigen nachwachsenden Rohstoffen. Die vier schräg gestellten Paddel bewirken unterschiedliche Strömungsrichtungen, wodurch die nachwachsenden Rohstoffe und das Gärsubstrat im Fermenter optimal durchmischt werden. Die Vorteile des Paddelrührwerks im Vergleich zu dem Tauchmotorrührwerk bestehen im langsamen, bakterienschonenden Rühren und im geringeren Stromverbrauch. Die Drehzahl liegt bei 10 Umdrehungen pro Minute.

Die Verstromung erfolgt über das Blockheizkraftwerk der Firma Jenbacher (Abb. 13). Es handelt sich um einen Gas-Otto-Motor; die elektrische Leistung beträgt 835 kW<sub>el</sub>.



**Abbildung 13: Blockheizkraftwerk (FA Jenbacher)**

Die Abwärme wird für die Beheizung der Stallanlage, der umliegenden Wohnhäuser und seit 2009 für den Betrieb einer Trocknungsanlage genutzt.

### 3.1.2 Praxisanlage B

Bei der zweiten Praxisanlage handelt es sich um eine baugleiche Biogasanlage, um annähernd die Vergleichbarkeit der Einzelparameter zu erhöhen. Daher wird bei der Anlagenbeschreibung nur auf die wesentlichen Unterschiede zu Anlage A eingegangen.

Anlage B wurde im Dezember 2006 in Betrieb genommen. Es existiert eine Gesamtleistung von 625 kW<sub>el</sub>. Die Biogasanlage besteht aus einem stehenden Fermenter, einem Nachgärer und einem gasdichten Endlager (Abb. 11). Die Rührwerktechnik wird kombiniert aus einem Paddel- und einem Tauchmotorrührwerk.

Als Substrate werden Maissilage, CCM, Putenmist, Grassilage und Hühnertrockenkot eingesetzt. Das Abwärmenutzungskonzept beinhaltet eine Holz Trocknung und Wärmelieferung für Schweinestall und Wohnhaus.



Abbildung 14: Praxisanlage B



Abbildung 15: Fütterungssystem auf Untersuchungsbetrieb B

### 3.1.3 Vergleichsanlagen mit Flüssigmistbeschickung

Um die Biogasanlagen A und B im Verlauf dieser Arbeit mit Anlagentypen, die Flüssigmist einbringen, bezüglich der Prozessstabilität vergleichen zu können, wurden zusätzlich vier Anlagen in das Messprogramm aufgenommen. Diese Anlagen werden mit verschiedenen Typen von Flüssigmist beschickt. Für die Beurteilung der Prozessstabilität und des Gärprozesses wurden nur die analytischen Daten der Gärsubstratuntersuchung hinzugezogen. Eine detaillierte Anlagenbeschreibung wird daher nicht durchgeführt. Alle Anlagen sind annähernd baugleich und befinden sich in einem Leistungsbereich um 500 kW<sub>el</sub>. Der Substanzeintrag der Einzelanlagen pro Jahr wird nachfolgend dargestellt.

Biogasanlage C: 9.000 t nachwachsende Rohstoffe, 3.500 m<sup>3</sup> Schweinegülle, 1000 m<sup>3</sup>, Rindergülle

Biogasanlage D: 9.600 t nachwachsende Rohstoffe, 8.240 t (Gülle und Festmist)

Biogasanlage E: 6.000 t nachwachsende Rohstoffe, 2.125 m<sup>3</sup> Rindergülle

Biogasanlage F: 8.500 t nachwachsende Rohstoffe, 3500 m<sup>3</sup> Schweinegülle

### 3.2 Messkonzept

Um die Anlagen ganzheitlich bewerten zu können, wurden stoffliche, technologische und energetische Parameter erfasst.

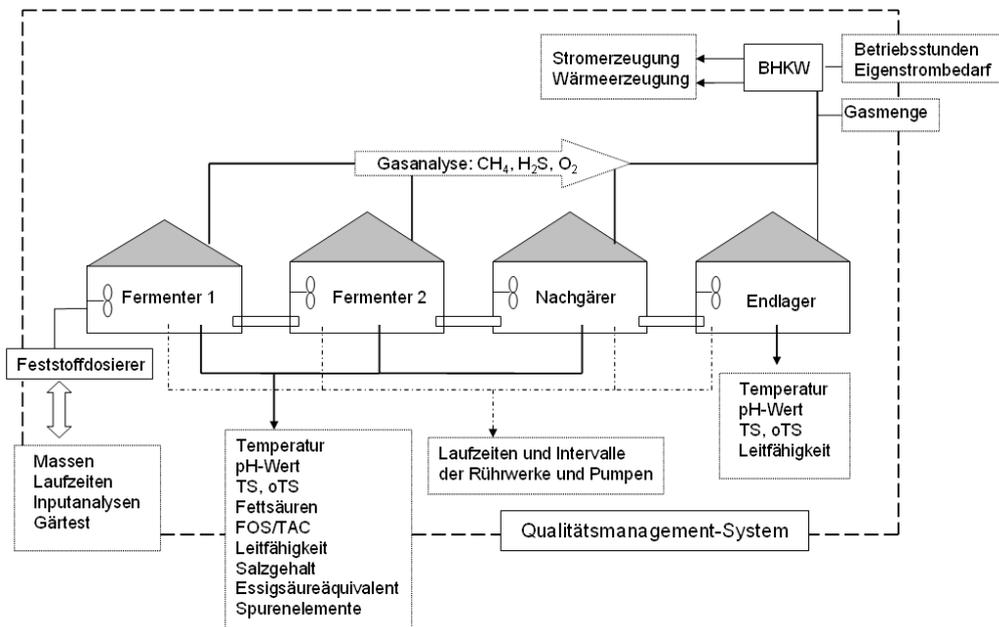


Abbildung 16: Prinzip und Aufbau des Messkonzeptes

### 3.3 Langzeituntersuchung

Um einen kompletten Jahreszyklus der Biogasanlagen abbilden zu können, wurde eine Langzeituntersuchung von 12 Monaten angesetzt. In diesem Zeitraum wurden die Biogasanlagen sowohl messtechnisch als auch analytisch begleitet, um eine Zustandsbeschreibung erarbeiten zu können und spezielle Handhabungsprobleme aufdecken zu können.

#### 3.3.1 Analyse des Gärsubstrates

Die Analysen des Gärsubstrates wurden im 14-tägigen Rhythmus nach den Methoden des Verbands Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) durchgeführt. Dieser Rhythmus wurde gewählt, um die Gärstabilität möglichst genau bewerten zu können.

### pH-Wert

Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte nach der Methode VDLUFA I, A 5.1.1. Hydrolysierende und säurebildende Bakterien bevorzugen ein saures Milieu von einem pH-Wert 4,5 bis 6,3. Essigsäure- und Methanbildner haben ihr Aktivitätsoptimum in einem neutralen Bereich (pH 6,8-8). Liegt der pH-Wert außerhalb des Optimums, wird die Bakterienaktivität langsamer. Der pH-Wert ist zwar einfach messbar, jedoch ist er nicht als alleiniges Instrument zur Prozessüberwachung geeignet, da im Fall einer Versäuerung eine Veränderung des pH-Wertes zu spät eintritt.

### Fettsäuren

Fettsäuren (Butter-, Essig-, Propionsäure) [mg/kg]: Die kurzkettigen Fettsäuren bilden die metabolische Vorstufe zu  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$  und sind somit wichtige Zwischenprodukte des anaeroben Abbaus. In einem stabilen Gärprozess stehen die Produktion und Verstoffwechslung der Fettsäuren im Gleichgewicht. Kommt es zu einer Prozessstörung im Fermenter, z.B. durch Hemmung der Aktivität der methanogenen Bakterien, werden die Fettsäuren nicht weiter zu Methan abgebaut und reichern sich im Fermenter an. Dies kann zu einer Versauerung führen, daher ist eine regelmäßige Analytik besonders wichtig. Die Analyse von Essig-, Propion- und Buttersäure erfolgte nach der Methode: LUFA Nord-West AA 1/3-046.

### Leitfähigkeit

Leitfähigkeit [mS/cm]: Die Leitfähigkeit steht im Zusammenhang zum Salzgehalt im Gärsubstrat. Erhöhte Werte sind jedoch nur bei Abfallanlagen und großen Mengen Festmist als Input festzustellen. Als Untersuchungsmethode wurde die DIN EN 27888 gewählt.

### Trockensubstanz

Der Trockensubstanzgehalt wurde nach der Methode VDLUFA I A 2.1.1 bestimmt. Das Prinzip beruht auf der Trocknung einer nach Gewicht entnommenen Probe bei 105 °C im Trockenschrank. Über den Trocknungsverlust wurde der Wassergehalt des Substrates berechnet und in massenbezogener Prozentangabe (%) dargestellt, wobei alle Ergebnisse auf eine Dezimalstelle gerundet werden.

### organische Trockensubstanz

Zur Ermittlung des Gehaltes an organischer Trockensubstanz wurden die zuvor im Trockenschrank getrockneten Proben im Muffelofen geglüht. Die Bestimmung erfolgte nach der Methode VDLUFA II 9.28, 1976.

### Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N)

Ammonium [Gew.-% FM]: Die Ammoniakkonzentration im Gärsubstrat kann zur Hemmung der Biologie führen. Hierbei sind nicht allein die Konzentration des Ammoniums der hemmende Faktor, sondern auch pH-Werte > 8, die verstärkt zur Umsetzung des Ammoniums zu Ammoniak beitragen.

Die Analyse erfolgt nach der Methode LUFA Nord-West 1/1 B-081.

### FOS/TAC

FOS/TAC: Hier wird das Verhältnis von undissoziierten organischen Säuren zum Carbonatpuffer (TAC = Total Anorganic Carbon) beschrieben. Da der TAC-Wert bei jeder Biogasanlage sehr unterschiedlich sein kann, sind besondere Kenntnisse zur Interpretation wichtig. Zur Bestimmung wurde folgende Methode hinzugezogen:

LUFA Nord-West AA 1B-907.

### Essigsäureäquivalent

Das Essigsäureäquivalent ist der Summenparameter der wasserdampflichen organischen Säuren; gleichbedeutend mit FOS. Die methodische Vorgehensweise zur Bestimmung erfolgte nach dem BGK Methodenbuch, 5. Auflage.

### Salzgehalt

Der Salzgehalt [g] wurde nach der Methode VDLUFA, A 13.4.1 bestimmt

### Spurenelemente

Das Gärsubstrat wurde auf einen Spurenelementmangel überprüft. Analysiert wurden die Elemente Nickel, Kobalt, Molybdän und Selen in allen Fermentern und im Nachgärer bei-

der Anlagen. Die Untersuchungen wurden in dem Zeitraum 20.03. bis 25.03.2009 und 24.06. bis 30.06.2009 von der LUFA Nord-West nach der Methode DIN ISO 17294-2 durchgeführt.

### 3.3.2 Gasanalyse

Die Überprüfung der Gasqualität wird mit einem stationären Gasmessgerät der Firma Ex-Tox durchgeführt, dabei werden im Biogas die Parameter Methan, Schwefelwasserstoff und Sauerstoff alle 30 Minuten erfasst. Mittels IR-Absorption erfolgt die Feststellung des Methangehaltes. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der hohen Messempfindlichkeit

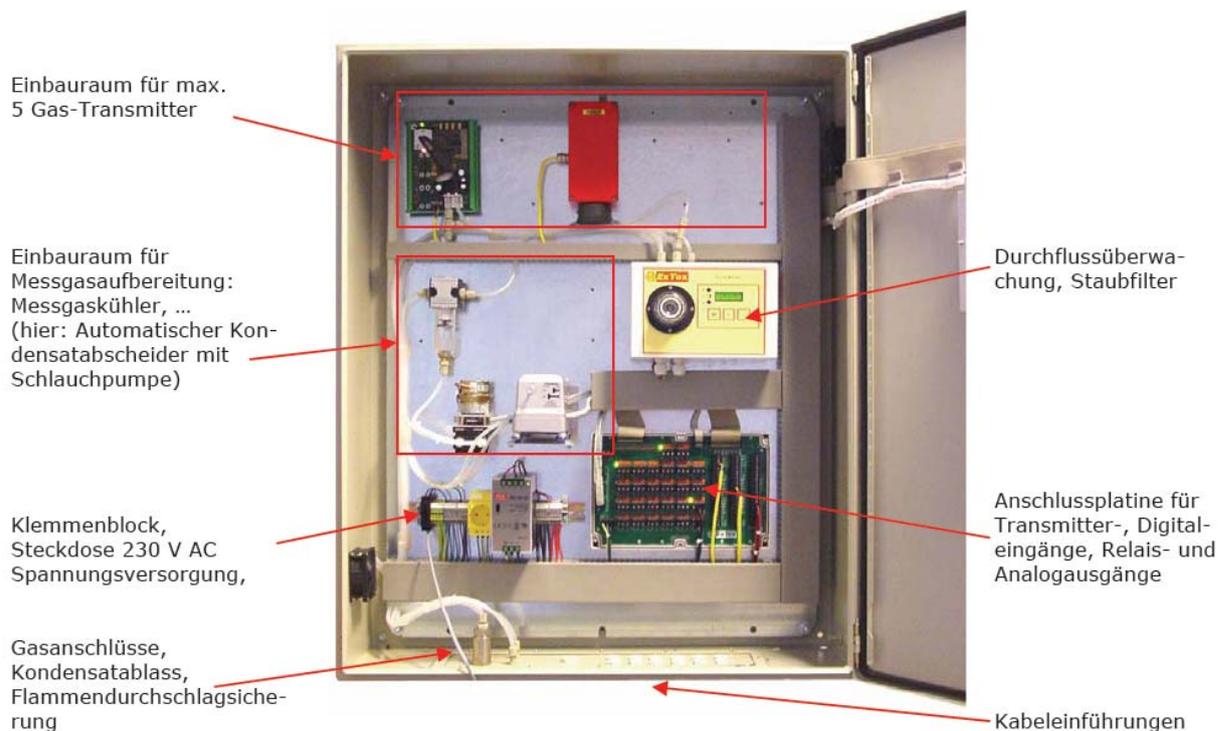


Abbildung 17: Gasanalysegerät (Quelle: FA ExTox)

### 3.3.3 Erfassung technischer und energetischer Parameter

Folgende Messgrößen wurden bestimmt:

Temperatur [°C]: Die Temperatur spielt im praktischen Betrieb einer BGA eine besonders wichtige Rolle, da für die an den Stoffwechselprozessen beteiligten Bakteriengruppen unterschiedliche Temperaturoptima existieren. Messsensoren zur Temperaturermittlung sind im Inneren des Fermenters angebracht.

Tägliche Eintragsmengen [kg/d]: Die eingebrachten Inputmengen wurden mit einer Wiegeeinrichtung genau erfasst und dokumentiert.

Technik: Die Laufzeit und Intervalle des Feststoffdosierers sowie der Rührwerke wurden erfasst um, einerseits den Einfluss auf das Gärsubstrat zu berücksichtigen, andererseits den Anteil am Eigenstrombedarf der Biogasanlage zu ermitteln.

Gasmenge: Die produzierte Gasmenge [m<sup>3</sup>] wurde mittels eines Gasmengenzählers vor dem Blockheizkraftwerk online erfasst.

Leistung: Thermische Leistung [kWh], Elektrische Leistung [kWh] sowie Eigenstromverbrauch [kWh] der Anlage wurden monatlich erfasst. Dabei wird die Leistungsermittlung des Energieabnehmers mit einbezogen. Die Betriebsstunden [h] des Blockheizkraftwerkes werden täglich ermittelt. Somit kann eine genaue Aussage über die Laufzeit bzw. Störungen getroffen werden.

### 3.3.4 Analyse der Inputmaterialien

Die Analysen der Inputmaterialien haben in unregelmäßigen Abständen stattgefunden. In diesem Zusammenhang wurden die Inhaltstoffe der Ausgangsmaterialien bestimmt. Weiterhin wurde die Qualität der Maisilage mit Hilfe von Temperaturmessungen beurteilt. Letztendlich dienten Gärversuche zur Ermittlung des spezifischen Methangehaltes der Einzelsubstrate.

Die Maissilage wird bei beiden Betrieben nicht mit Folie abgedeckt, um sie vor Verderb zu schützen. Daher war es besonders interessant, die Qualität der Silage näher zu betrachten, um so Rückschlüsse auf vermeidbare Energieverluste schließen zu können. Die Qualität der Maissilage wurde mit Hilfe der Temperaturbestimmung mit einem Einstechthermometer in verschiedenen Schichten untersucht. Die Einteilung des Silos in drei Schichten erfolgte in Oben – Mitte – Unten. Dabei wurden die Proben 50 cm oberhalb des Bodens und 50 cm unterhalb der Silooberfläche sowie mittig des Silos entnommen (NUSSBAUM, 2009).

Um die Inhaltsstoffe der Substrate bestimmen zu können, wurde die **Weender Futtermittelanalyse** angewendet. Es wird nach Rohasche (XA), Rohfaser (XF), Rohprotein (XP), Rohfett (XL) und stickstofffreien Extraktstoffen (NfE) unterschieden; wobei die Ergebnis-

se auf die Trockenmasse bezogen werden. Zunächst wird ein Teil der Probe eines Futtermittel erwärmt ( $\sim 105^\circ\text{C}$ ). Durch diesen Prozess wird der Probe das Rohwasser entzogen, aber auch flüchtige organische Verbindungen wie Ammoniak, Alkohole, Essigsäuren. Übrig bleibt die Trockenmasse. In der nachfolgend gewonnenen Trockenmasse befinden sich die essenziell verwertbaren Nahrungsbestandteile wie Eiweiße und Fette.

Zur Ermittlung des Rohaschegehaltes wird die Probe in einem Muffelofen über längere Zeit auf  $550^\circ\text{C}$  erhitzt. Dadurch werden alle organischen Bestandteile verbrannt und es bleibt die Rohasche übrig. Das sind in Abhängigkeit von der Probe v. a. Mineralstoffe und Sand. Der Wert Gesamtmasse des Futtermittels abzüglich des Werts der Rohasche ist die organische Masse (OM). Die organische Masse setzt sich aus Rohprotein, Rohfaser, Rohfett und NfE zusammen.

Der Rohfettgehalt ist der Teil des Futtermittels, der sich in Fettlösungsmitteln löst.

Der Rohproteingehalt ergibt sich aus der Summe aller Verbindungen, die Stickstoff enthalten. Meistens wird zur Bestimmung des Anteils zunächst der Stickstoffgehalt der Probe ermittelt (z. B. durch Kjeldahlsche Stickstoffbestimmung). Anschließend wird das Ergebnis mit einem Faktor multipliziert, der den reziproken Wert des typischen N-Gehaltes von Rohprotein darstellt. Dieser beträgt üblicherweise 6,25 (pflanzliches Protein) bzw. 6,38 (tierisches Protein).

Unter „Rohfaser“ ist derjenige Anteil eines Futtermittels zu verstehen, der nach Behandlung mit verdünnten Säuren und Laugen als „unverdaulicher“ Bestandteil zurückbleibt. Hauptbestandteil dieser Stoffklasse ist die Cellulose.

Der Gehalt an Stickstofffreien Extraktstoffen (NfE) wird durch Berechnung bestimmt: Von der organischen Masse werden Rohfett, Rohprotein und Rohfaser abgezogen, der Rest ist NfE. Dies sind lösliche Zucker, Stärke, Pektine und organische Säuren.

### **3.3.5 Gärversuche**

Die Gärtests wurden am Institut für Pflanzenernährung der Universität Bonn durchgeführt. Zum einen wurden Gärversuche mit den Maissilagen beider Anlagen über einen Zeitraum von 32 Tagen durchgeführt, zum anderen wurde das Gärrestpotenzial aus dem Endlager bestimmt (68 Tage). Diese Tests wurden im so genannten Batchfermenter in 3-facher Wie-

derholung durchgeführt. Bei dem Batchverfahren wird der Fermenter komplett mit Substrat gefüllt, in diesem Fall mit dem zu untersuchenden Substrat und Klärschlamm, und anschließend luftdicht verschlossen. Das Substrat bleibt bis zum Ende der gewählten Verweilzeit in dem Behälter, ohne dass Substrat entnommen oder zugefügt wird.



**Abbildung 18: Gärversuch im Batchfermenter**

Für den Gärtest wurden 120 g Maissilage eingewogen, die mit 3 l Klärschlamm in den Behälter gegeben wurden. Der Gärtest diente zur Bestimmung des Gasertrages und wurde auch mit weiteren Substraten wie Grassilage, Hähnchenmist und Rindermist durchgeführt. Zusätzlich hat eine Beprobung des Silos aus verschiedenen Schichten stattgefunden, die gezogenen Proben wurden ebenfalls für einen Gärtest verwendet, um Rückschlüsse auf Gasausbeuten bezogen auf die Silagequalität ziehen zu können.

Zur Bestimmung des Gärrestpotenzials wurde der Gärrest aus dem Endlager entnommen. Für diesen Versuch wurden 2000 g Gärrest und 1 l Klärschlamm benötigt.

Die Gasanalyse erfolgte mit dem Gasanalysegerät Visit 03 zur Bestimmung des Methan- und CO<sub>2</sub>-Gehaltes sowie des Gasvolumens.

### **3.3.6 Datenaufzeichnung**

Die Datenaufzeichnung erfolgte über die betriebseigene Steuerungssoftware. Dabei handelt es sich um eine SPS-Steuerung der Firma Siemens, die mit der Steuerungssoftware der Firma RWH verbunden ist. Der gesamte Biogasprozess lässt sich über diese Software überwachen und steuern. Eine weitere Aufgabe ist die automatische Dokumentation sämtlicher Abläufe, wodurch die Anforderungen der Rückverfolgbarkeit erfüllt werden. Die Steuerung kann nicht nur vor Ort, sondern auch extern durchgeführt werden.

Aufgezeichnet wurden im 30 Minutentakt die Werte der Gasanalyse wie Methan, Schwefelwasserstoff und Sauerstoff sowie die Temperaturen der einzelnen Fermenter, der Gasdurchfluss, die Leistung des Blockheizkraftwerkes und die BHKW-Raumtemperatur. Ab dem 04.11.2008 fiel die Gasmengenmessung der Biogasanlage A aus technischen Gründen aus, so dass ab diesem Zeitpunkt keine Daten mehr zur Verfügung standen. Bei der Biogasanlage B wurde durch die Steuerung aus den vorhandenen Daten automatisch der Wirkungsgrad errechnet und dokumentiert.

Alle Messwerte wurden anschließend in eine Datenbank (Access) übertragen und dort verwaltet.

### **3.3.7 Störfallanalyse**

Die Störfälle und Alarmer werden auch über die Steuerungssoftware erfasst. Auftretende Alarmmeldungen werden über ein Telefonwahlgerät an die zuständigen Mitarbeiter weitergeleitet. Es wird dokumentiert, wann eine Warnung oder ein Alarm eingegangen ist und wann der gemeldete Fehler beseitigt wurde.

## **3.4 Optimierungsprozess**

Als Optimierungsmethode fand der DLG Qualitätsstandard für Biogasanlagen Anwendung, welcher durch den Katalog der Mindestanforderungen und der zugehörigen Checklisten beschrieben wird. Basierend auf dieser Grundlage wurde ein betriebseigenes Qualitätsmanagement-Handbuch entwickelt. Dieses Handbuch ist eine vollständige Qualitätsmanagementdokumentation und beinhaltet gleichzeitig die Maßnahmen zur Sicherung und Verbesserung der Qualität im Betrieb. Weiterhin werden die Verantwortung und Zuständigkeit von Mitarbeitern sowie die Planung, Durchführung und Lenkung von Prozessen beschrieben. Der Aufbau des Qualitätsmanagement-Handbuches erfolgt nach der ISO 9001. Ohne dessen Anwendung kann von Optimierung keine Rede sein.

Das QM-Handbuch bildet die methodische Grundlage für das Audit und wird daher im Kapitel „Material und Methoden“ vorgestellt.

---

### **Optimierung durch angewandtes Qualitätsmanagement**

Das Qualitätsmanagementsystem soll eine Optimierung der Biogasanlagen durch strukturierte Planung und kontinuierliche Verbesserungsprozesse (KVP) bewirken. Auf der Basis eines Kriterienkataloges mit beschriebenen Mindestanforderungen und Rahmenrichtlinien soll eine Zustandsbeschreibung der Anlage erfasst werden, um anschließend einzelne Betriebsparameter optimieren zu können. Das Hauptanliegen des Standards bezieht sich auf die Optimierung von Prozessen der Verfahrenstechnik, des Umweltschutzes, der menschlichen Kompetenz, der betrieblichen Transparenz und der Wirtschaftlichkeit auf Grundlage der Methode des Qualitätsmanagements. Ein Verbesserungsprozess kann nur durch die Entwicklung von mittel- und langfristigen Zielen erreicht werden und den Anlagenbetreiber durch darauf aufbauende Struktur- und Prozessoptimierung unterstützen. Die Aufgabenbereiche des Qualitätsstandards werden wie folgt definiert (MÖLLER, 2008):

- Erstellung eines Qualitätsmanagementhandbuches;
- Management mit Festlegung von Zielen und Planungen.

### 3.5 Erstellung eines QM-Handbuches

#### 3.5.1 Firmenportrait und Qualitätspolitik

##### Unternehmensbeschreibung und Tätigkeitsfelder

Das Unternehmen wurde am 01. November 2005 gegründet.

Das Aufgabenfeld des Unternehmens umfasst die Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen zu Strom, Wärme und Düngemitteln. Dazu wird eine Biogasanlage als Trockenfermentationsanlage mit jeweils 835 kW<sub>el</sub> Leistung betrieben. Insgesamt werden pro Jahr ca. 14.500 t Maissilage, 400 t Hähnchenmist und 500 t Getreide verarbeitet. Abnehmer der Produkte sind Energieversorgungsunternehmen, Gewerbebetriebe sowie landwirtschaftliche Betriebe.

##### Geltungsbereich QM-System

Als Produzent von Strom, Wärme und Düngemittel aus Biomasse ist sich die Biogasanlage ihrer Verantwortung für die Versorgungs- und Umweltsicherheit bewusst. Aus diesem Grunde wurde ein Qualitätssystem nach dem DLG QMS – Biogas aufgebaut. Das Qualitätssystem umfasst den gesamten Bereich der Verarbeitung von Biomasse im Biogasprozess. Der Prozess beginnt ab dem Zeitpunkt der Substratannahme und endet ab dem Zeitpunkt der Übergabe des Stroms an das EVU, der Wärme an den Abnehmer und der Ausbringung des Gärrestes. Das QM – System bezieht sich auf eine 835 kW<sub>el</sub> Anlage.

##### Kundenkreis und Produkte

Energieversorgungsunternehmen → regenerativen Strom

Landwirtschaftliche Betriebe → Düngemittel

Sauenstall, Landhandel und Wohnhäuser → Wärme

Gesellschaft → Umweltschutz

##### Kundenorientierung

In erster Linie erwarten die Kunden eine zuverlässige Belieferung mit regenerativ erzeugten Produkten definierter Qualität zu einem festgesetzten Preis. Gerade in heutiger Zeit ist

es für Unternehmen wichtig Kosten einzusparen, auf zuverlässige Partner zurückgreifen zu können und ihr Firmenimage hinsichtlich ihrer Verantwortung für die Umwelt zu pflegen. Den Ansprüchen der Kunden möchte man gerecht werden. Aus diesem Grund wird darauf geachtet, den Kunden eine hohe Versorgungssicherheit und Transparenz bei der Erzeugung regenerativer Produkte zu gewährleisten.

### Organisation

Zur Umsetzung der Unternehmensprozesse und des QM-Systems steht unter der Verantwortung der Geschäftsleitung. Zur Einführung des Qualitätsmanagementsystems wurde externes Personal verpflichtet.

### Qualitätspolitik und Ziele

Das Unternehmen ist sich seiner Verantwortung für die Versorgungs- und Umweltsicherheit gegenüber der Kunden bewusst. Mit Hilfe des eingeführten QM-Systems wird es ermöglicht, die Unternehmens- bzw. Qualitätsziele zu realisieren. Für unser Unternehmen ist es eine Selbstverständlichkeit, ein positives Verhältnis zu den Nachbarn zu erhalten. Hierfür werden bei Interesse Führungen und Schulungen auf der Biogasanlage angeboten um die Bioenergiebranche und das Prinzip der Biogasanlagen positiv darzustellen.

So werden die einzelnen Abläufe nicht nur dokumentiert, sondern darüber hinaus überwacht und analysiert, so dass sie stets den eigenen Anforderungen und den Anforderungen des Kunden entsprechen.

Aufbauend auf der Qualitätspolitik, den langfristigen und strategischen Zielen werden von der Geschäftsleitung auf Grundlage der Ergebnisse der internen Audits, sowie weiteren Informationsquellen die konkreten Qualitätsziele für das Unternehmen abgeleitet und schriftlich festgelegt.

Zur Erreichung der Qualitätsziele werden im Rahmen des ökonomisch machbaren, entsprechende Aktivitäten und Ressourcen bereitgestellt.

Die Qualitätsziele für das Jahr 2009 sind folgende:

- 1.) Im Betriebsjahr 2009, Stichtag ist der 31.12.2009, 8000h Volllaststunden zu erreichen.
- 2.) Einführung des DLG Qualitätsmanagementsystems in 2009, Erlangung des 2 – jährigen Auditrhythmus.

- 3.) 100 % der verfügbaren Wärme verwerten, in Form der Getreidetrocknung, der Sauenhaltung und der Wohnhäuser.
- 4.) Umsetzung der Erkenntnisse aus einem intensiven Messprogramm zur installierten Verfahrenstechnik.

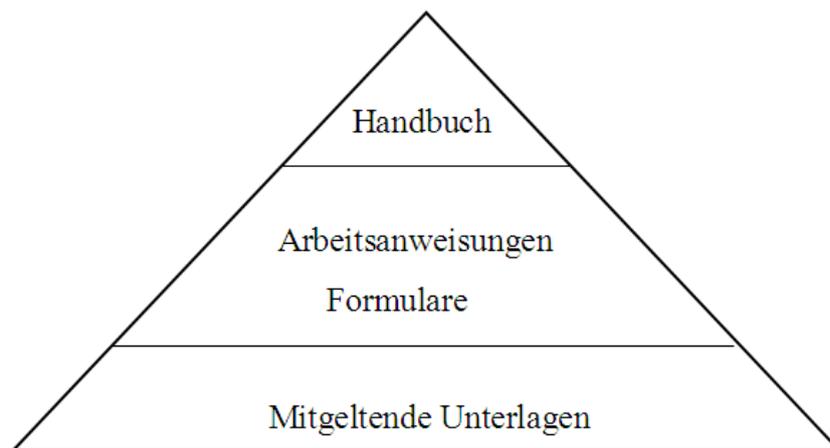
### Qualitätsmanagementsystem

Das QM-System basiert auf dem DLG QMS Biogas. Das QM-Handbuch ist prozessorientiert aufgebaut und dient der Dokumentation des QM-Systems.

Anforderungen, die sich durch das QM-System an das Unternehmen stellen sowie besondere Anforderungen von den Kunden werden mit Hilfe dieses QM-Systems umgesetzt und dokumentiert.

Der Standard soll den Betreiber in erster Linie in der täglichen Praxis beim Betrieb der Anlage unterstützen. Durch die damit verbundene Ausarbeitung der mittel- und langfristigen Ziele des Betreibers wird der angestrebte kontinuierliche Verbesserungsprozess (KVP) gefördert. Der Standard bietet mit Hilfe von eindeutigen Indikatoren den Einstieg in eine Ist-Analyse und gibt Anstöße und Motivation für die Optimierung von Prozessen und Strukturen.

### Aufbau und Aktualisierung Qualitätsmanagementsystem



**Abbildung 19: Aufbau der QM-Dokumentation**

Das QM-Handbuch enthält:

- die Qualitätspolitik und die Qualitätsziele des Unternehmens,
- die Organisation des Unternehmens,
- die regelmäßige Prüfung des Qualitätsmanagementsystems,
- die Beschreibung aller qualitätsrelevanten Prozesse, Dokumente und Daten.

Die Erstellung der QM-Dokumentation erfolgt durch die Geschäftsleitung. Gleichzeitig ist jene für die Freischaltung und dem Änderungsdienst der QM-Dokumentation verantwortlich. Die Lenkung von Dokumenten, Daten und Qualitätsaufzeichnungen wird wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, geregelt.

#### Verantwortung der Leitung

Die Geschäftsführung verpflichtet sich:

- die für den Betrieb der Anlage verbindlichen Gesetze zu erkennen, einzuhalten und stets zu aktualisieren.
- die Prozesse zu definieren, zu überwachen und auf Grundlage der Ergebnisse permanent zu verbessern.
- die Anforderungen der Kunden genau zu analysieren und diese bestmöglich zu erfüllen. Dazu ist ein kontinuierlicher Austausch mit den Kunden erforderlich.
- festgestellte Fehler strukturiert abzarbeiten und aufgrund der festgelegten Maßnahmen ein erneutes Auftreten zu verhindern.
- auf Grundlage der Qualitätspolitik messbare Ziele zu definieren und schriftlich festzuhalten.
- die Auswirkungen des Betriebes der Biogasanlage umweltverträglich zu gestalten.
- die Mitarbeiter über die Inhalte der Qualitätspolitik und die Ziele des Unternehmens zu informieren und das Qualitätsbewusstsein zu fördern.

#### Management von Ressourcen

Zur erfolgreichen Umsetzung des QM-Systems und dem Erreichen der Kundenzufriedenheit werden von der Geschäftsleitung die erforderlichen strukturellen und personellen Rahmenbedingungen geschaffen.

#### Personalmanagement:

Der Erfolg des Unternehmens und die Zufriedenheit der Kunden hängen im entscheidenden Maße von qualifizierten, kompetenten, informierten und motivierten Mitarbeitern ab. Die Biogasanlage wird ausschließlich von dem Betriebsleiter betreut, so dass hier im eigenen Interesse entsprechend gearbeitet wird. Als Stellvertreter für alltägliche Tätigkeiten sind zwei Mitarbeiter einer benachbarten Biogasanlage definiert.

#### Management der Mittel:

Der Betriebsleiter ermittelt den Bedarf und plant in Absprache mit der Geschäftsleitung die Anschaffung und Aufrechterhaltung der Mittel, die zur Durchführung der Tätigkeiten und zur Erfüllung der Produkthanforderungen notwendig sind. Zu diesen Mitteln zählen:

- Biogasanlage,
- Substrate,
- EEG und Biomasse VO konforme Zusatzstoffe,
- Betriebsmittel für technische Anlagen,
- unterstützende Dienstleistungen, z.B. Analytik und Beratung, etc..

### 3.5.2 Prozesse

Die Prozesse des Unternehmens teilen sich auf in Kernprozesse und unterstützende Prozesse. Als Kernprozesse werden folgende Prozesse definiert:

- Substratannahme
- Substrateintrag
- Gärstrecke
- Gasaufbereitung
- Gasverwertung
- Verwertung Gärrest
- Instandhaltung

Die unterstützenden Prozesse werden im nächsten Kapitel erläutert (Kapitel 3.5.3).

### Substratannahme

Die Substratannahme umfasst die Gewichtserfassung, die Prüfung auf Genehmigungskonformität und die Beprobung von eingehenden Substraten.

### Substrateintrag

Der Substrateintrag umfasst die Beschickung des Substrateintrags, die Sichtprüfung des Substrates auf Verunreinigungen während der Beschickung, die Beseitigung von ggf. entdeckten Verunreinigungen und die Beschickung des Fermenters.

### Gärstrecke

Die Gärstrecke umfasst die Steuerung der beiden Fermenter und des Nachgärers auf Basis vorhandener Prüf- und Messmittel sowie Analyseergebnissen und die Behebung von Störungen der Gärstrecke.

### Gasaufbereitung

Die Gasaufbereitung umfasst die Entschwefelung und Gastrocknung sowie die Störungsbehebung bei Abweichungen.

### Gasverwertung

Die Gasverwertung umfasst die Behebung von Störungen des Blockheizkraftwerkes oder der Gasfackel.

### Verwertung Gärrest

Die Verwertung von Gärresten umfasst die Vorbereitung der Abgabe von Gärresten und die Abgabe von Gärresten selbst.

### Instandhaltung

Die Instandhaltung umfasst die Wartung der Biogasanlage, die Durchführung technischer Veränderungen und den Umgang mit technischen Störungen.

### **3.5.3 Unterstützende Prozesse**

Unterstützende Prozesse sind Prozesse, die für ein optimales Funktionieren der Kernprozesse notwendig sind. Im Einzelnen sind dies:

- Lenkung Dokumente, Daten und Qualitätsaufzeichnungen,
- Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit,
- Hygiene,
- Risikomanagement (betriebliches Eigenkontrollsystem),
- Wartung, Instandhaltung und Störungen,
- Weiterbildung.

#### **Lenkung der Dokumente, Daten und Qualitätsaufzeichnungen**

Alle qualitätsrelevanten Dokumente und Daten stehen rechtzeitig den erforderlichen Stellen zur Verfügung und kommen nur in ihrer neuesten und gültigen Fassung zur Anwendung. Alle im Rahmen des QM-Systems verwendeten Dokumente und Daten sind schriftlich festgelegt. Sie unterliegen einem Revisionsverfahren und werden vor ihrer Freigabe geprüft. Dieses liegt im Verantwortungsbereich der Geschäftsleitung.

Der Änderungsstand eines Dokuments ist an der Versionsnummer erkennbar. Das gültige Dokument hat immer die höchste Versionsnummer. Das „Gültig ab“-Datum gibt das Datum an, ab dem diese Version des Dokumentes im Unternehmen Gültigkeit hat.

Die Geschäftsleitung ist für die Erstellung und Aktualisierung des QM-Handbuches verantwortlich. Das QM-Handbuch ist in einzelne Kapitel unterteilt, die mit Version und Gültigkeitsdatum versehen sind. Die Versionen der einzelnen Kapitel werden durch Unterschrift auf dem Inhaltsverzeichnis freigegeben. Bei Änderungen wird das Inhaltsverzeichnis überarbeitet und von der Geschäftsleitung neu freigegeben.

Formulare/Formblätter werden von der Geschäftsleitung geprüft und freigegeben. Die Freigabe erfolgt durch Unterschrift auf dem Inhaltsverzeichnis des QM-Handbuches. Jeweils ein gültiges Exemplar der Formulare ist im QM-Handbuch enthalten.

Alle QM-Dokumente sind immer auf aktuellem Stand zu halten und bei Änderungen, z.B. Änderungen von gesetzlichen Bestimmungen, anzupassen. Hierbei ist Folgendes zu beachten:

- alle Änderungen bedürfen der Zustimmung der Geschäftsleitung,
- auch bei kleinen Änderungen wird das gesamte Dokument neu erstellt,
- das Inhaltsverzeichnis wird aktualisiert,
- die Dokumente werden freigegeben.

Es ist zu prüfen, ob das QM-Dokument Auswirkungen auf andere Dokumente hat. Diese Dokumente sind ebenfalls entsprechend zu aktualisieren.

Das Original des ungültigen Dokuments wird als ungültig gekennzeichnet und unter „ungültige Dokumente“ abgelegt. Alle anderen Versionen werden aus dem Verkehr genommen und vernichtet.

### **Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit**

Für die Produkte, die von der Biogasanlage verarbeitet und erzeugt werden, kann jederzeit eine Rückverfolgbarkeit gewährleistet werden.

Sollten die Produkte nicht den Anforderungen des EEG oder den mikrobiologischen Mindestanforderungen des Biogasprozesses genügen, wird eine Annahme verweigert und entsprechend dokumentiert.

Die Verarbeitung von Biomasse im Biogasprozess ist vom Lieferanten der nachwachsenden Rohstoffe bis zum Abnehmer des Stroms, der Wärme und des Düngers rückverfolgbar zu gestalten. Zu jeder Lieferung gibt es die notwendigen Begleitpapiere: Lieferscheine bzw. Wiegescheine mit Angaben zum Produkt, Lieferanschrift, Lieferdatum.

Bei der Annahme der nachwachsenden Rohstoffe wird eine sensorische Prüfung durchgeführt, um grobe Mängel festzustellen. Zusätzlich wird bei Bedarf ein Probemuster gezogen und durch ein akkreditiertes Labor analysiert.

Die Abgabe von Strom und Wärme wird über kalibrierte Messinstrumente dokumentiert. Die abgegebene Gärrestmenge wird über Ausgangslieferscheine schriftlich festgehalten. Zusätzlich wird der Dünger zweimal jährlich hinsichtlich seiner Inhaltsstoffe analysiert, die Ergebnisse werden ebenfalls auf den Ausgangslieferscheinen vermerkt.

## **Hygiene**

Die Biogasanlage und das zugehörige Betriebsgelände werden in einem ordnungsgemäßen Zustand gehalten. Alle Grünflächen werden regelmäßig gemäht und es wird kein Unrat auf dem Gelände gelagert. Die technischen Bestandteile der Biogasanlage werden bedarfsgerecht gereinigt. Für das Personal ist ein Aufenthaltsraum mit Toilette bei der benachbarten Getreidetrocknung vorhanden. Des Weiteren existiert ein Schädlingsbekämpfungsvertrag mit der Firma DesFa. Der Weg vom Silostock zum Feststoffeintrag wird täglich nach dem Füttern mit der Schaufel vom Radlader gereinigt. Der Bereich um die Zapfstelle des Gärrestlagers wird nach dem versehentlichen Auslaufen des Gärrestes mit einem Besen gereinigt.

## **Risikomanagement**

Zur Gewährleistung der Qualität und Sicherheit der Produkte, wurde ein Eigenkontrollsystem implementiert. Dieses Eigenkontrollsystem setzt sich folgendermaßen zusammen:

- Analyse der potentiellen Risiken für den Biogasprozess,
- Analyse der potentiellen Risiken für die Umwelt,
- Identifizierung der Punkte in den Prozessen, an denen Risiken auftreten können,
- Festlegung, welche dieser Punkte für die Sicherheit der Produkte/des Biogasprozess kritisch sind,
- Festlegung, welche dieser Punkte für die Umwelt kritisch sind,
- Festlegung und Durchführung wirksamer Prüf- und Überwachungsverfahren für diese kritischen Punkte,
- Überprüfung der Gefährdungsanalyse, der kritischen Kontrollpunkte und der Prüf- und Überwachungsverfahren in regelmäßigen Abständen und bei jeder Änderung der Prozesse.

Das Risikomanagement ist in Kapitel 4.5 detailliert beschrieben.

## **Wartung, Instandhaltung und Störungen**

Die einwandfreie Funktionsweise der betrieblichen Technik wird durch die Geschäftsleitung gewährleistet. Bei Störungen werden umgehend Maßnahmen ergriffen, um diese zu beheben und ein wiederholtes Auftreten möglichst zu verhindern. Störung und Maßnah-

men werden auf dem Formular FB Fehlerbehebung dokumentiert. Alle Störungsmeldungen der Biogasanlage werden vom Steuerungscomputer gespeichert. Zusätzlich werden alle BHKW-Störungen auf den Formblättern des BHKW-Herstellers dokumentiert. Sämtliche Wartungs- und Inspektionsarbeiten werden nach dem Wartungs- und Instandhaltungsplan erledigt.

## **Weiterbildung**

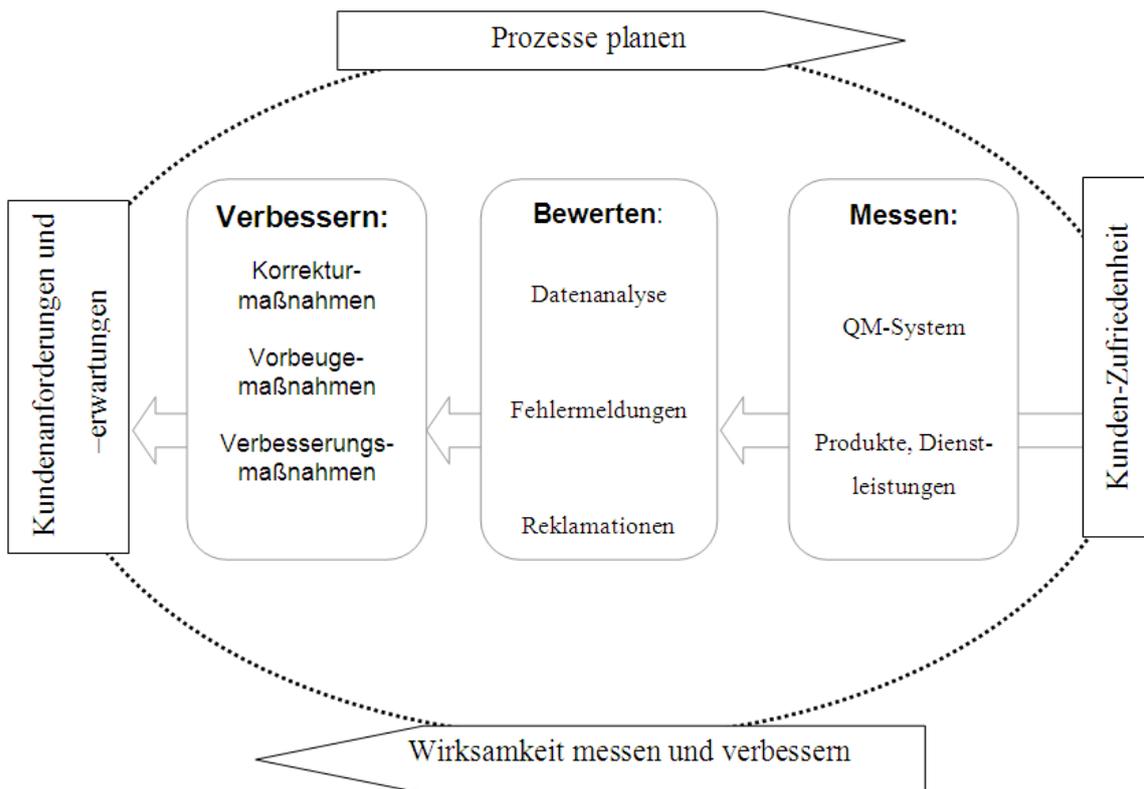
### Regelmäßige Weiterbildung

Der Betriebsleiter ist aufgrund seiner Ausbildung als Landwirt und seiner langjährigen Berufserfahrung als selbstständiger Landwirt mit einem Milchviehbestand für die technische Leitung einer Biogasanlage auf Basis nachwachsender Rohstoffe qualifiziert. Zudem wurde er vor und während der Inbetriebnahme der Biogasanlage durch den Anlagenbauer im Umgang mit der Anlagentechnik sowie dem Biogasprozess mehrtägig geschult. Seine Erfahrungen und sein Wissen für den täglichen Umgang mit den Maschinen teilt er seinen Stellvertretern mit. Nachweislich werden sämtliche Schulungen auf dem Formblatt Schulungsnachweis dokumentiert. Neue Mitarbeiter werden hinsichtlich der Themen Unfallverhütungsvorschriften, Hygienevorschriften, Unternehmenspolitik und den arbeitsplatzspezifischen Tätigkeiten unterwiesen.

### **3.5.4 Messung, Bewertung und Verbesserung**

Eine ständige Verbesserung des QM-Systems und der einzelnen Prozesse setzt die regelmäßige Messung und Analyse voraus.

Um den Prozess zu verbessern, müssen Vorbeugemaßnahmen eingehalten und Verbesserungs- sowie Korrekturmaßnahmen durchgeführt werden. Eine Datenanalyse, Auswertung von Fehlermeldungen und Berücksichtigung von Kundenanforderungen dienen der Bewertung des Prozesses. Gemessen und bewertet wird die Wirksamkeit des QM-Systems hauptsächlich durch Interne Audits, Einhaltung der Anforderungen an unsere Produkte und Nebenprodukte sowie die Messung der vom Standard geforderten Parameter (Störfällen, Fehler, Betriebstagebuch).



**Abbildung 20: Darstellung des Prozesses der Messung, Bewertung und Verbesserung von Leistungen**

### **Kundenzufriedenheit und Reklamationen**

Die Zufriedenheit der Kunden wird insbesondere durch Rückmeldungen von Kunden gemessen.

Kundenbeschwerden und Reklamationen werden zunächst erfasst und analysiert. Aus den Daten und Informationen werden Korrektur- und Vorbeugemaßnahmen bzw. Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet.

Reklamationen die an Lieferanten gingen werden ebenfalls mit dem Formblatt Reklamationen bearbeitet. Dies können zum Beispiel fehlerhafte Bauteile, das Nichteinhalten von Liefer- oder Reparaturterminen oder schlechte Dienstleistungen von Externen sein.

---

### **Analysen und Kontrollen der Produkte**

Alle Rohwaren, die für den Biogasprozess genutzt werden, unterliegen einer sensorischen Kontrolle am Wareneingang. Zusätzlich wird eine Probe pro Schlag genommen und in einer Mischprobe durch ein akkreditiertes Verfahren (LUFA Nord-West) analysiert. Kontrolliert werden insbesondere TS-Gehalte sowie mögliche Verunreinigungen und Qualitätsmängeln. Rohstoffe, die sensorisch nicht die Anforderungen für den Biogasprozess erfüllen oder im Widerspruch zum EEG stehen, werden nicht verarbeitet.

Zweimal jährlich, kurz vor der Ausbringung, wird der Gärrest hinsichtlich seiner Inhaltsstoffe und des TM-Gehaltes analysiert (LUFA Nord-West). Nachfolgend sind die vom DLG QMS Biogas geforderten zu messenden Parameter und darüber hinaus von der Biogasanlage gemessene Parameter aufgelistet.

Sämtliche technischen Daten werden mittels der betriebseigenen EDV ermittelt und je nach Parameter händisch oder elektronisch ausgewertet. Die biologischen Parameter werden über LUFA Nord-West und mit eigenen Messmitteln bestimmt.

Tabelle 8: Messparameter

Prozessschritt	Parameter	Messpunkt	Häufigkeit gemäß DLG QMSB	Häufigkeit im Unternehmen
<b>Substratanahme</b>	Substrat	Lieferschein	täglich	täglich
	Menge (t)	Fahrzeugwaage	täglich	täglich
	TS-Gehalt (%)	Substratprobe	Je Charge	Je Charge
	Substratqualität	Substratprobe	Je Charge	Je Charge
	oTS-Gehalt (%)	Substratprobe	1 Stichprobe je Substrat und Jahr	1 Stichprobe je Substrat und Jahr
<b>Substrateintrag</b>	Substratgemisch	Fahrzeugwaage/ Teleskopladerschaukel	täglich	täglich
	Fütterungsintervall u. - dauer (h)	Motor Zuführeinrichtung	täglich	kontinuierlich
	Fütterungsmenge	Motor Zuführeinrichtung	täglich	kontinuierlich
<b>Fermenter</b>	Füllstand (%)	Schauglas (visuell)	1x täglich	1x täglich
	Schwimmschicht	Schauglas (visuell)		1x täglich
	Temperatur (°C)	Temperaturfühler	1x täglich	kontinuierlich
	Rührintervalle u. dauer	Fermenter	täglich	kontinuierlich
	Viskosität (A)	Motor <u>Rührwerk</u>	1x wöchentlich	nicht regelmäßig
	TS-Gehalt (%)	<u>Substratprobe</u>	1x wöchentlich bis 1x	14 - tägig
	Organische Säuren	<u>Substratprobe</u>	monatlich	14 - tägig
	FOS/TAC	<u>Substratprobe</u>	Täglich - wöchentlich	14- tägig
	pH-Wert	Substratprobe	1x monatlich	14- tägig
	NH4	Substratprobe	1x monatlich bei viel Protein	14- tägig
Gasmenge (m³)	Gasspeicher/Gasleitung	<u>Immer</u>	kontinuierlich	
Gaszusammensetzung	Gasleitung	CH4,CO2,O2,H2S	(CH4, O2, H2S)	
<b>BHKW</b>	Gasmenge (m³)	Gasleitung		kontinuierlich
	Laufzeit (h)	Motorsteuerung		kontinuierlich
	Elektrische Leistung	Generatorsteuerung		kontinuierlich
	Thermische Leistung	Wärmeleitung		kontinuierlich

### **Prüf- und Messmittel**

Die Erfassung der ein- und ausgehenden Substrat- und Gärrestmengen erfolgt über die betriebseigene geeichte Brückenwaage. Die Abgabeeinrichtungen für Strom und Wärme sind ebenfalls geeicht.

Im Biogasprozess werden im wesentlichen Prüf- und Messmittel zur Mengenbestimmung der Substrat- und der Gasmengen, zur Qualitätsmessung des erzeugten Gases und zur Beurteilung der Prozessstabilität eingesetzt. Alle im Biogasprozess eingesetzten Prüf- und Messmittel sind kalibrierfähig und werden soweit keine anders lautenden Herstellerempfehlungen bestehen einmal jährlich kalibriert.

### **Lenkung fehlerhafter Produkte**

Die Biogasanlage nimmt nachwachsende Rohstoffe auf, verarbeitet sie über den Biogasprozess und vermarktet die entstehenden Produkte Strom, Wärme und Düngemittel. Werden bei Warenannahme Qualitätsmängel oder Widersprüche zum EEG festgestellt, wird die Annahme verweigert. Sollten bereits fehlerhafte Rohstoffe verarbeitet worden sein, werden die Kunden umgehend informiert und ein weiteres Vorgehen abgestimmt. Fehlerhafte bereits angenommene nachwachsende Rohstoffe und daraus eventuell resultierende Produkte werden durch den Lieferanten an der Biogasanlage abgeholt oder auf dessen Kosten durch Dritte entsorgt.

Für die Dokumentation fehlerhafter Rohstoffe und Produkte wird das Formular zur Reklamation verwendet.

Möglichkeiten zur Verwendung und Korrekturmaßnahmen für fehlerhafte Produkte:

- Ablehnung bei Rohwarenmängeln und Widersprüchen zum EEG,
- Ausschuss / Entsorgung.

Um das Auftreten von fehlerfreien Produkten zu gewährleisten, werden erforderliche Vorbeugemaßnahmen durchgeführt.

Mögliche Vorbeugemaßnahmen sind:

- Weiterbildungen,

- Reklamation beim Lieferanten und ggfs. Lieferantenwechsel bei erneutem Auftreten des Fehlers.

Kundenbeschwerden und Reklamationen von ausgelieferten Produkten können telefonisch, schriftlich oder persönlich vom Kunden mitgeteilt werden. Das Auftreten von fehlerhaften Produkten wird im Formblatt Reklamation vermerkt.

### **Interne Audits / Eigenkontrollen**

Die Geschäftsleitung führt mindestens einmal im Jahr ein Internes Audit / eine Eigenkontrolle durch. Hierbei wird die Checkliste systematisch abgearbeitet, um mögliche Schwachstellen aufzudecken und daraus entsprechende Korrekturmaßnahmen bzw. Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Ergebnisse aus den Audits werden mit der Geschäftsleitung und dem Betriebsleiter kommuniziert.

### **Verbesserungsprozesse**

Zur Verbesserung aller Prozesse werden alle systematischen Abweichungen und erkannten Risiken gewichtet, auf Ihre Ursache hin untersucht und Maßnahmen eingeleitet.

Abweichungen und Risiken können folgende sein:

- Gesundheitsrisiken,
- Verunreinigung /Schadhaftigkeit der Produkte,
- Haftungsrisiken,
- Zielabweichungen,
- Reklamationen,
- Interne Fehler,
- Abweichungen bei internen und externen Audits.

Die Umsetzung und die Wirksamkeit der Maßnahmen werden nach ihrer Durchführung überprüft.

### 3.5.5 Risikomanagement

Das Risikomanagement beinhaltet das Konzept einer Risikoanalyse.

Als Produzent von Strom, Wärme und Düngemittel aus Biomasse ist sich der Betreiber seiner Verantwortung für die Versorgungs- und Umweltsicherheit bewusst. Aus diesem Grunde wurde ein QM-System aufgebaut und für die Tätigkeiten und Produkte ein Risikoanalyse-Konzept erstellt.

Bei der Erstellung des Risikoanalyse-Konzeptes werden alle Schritte von der Warenannahme bis zur Warenauslieferung kritisch betrachtet. Dabei werden die möglichen Gefahren für die Produktqualität und -sicherheit identifiziert und beschrieben.

Ziel ist es, durch Risikoanalysen alle möglichen potentiellen Gesundheitsrisiken für den Mensch, Gefährdungen für den Biogasprozess und negative Umweltauswirkungen zu erkennen und zu minimieren. Alle möglichen Risiken für die Produktqualität und -sicherheit werden in angemessener Weise Regelungen, d.h. Lenkungsmaßnahmen beherrscht.

#### Erstellung eines Konzeptes zur Risikoanalyse

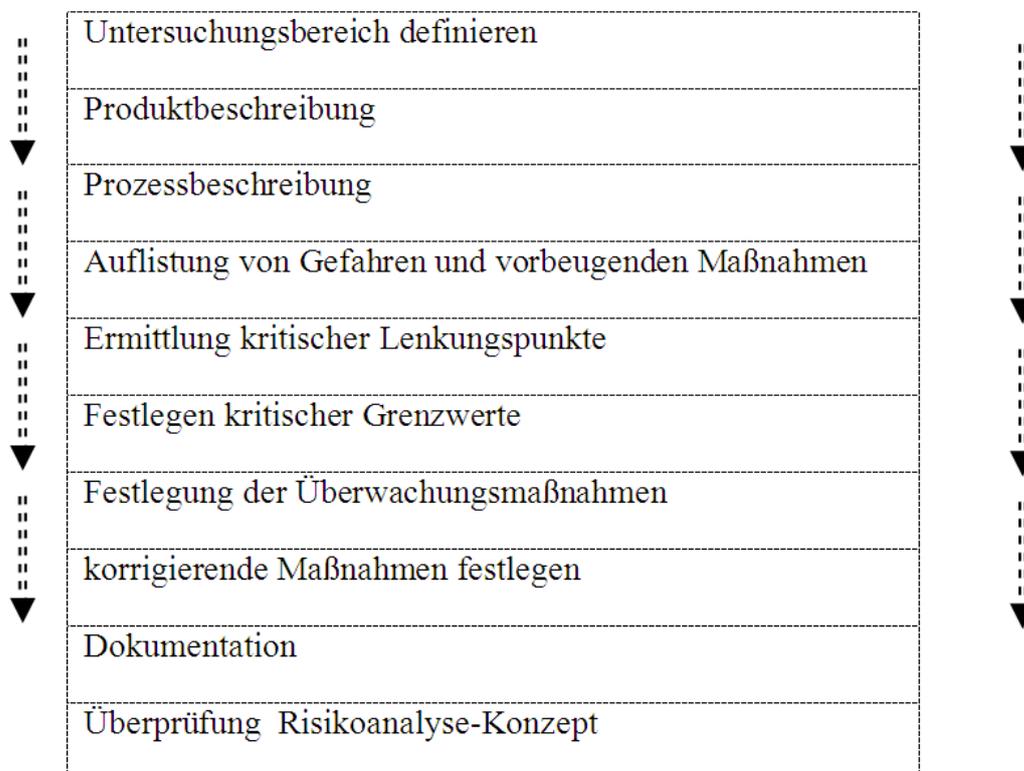


Abbildung 21: Konzept zur Risikoanalyse

---

Die Anwendung des Risikoanalyse-Konzepts erstreckt sich auf den gesamten Betrieb der Biogasanlage.

Prinzipiell handelt es sich hier um eine Vielzahl von Produkten, die in den Prozess mit einfließen.

Ein wirkliches Gefährdungspotential geht von folgenden Produkten aus:

- Biogas (53% Methan, 38% CO<sub>2</sub>, 3 % Wasserdampf, 1% Stickstoff, 0,3 % O<sub>2</sub>, Rest Wasserstoff, Ammoniak, Schwefelwasserstoff),
- Gärsubstanz (Wasser, organische und anorganische Substanzen, N, P, K, S...),
- Gelagertem Öl,
- Abgase BHKW,
- Geräusche BHKW,
- Geruchsemissionen aus der Gaskühlung und beim Fermenter säubern.

### **Gefährdungsanalyse und Ermittlung vorbeugender Maßnahmen**

Die Prozesse und deren einzelnen Prozessschritte werden hinsichtlich möglicher Gefahren analysiert, eventuell vorbeugende Maßnahmen werden festgelegt. Es ist sowohl möglich, dass zur Ausschaltung einer Gefahr mehrere Maßnahmen ergriffen werden können, als auch mehrere Gefahren durch eine einzige gezielte Maßnahme ausgeschaltet werden können.

**Tabelle 9: Unterteilung der Gefährdungen nach deren Art bzw. Herkunft**

Art der Gefährdung	Beschreibung	Beispiele
O = Organisatorisch	Fehlorganisationen	- nicht regelmäßig stattfindende Kontrollen der biologischen Prozesse, - nicht regelmäßig stattfindende technische Kontrollen, - nicht regelmäßige Überprüfung der Kostenstellen (Eigenenergiebedarf,...) Folge: biologische, technische und ökonomische Probleme.
M = menschlich	Menschliche Fehlhandlung	tägliche Arbeiten, wie Radladerfahren, Ölwechsel u.s.w. Folge: Gefährdung der eigenen und der Gesundheit anderer
C = Chemisch	Unerwünschte chemische Substanzen, die von Natur aus in dem Produkt enthalten sein können oder durch Umweltverschmutzung oder durch den Einsatz von Hilfsstoffen entstehen oder die das Produkt während der Handhabung kontaminieren können	- Biologische Abbauprodukte, biogene Amine, z.B. Histamin, Tyramin - Pestizide, z.B. Vorratsschutz-, Pflanzenschutz-, Schädlingsbekämpfungsmittel Folge: Gefährdung des biologischen Prozesses oder der Umwelt
G = Gas	Gasemission	können unerkannt sein, oder prinzipiell zu viel bei Arbeiten am Kondensatschacht, oder im Behälter
GE = Geräusch	Geräuschemissionen	- können auf Dauer ein Störfaktor werden
P = Physikalisch	Fremdbestandteile, die enthalten sein können oder die während der Handhabung das Produkt verunreinigen können oder den Prozess stoppen	- Sand, Steine, Holzstücke - Knochen, Glassplitter - Metallteile, Plastikteilchen, Verpackungsreste Folge: verstopfte Schnecken, Pumpen oder beschädigte Bauteile

## Risikobeurteilung und Festlegung von Lenkungsmaßnahmen

Von jeder Gefahr, die in der Risikoanalyse bestimmt worden ist, wird die Wahrscheinlichkeit (das „Kann“) und die Gefährlichkeit (der „Ernst“) beurteilt.

*Wahrscheinlichkeit* („Kann“) bedeutet, wie groß ist die Möglichkeit, dass eine Gefahr auftritt. Zu dieser Einteilung können ggf. vorliegende Reklamationen hinzugezogen werden.

*Gefährlichkeit* („Ernst“) bedeutet, wie groß ist das Gesundheitsrisiko insbesondere für den Mensch (Endverbraucher), wenn diese Gefahr auftritt.

## Risikobeurteilungsmodell

„Kann“ und „Ernst“ zusammen, ergeben folgenden Risikolevel:

**Tabelle 10: Risikobeurteilungsmodell**

Kann \ Ernst	klein	mittel	groß
klein	1	2	3
mittel	2	3	4
groß	3	4	4

Risikolevel 1: keine Maßnahmen notwendig

Risikolevel 2: periodische Maßnahmen – oft einmalige Maßnahmen – sind durchzuführen

Risikolevel 3: generelle Lenkungsmaßnahmen, d.h. Beobachtungspunkte (BP) wie Lieferantenauswahl, Einkaufsverfahren, etc. sind erforderlich

Risikolevel 4: spezifische Lenkungsmaßnahmen (CCP) sind erforderlich

## Lenkungsmaßnahmen

Eine spezifische Lenkungsmaßnahme erfolgt durch Festlegung von CCPs.

Auf Grundlage der Risikoanalyse wurde für jeden kritischen Lenkungspunkt (CCP – engl. Critical Control Point) folgendes festgelegt:

- 
- Überwachungsmethode,
  - Häufigkeit der Überwachung,
  - Verantwortlichkeit,
  - Korrekturmaßnahmen, wenn eine Abweichung von den kritischen Grenzwerten eingetreten ist.

Die generellen Lenkungsmaßnahmen werden durch Festlegung von BPs erreicht.

Auch die Beobachtungspunkte (BP) bzw. generellen Lenkungsmaßnahmen, die aufgrund eines Risikos Level 3 erforderlich sind, werden tabellarisch aufgeführt. Für die BPs ist folgendes festgelegt:

- Beschreibung des BP
- Häufigkeit der Überwachung
- Korrekturmaßnahmen
- Überprüfung auf Wirksamkeit

### **Überprüfung des Risikoanalyse-Konzeptes**

Mindestens einmal jährlich werden die Vorgaben und korrekten Ausführungen überprüft. In dieser Überprüfung soll festgestellt werden, ob das Risikoanalyse-Konzept aktuell, angemessen und wirksam ist. Dies wird im Rahmen der internen Audits durch Eigenkontrolle durchgeführt.

Treten Änderungen am beschriebenen Prozess, Verfahren oder speziellen Produkt ein, so wird das Risikoanalyse-Konzept aktualisiert.

## 4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den beschriebenen Untersuchungen aufgeführt. Die Ergebnisse werden in Anlehnung an den Prozessablauf dargestellt. Dabei wird zunächst auf den Substrateinsatz und die Qualität der eingebrachten Inputmaterialien eingegangen. Es folgen danach die Laborergebnisse des Gärsubstrates. Im Anschluss folgt eine Beschreibung der Gasanalyseergebnisse sowie der Gärversuche im Batchfermenter. Ergebnisse des Qualitätsmanagements werden am Ende des Kapitels vorgestellt. Der Untersuchungszeitraum für die Laboranalysen begann im April 2008 und endete im April 2009. Die Werte, die parallel an der Anlage aufgezeichnet wurden, wie Inputmengen, Gasanalyse, Temperaturen und Störfälle, werden teilweise bis Anfang Juli 2009 ausgewertet.

### 4.1 Inputmaterialien

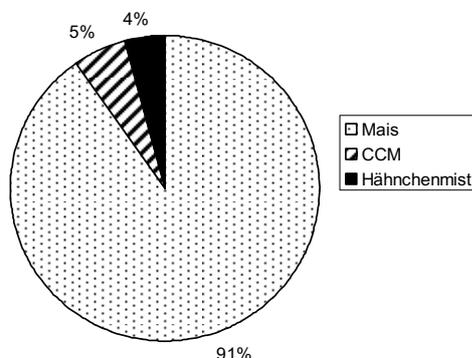
Bei beiden untersuchten Biogasanlagen wird als Basissubstrat Silomais verwertet. Die täglich eingebrachte Substratmenge dient als Energielieferant für die Mikroorganismen. Durchschnittlich wird die Anlage pro Tag mit 35.710 kg Maissilage, 1.780 kg CCM und 1.560 kg Hähnchenmist beschickt. Die Mengenschwankungen haben keine beabsichtigte Relevanz, sondern charakterisieren den landwirtschaftlichen Praxisbetrieb. Die errechneten Mittelwerte pro Monat sind der Tabelle 10 zu entnehmen.

**Tabelle 11: Mittelwerte der täglichen Inputmengen[kg/d] Anlage A**

	<b>Silomais kg/d</b>	<b>CCM kg/d</b>	<b>Festmist kg/d</b>
Apr 08	36.056	2.246	0
Mai 08	30.057	2.021	2.585
Jun 08	34.557	2.838	3.000
Jul 08	28.683	2.647	3.000
Aug 08	32.150	3.284	2.387
Sep 08	34.763	2.079	2.100
Okt 08	35.883	2.178	1.177
Nov 08	36.640	1.910	1.200
Dez 08	37.595	1.600	1.000
Jan 09	37.355	1.725	774
Feb 09	35.681	1.303	1.000
Mrz 09	36.735	1.354	1.177
Apr 09	37.350	1.147	1.040
Mai 09	41.935	408	1.322
Jun 09	40.353	0	1.733

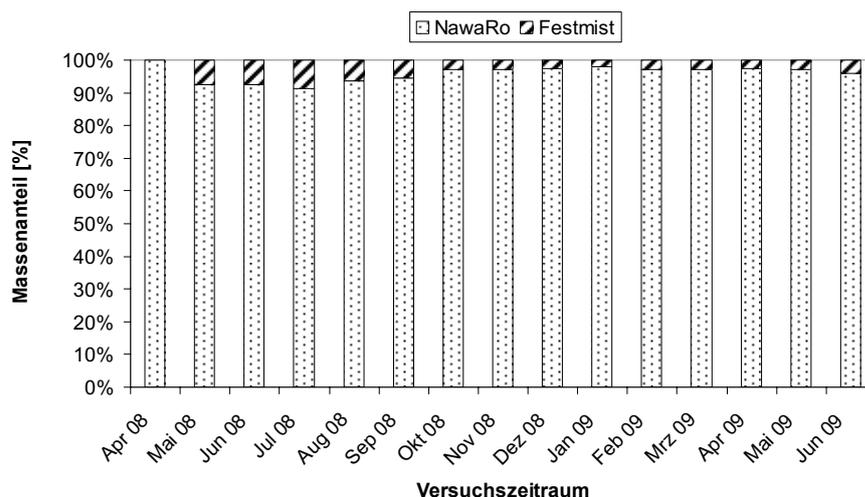
Ab Mai 09 wurde die Menge an CCM bereits erheblich reduziert, ab Juni 09 wurde die Anlage gar nicht mehr mit dem energiereichen CCM beschickt.

Bei den eingesetzten Inputmaterialien bei BGA A handelt es sich im Jahresverlauf zu 95 % um nachwachsende Rohstoffe, bestehend aus Maissilage und CCM, und zu 5 % um Festmist aus der Hähnchenhaltung (Abb.22).



**Abbildung 22: Massenanteile im gesamten Versuchszeitraum (Anlage A)**

In Abbildung 23 sind die Massenanteile der Substratkomponenten für jeden Monat des Versuchszeitraumes dargestellt. Die Substratzufuhr soll bezüglich der Menge und Zusammensetzung möglichst konstant sein (KTBL, 2009), um die adaptierten Mikroorganismenpopulationen nicht aus dem Gleichgewicht zu bringen. Diese Bedingung konnte von der beschriebenen Biogasanlage eingehalten werden. Vor allem in den Monaten Oktober 2008 bis Juni 2009 wurden die Massenanteile der Einzelkomponenten sehr gleichmäßig in die Anlage eingebracht.



**Abbildung 23: Massenanteile der Komponenten NawaRo und Festmist (BGA A)**

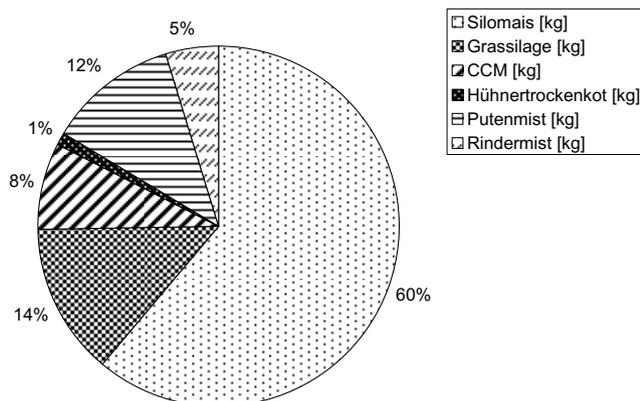
Der Substrateinsatz der Anlage B basiert im Vergleich zu Anlage A auf einem wesentlich breiteren Spektrum. In der Tabelle werden die Mittelwerte des täglichen Substrateinsatzes bezogen auf den Monat dargestellt.

**Tabelle 12: Mittelwerte der täglichen Inputmengen [kg/d] Anlage B**

	Silomais kg/d	Grassilage kg/d	CCM kg/d	Hühnerkot kg/d	Putenmist kg/d	Rindermist kg/d
Mai 08	18.967	3.806	4.500	1.103	3.320	-
Jun 08	20.366	5.533	4.083	3.966	-	-
Jul 08	20.806	5.951	4.451	-	4.629	-
Aug 08	20.870	6.370	4.403	-	5.048	-
Sep 08	20.633	4.666	6.533	-	4.683	-
Okt 08	20.774	6.387	4.596	-	4.756	-
Nov 08	20.300	6.533	4.666	-	4.700	-
Dez 08	20.870	6.451	4.645	-	4.677	-
Jan 09	23.967	3.064	-	-	4.677	4.516
Feb 09	24.214	2.821	-	-	4.607	4.678
Mrz 09	23.887	3.274	-	-	4.516	4.212
Apr 09	23.483	3.033	-	-	4.283	4.370
Mai 09	23.983	3.080	-	-	4.193	4.209

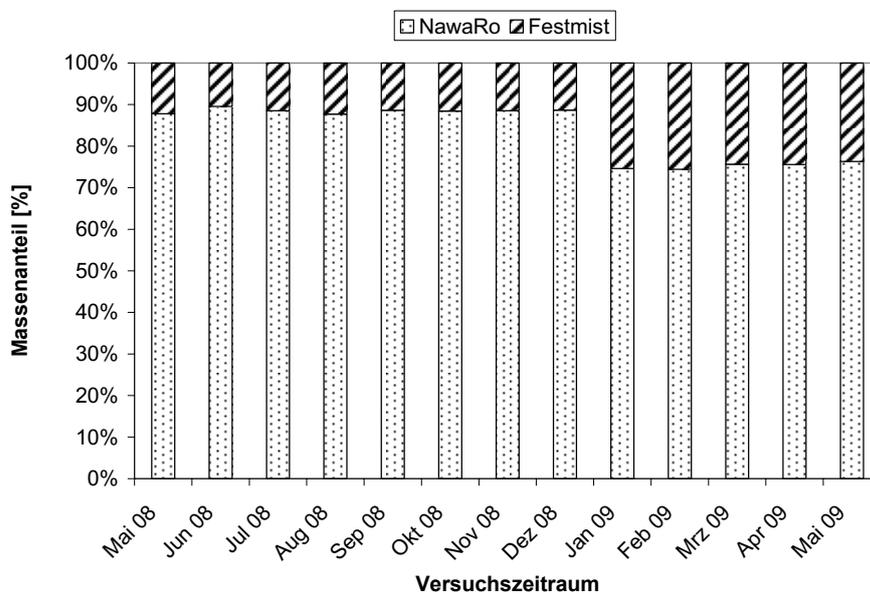
Anhand der Tabelle 11 ist zu erkennen, dass ab Januar 2009 die Menge an Silomais um 3.000 bis 4.000 kg gegenüber den Vormonaten gesteigert wurde, die Menge an Grassilage hingegen um diesen Wert reduziert wurde. CCM wurde ab diesem Zeitpunkt nicht mehr in die Anlage eingebracht. Als neue Substratkomponente wurden ca. 4.400 kg Festmist aus der Rinderhaltung verwertet.

Im betrachteten Versuchszeitraum bildet Silomais mit 60 % Massenanteil die Grundlage. Grassilage macht 14 % aus, CCM hat einen Anteil von 8 %. Die verschiedenen Wirtschaftsdünger werden zu keinem Zeitpunkt gleichzeitig eingesetzt, sondern wechseln in den verschiedenen Monaten. Im Versuchszeitraum werden insgesamt 12 % Putenmist, 5 % Rindermist und 1 % Hühnertrockenkot eingesetzt (Abb.24).



**Abbildung 24: Massenanteile im gesamten Versuchszeitraum (Anlage B)**

Wie aus Abbildung 25 deutlich wird, hat sich bei Anlage B die Zusammensetzung des Substratgemisches ab Januar 2009 stark verändert. Der Massenanteil des Festmistes ist wesentlich größer geworden als in den Vormonaten. Grund ist, dass der Anlagenbetreiber seit der Einführung des neuen EEG den Massenanteil auf nahezu 30 % erhöht hat, um den so genannten „Güllebonus“ geltend machen zu können.



**Abbildung 25: Massenanteile der Komponenten NawaRo und Festmist (Anlage B)**

Vergleicht man den Substrateinsatz der beiden untersuchten Praxisanlagen mit Literaturbeispielen, wird deutlich, dass die Mehrheit der landwirtschaftlichen Biogasanlagen nachwachsende Rohstoffe mit Wirtschaftsdünger kombiniert. Auch wenn die Verfügbarkeit an Wirtschaftsdüngern aufgrund fehlender Tierhaltung im eigenen Betrieb nicht gegeben ist, wird oftmals Fest- oder Flüssigmist von tierhaltenden Betrieben bezogen (FNR, 2005). In der Praxis sind selten Anlagen zu finden (Abb.26), die zu 100 % auf Maisbasis wirtschaften, denn Wirtschaftsdünger stellen ein kostengünstiges und stabilisierend wirkendes Inputmaterial dar.

Weiterhin ist es finanziell vorteilhaft, dass (Alt-) Anlagen, die 30 % Wirtschaftsdünger in Form von Festmist einbringen, den Güllebonus (EEG 2009) sowie den Trockenfermentationsbonus (EEG 2004) erhalten.

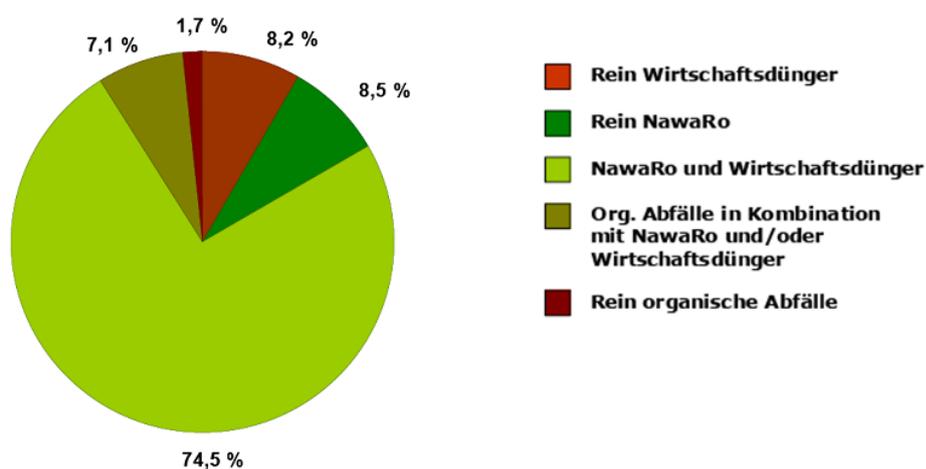


Abbildung 26: Anteile der Biogasanlagen nach Substratgemisch (KTBL, 2006)

## 4.2 Qualität der Inputmaterialien

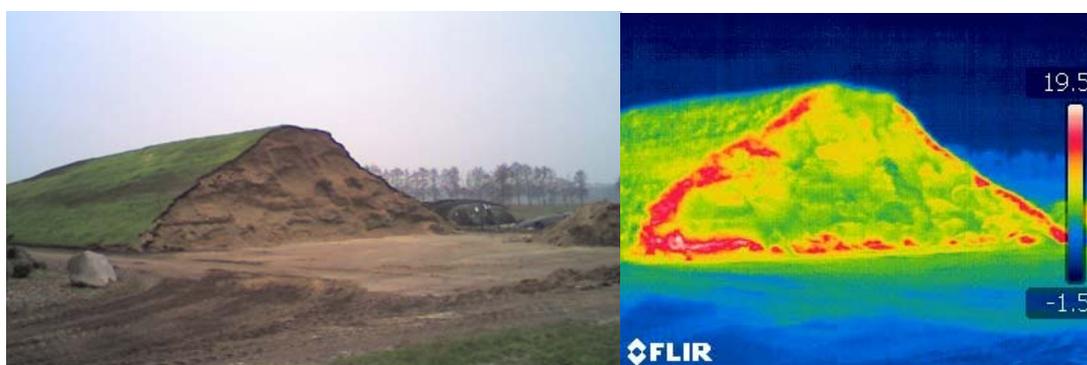
Zur Feststellung der Qualität wurde zunächst die Maissilage untersucht. Da beide Biogasanlagebetreiber das Silo nicht mit einer Schutzfolie abdecken, konnte davon ausgegangen werden, dass hier eine erste Schwachstelle bezüglich der gärbiologischen Parameter und daraus resultierenden Energieverlusten ausfindig gemacht werden konnte.

Anhand von Temperaturmessungen vor Ort und Laboranalysen konnte dies bestätigt werden. Die Temperatur wurde mit einem Einstechthermometer auf drei unterschiedlichen Ebenen im Mai 09 ermittelt, jeweils 50 cm unterhalb der Oberfläche, mittig des Silos und 50 cm oberhalb des Bodens. Innerhalb einer Ebene wurde an drei Stellen nebeneinander ein Messwert genommen. Zwischen der oberen und unteren Schicht liegen Temperaturunterschieden von 7°C bei BGA A und 16°C bei BGA B vor. Für den Verderb in Praxissilos geht NUBBAUM (2006) von einer Nacherwärmung aus, wenn zwischen einzelnen Silagepartien Temperaturunterschiede von über 5°C auftreten.

**Tabelle 13: Ergebnisse der Temperaturmessung am Silo**

Anlage	Temperatur [°C]					
	BGA A			BGA B		
oben	29	29	30	36	37	36
mitte	25	25	27	30	30	29
unten	22	22	23	21	21	20

Bei Anlage B wurde zusätzlich zu einem Zeitpunkt im Winter eine Wärmebildaufnahme gemacht. Das Bild zeigt ebenfalls eine deutliche Nacherwärmung in den Randbereichen, wo die Temperatur bei ca. 19°C lag. Das Silo ist ca. 60 m lang, 18 m breit und 6 m hoch.



**Abbildung 27: Lagerung der Maissilage auf Anlage B und Nacherwärmung**

Um eine genauere Vorstellung der Ist-Situation zu bekommen, sind ein Originalbild und das Wärmebild direkt nebeneinander gestellt worden.

Der Vergleich zwischen den eigenen Temperaturmessungen und der Aufnahme der Wärmebildkamera zeigt, dass bei den Messungen ein deutlicher Temperaturabfall von oben nach unten festzustellen war, während das Wärmebild auch im unteren Bereich eine Erwärmung zeigt. Dieser Unterschied kann auf die verschiedenen Versuchszeiträume (Winter, Sommer) zurückgeführt werden da Sonneneinstrahlung und Umgebungstemperatur Einfluss auf die Temperaturen im Silo haben.

Bei BGA A wurde eine Laboruntersuchung hinzugezogen, um die qualitätsbestimmenden Parameter zu erfassen (Tab. 13).

**Tabelle 14: Ergebnisse der Analyse der Maissilage (Anlage A)**

	Oben	Mitte	Unten	Zielwerte
<b>TS [%]</b>	19,1	28,3	31,2	28 - 35
<b>Rohprotein [%]</b>	12,4	8,7	8,8	< 9
<b>Rohfaser [%]</b>	22,2	18,1	18,5	17 - 20
<b>Rohasche [%]</b>	5,9	3,6	3,8	< 4,5
<b>Stärke [%]</b>	13,9	34,2	32,4	> 30
<b>ADF [%]</b>	37,7	20,8	21,5	20 - 25
<b>NDF [%]</b>	69,6	35,2	36,5	35 - 40
<b>pH-Wert</b>	5,8	3,9	3,8	4,5
<b>ME [MJ/kg]</b>	2	11,2	11,1	> 10,8
<b>NEL [MJ/kg]</b>	1,2	6,8	6,7	> 6,5

Aus den Analyseergebnissen geht hervor, dass die Werte der Probe von oben in jeder Hinsicht von den Zielwerten abweichen. Die Proben aus dem mittleren und unteren Bereich liegen dagegen im Normbereich. Die Zielwerte beruhen auf Empfehlungen der LUFA Nord-West.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Bereitstellung von Substraten aus nachwachsenden Rohstoffen einen erheblichen Kostenanteil bei der Biogasproduktion ausmacht. Es werden täglich große Mengen Maissilage zur Erhaltung des Biogasprozesses benötigt. Von daher sollten Energieverluste möglichst gering gehalten werden, wodurch sich hohe Anforderungen an das Silagemanagement ergeben. BARNEMANN (2009) konnte nachweisen, dass der Methanertrag geringer ist, wenn die Silage einer Nacherwärmung ausgesetzt war. Der relative Methanertrag war bei Silagen mit Nacherwärmung um ca.

14 % reduziert. Die Folgen des verminderten TS-Gehaltes und daraus resultierendem Biogasertrags sind deutliche finanzielle Einbußen durch Verminderung des Stromwertes, wie der Tabelle 14 zu entnehmen ist.

**Tabelle 15: Stromwert der Silage (THAYSEN, 2007)**

Silomais in Biogasanlagen (Stromwert der Silage)				
Maissilage (% TM)	Biogasertrag (m <sup>3</sup> /t)	Stromertrag (kWh/t)	Strompreis (€/kWh)	Stromwert der Silage (€/t)
28	160	272	0,165	44,88
29	165	280,5	0,165	46,28
30	171	290,7	0,165	47,97
31	177	300,9	0,165	49,65
32	182	309,4	0,165	51,05
33	188	319,6	0,165	52,73
34	194	329,8	0,165	54,42
35	200	340	0,165	54,1

### 4.3 Untersuchungsergebnisse des Gärsubstrates

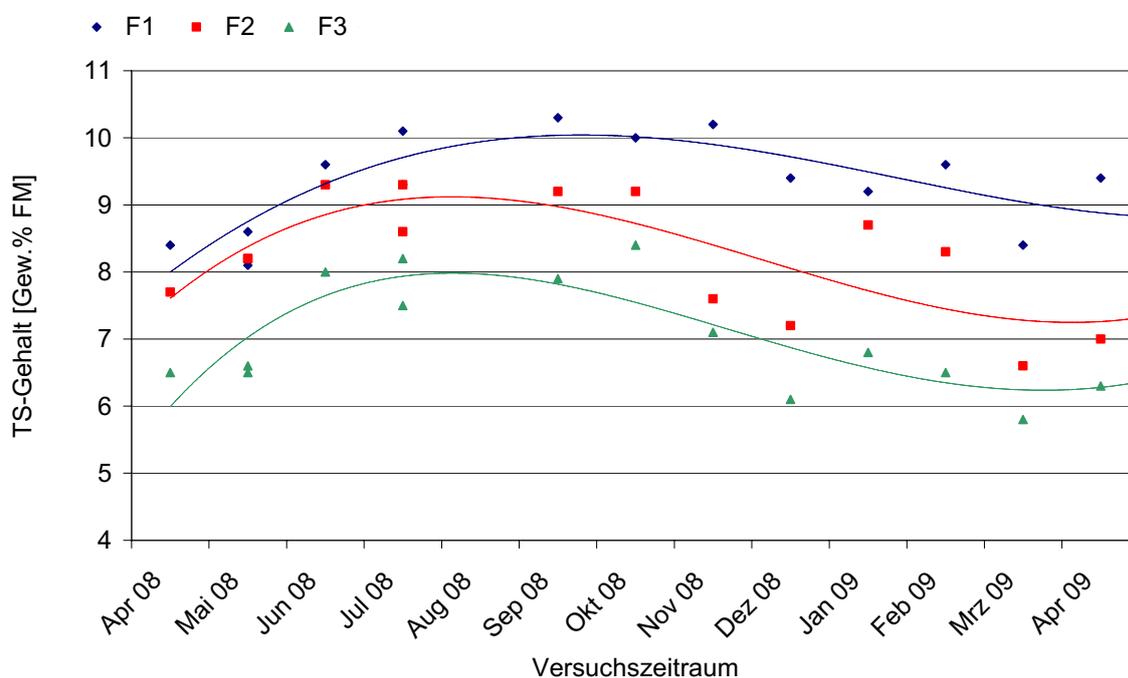
Die regelmäßige Untersuchung des Gärsubstrates ist unerlässlich, um die Stabilität des Gärprozesses bewerten zu können. Alle zwei Wochen wurden Gärsubstratproben aus jedem Behälter gezogen. Das Endlager wurde nur dann nicht beprobt, wenn es kurz zuvor geleert wurde. Die Analysen wurden von der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Nord-West durchgeführt.

#### 4.3.1 Trockensubstanz

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich zunächst auf die Biogasanlage A. Gezeigt werden die Werte der gesamten Gärstrecke, bestehend aus dem ersten, zweiten und dritten Fermenter (F). Aus dem Endlager war nicht zu jedem Zeitpunkt eine Probenahme möglich. daher werden diese Werte in der Abbildung nicht dargestellt. Zu erkennen ist ein extrem hoher TS-Gehalt in Fermenter 1 in dem Zeitraum September – Oktober 2008. In diesem Zeitraum wurde ab dem 04.09.2008 ein Separator für die Dauer von vier Tagen eingesetzt. Dieser hatte die Aufgabe, die feste Phase von der flüssigen zu trennen und das Rezirkulat dem Fermenter zurückzuführen, um das Substrat zu verdünnen.

Aus der Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes können nicht nur Rückschlüsse auf die Pump- und Rührfähigkeit gezogen werden, es kann auch die Effizienz des Abbaugrades bewertet werden.

Die Abbildung 28 zeigt die gemessenen Einzelwerte der Biogasanlage A in den Fermentern 1,2 und im Nachgärer. Die Trendlinien zeigen deutlich den Anstieg und den Abfall des TS-Gehaltes nach dem Einsatz des Separators, wobei der Abfall beim ersten Fermenter verzögerter verläuft als beim zweiten Fermenter. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Trendlinien von Fermenter 2 und 3 einen relativ parallelen Verlauf darstellen, welcher sich auch in Kapitel 4.3.2 bei dem organischen Trockensubstanzgehalt widerspiegelt.



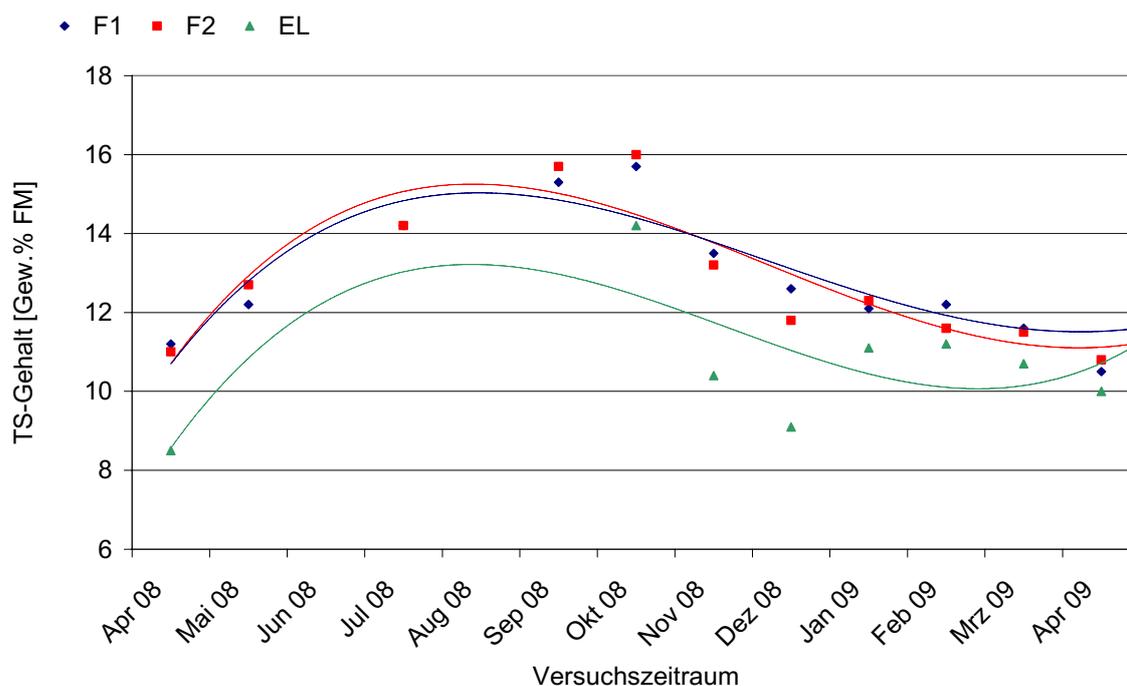
**Abbildung 28: Trockensubstanzgehalt der Biogasanlage A im Zeitverlauf**

Nach Auswertung der beschreibenden Statistik wird deutlich, dass der TS-Gehalt innerhalb der Gärstrecke von Fermenter 1 bis zum Endlager abnimmt, was für einen effizienten Abbaugrad spricht (s. Tab. 15).

**Tabelle 16: Kennzahlen zum TS-Gehalt (BGA A)**

	Fermenter 1	Fermenter 2	Nachgärer	Endlager
Mittelwert	9,2	8,1	7,0	6,4
Minimum	7,7	6,6	5,8	5,6
Maximum	10,3	9,5	8,4	7,7

Das Gärsubstrat der zweiten Biogasanlage B weist im Vergleich zu Biogasanlage A grundsätzlich höhere Trockensubstanzgehalte auf. Auch in diesem Fall traten in dem Zeitraum 28.08. bis 08.10.2008 Probleme im ersten und zweiten Fermenter mit dem Anstieg des TS-Gehaltes auf. Hier erfolgte am 03.09.08 die Zugabe von 100 m<sup>3</sup> Rindergülle, um das Gärsubstrat zu verflüssigen. Danach konnte ein deutliches Absinken des TS-Gehaltes verzeichnet werden.



**Abbildung 29: Trockensubstanzgehalt der Biogasanlage B im Zeitverlauf**

Anlage B hat ab Januar 2009 den Anteil an Festmist erhöht, der TS-Gehalt ist dadurch jedoch nicht angestiegen.

Die TS-Gehalte der Anlage B schwanken zwischen 9,9 und 16,1 % im Fermenter 1, 10,1 bis 16,1 % im Fermenter 2 und 6,8 bis 15,1 % im Endlager. Die Mittelwerte liegen in den betrachteten zwölf Monaten bei 13,0 (F 1), 12,9 (F 2) und im Endlager bei 11,2 %.

**Tabelle 17: Kennwerte zum TS-Gehalt (BGA B)**

	Fermenter 1	Fermenter 2	Endlager
Mittelwert	13,0	12,9	11,2
Minimum	9,9	10,1	6,8
Maximum	16,1	16,1	15,1

Literaturempfehlungen bezüglich des Gehaltes an Trockensubstanz variieren stark. Laut KALTSCHMITT ET AL. (1993) sollte der TS-Gehalt zwischen 8 -10 % liegen. JÄKEL UND MAU (2003) sprechen von einem günstigen TS-Gehalt von 5 - 15 %. WEILAND (1998) beschreibt einen kritischen Grenzwert ab 12 % im Fermenter. Letztendlich muss sich der TS-Gehalt in Abhängigkeit von der Substratzugabe Anlagen-individuell einpendeln.

### 4.3.2 Organische Trockensubstanz

Der organische Trockensubstanzgehalt (oTS) ist wie der Trockensubstanzgehalt ein wichtiger Prozessparameter. Dieser dient ebenso der Berechnung des Abbaugrades, der Überwachung der Pumpfähigkeit und der mechanischen Belastung der Rührwerke sowie sich im Fermenter anreichernde anorganische Inhaltsstoffe (Sedimente). In der folgenden Abbildung werden die oTS-Werte der ersten drei Fermenter von Anlage A gezeigt. Die oTS-Gehalte des Endlagers wurden nicht regelmäßig bestimmt und werden hier daher nicht dargestellt. Die gemessenen Einzelwerte können in tabellarischer Form dem Anhang entnommen werden.

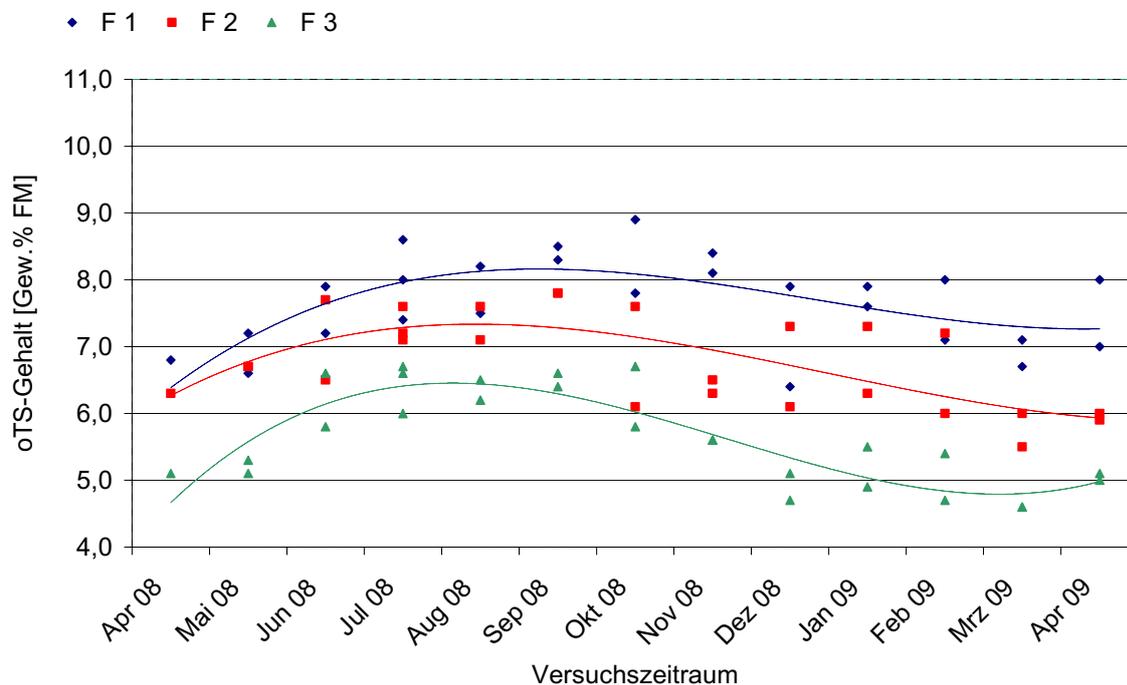


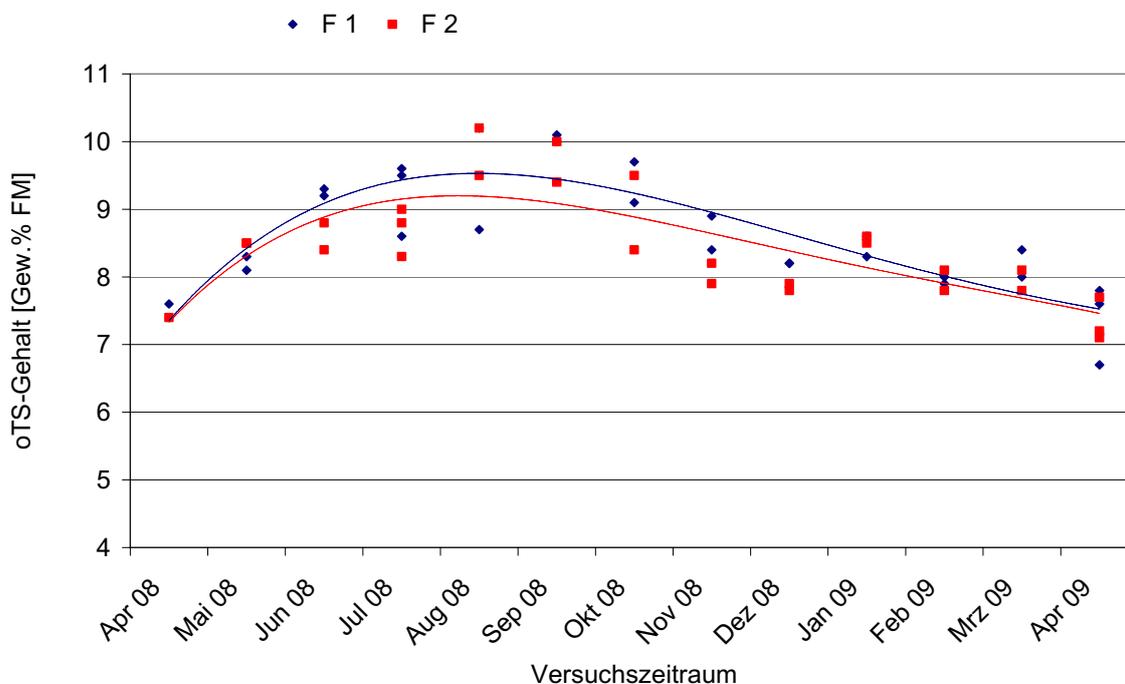
Abbildung 30: Organischer Trockensubstanzgehalt Anlage A

Die Mittelwerte sowie die Minimal- und Maximalwerte der einzelnen Fermenter sowie des Endlagers werden in Tabelle 14 beschrieben.

**Tabelle 18: Kennwerte zum oTS-Gehalt (BGA A)**

	Fermenter 1	Fermenter 2	Fermenter 3	Endlager
Mittelwert	7,6	6,8	5,6	5,1
Minimum	6,4	5,5	4,6	4,2
Maximum	8,9	7,8	6,7	6,2

Die oTS-Gehalte der Biogasanlage B sind im Vergleich wieder wesentlich höher als bei Biogasanlage A. Sie zeigen ein ähnliches Bild wie die TS-Gehalte. Die Werte werden folgendermaßen beschrieben:



**Abbildung 31: Organischer Trockensubstanzgehalt Anlage B**

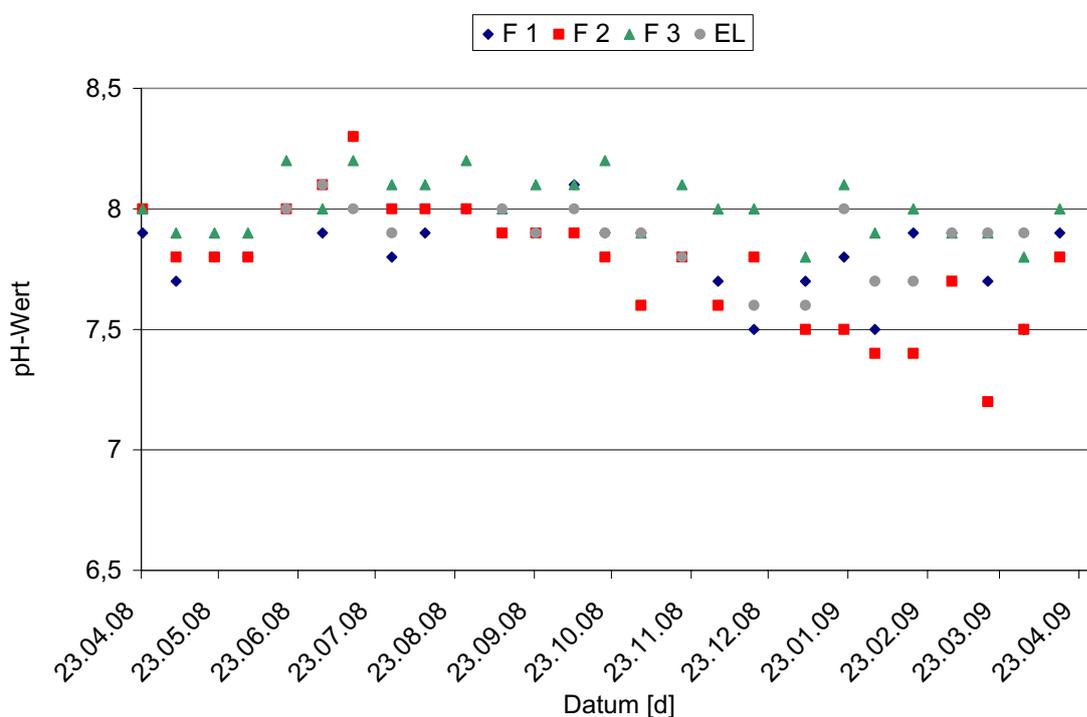
Die oTS-Gehalte der Anlage B liegen zwischen 6,7 und 10,2 % im Fermenter 1, 7,1 bis 10,2 % im Fermenter 2 und 4,2 bis 9,7 im Endlager. Der Mittelwert liegt in den betrachteten zwölf Monaten bei 8,6 (F 1), 8,4 (F 2) und im Endlager bei 9,7.

**Tabelle 19: Kennwerte zum oTS-Gehalt (BGA B)**

	Fermenter 1	Fermenter 2	Endlager
Mittelwert	8,6	8,4	7,1
Minimum	6,7	7,1	4,2
Maximum	10,2	10,2	9,7

### 4.3.3 pH-Wert

Die pH-Werte der Anlage A lagen im Mittel bei 7,8 (F 1, F 2), 8,0 in Fermenter 3 und bei 7,9 im Endlager. Ab dem 20.03.2009 wurden in den ersten Fermenter 800 kg und in den zweiten Fermenter 1000 kg Kalk (Calciumcarbonat) eingebracht, woraus ein langsamer pH-Anstieg resultierte. Es wurde über einen Zeitraum von 4 - 5 Tagen ca. 200 kg pro Fermenter eingesetzt. Wie der Abbildung 32 zu entnehmen ist, sanken die pH-Werte in F 2 stärker als in F1. Grund für diese Absenkung war die Zugabe von Sickersaft mit einem pH-Wert von 3,6 in Fermenter 2, was sich negativ auf die Prozessbiologie auswirkte.

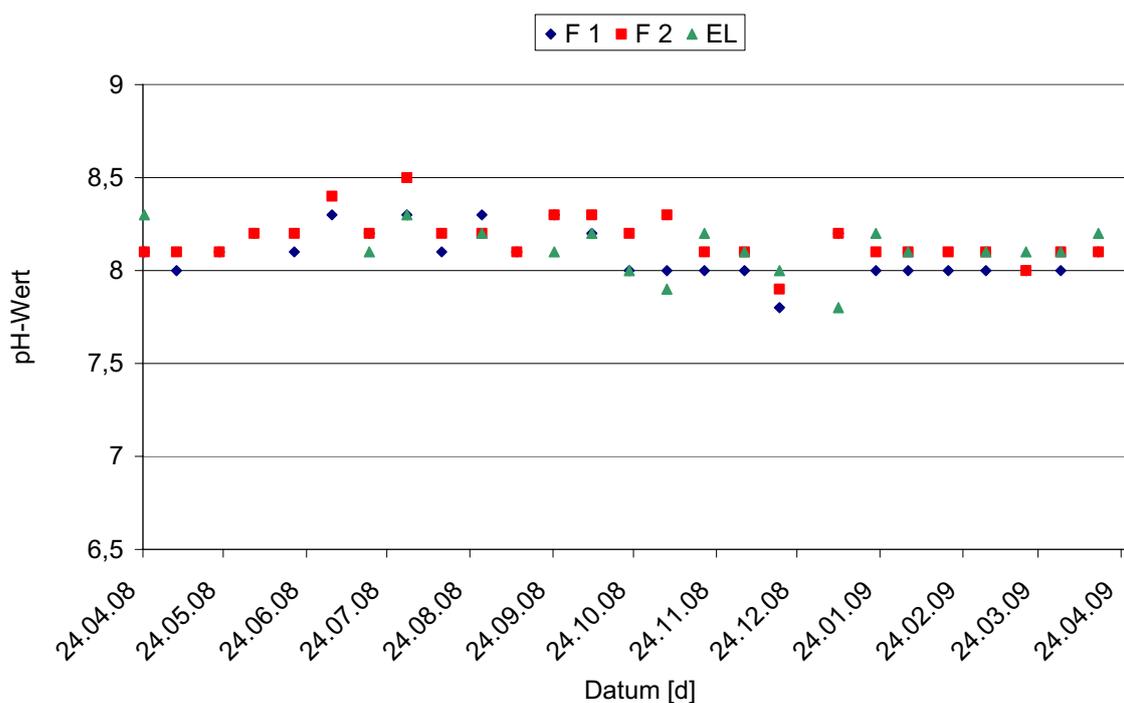
**Abbildung 32: Verlauf der pH-Werte im Versuchszeitraum (Anlage A)**

Wie die statistische Auswertung zeigt (Tab. 19), ist die Schwankungsbreite bei BGA A größer als bei BGA B. Im Fermenter 1 liegen die Werte zwischen 7,5 und 8,3, im Fermenter 2 zwischen 7,2 und 8,3. Im Nachgärer (F 3) ist die Schwankungsbreite von 0,4 am geringsten. Die pH-Werte im Endlager bewegen sich zwischen 7,6 und 8,1.

**Tabelle 20: Kenngrößen zum pH-Wert (Anlage A)**

pH-Wert	Fermenter 1	Fermenter 2	Fermenter 3	Endlager
Mittelwert	7,8	7,8	8,0	7,9
Minimum	7,5	7,2	7,8	7,6
Maximum	8,3	8,3	8,2	8,1

Die pH-Werte der BGA B liegen im Mittel bei 8,0 (F 1) bzw. 8,1 (F 2, EL). Die Schwankungsbreiten sind mit 0,5 bzw. 0,6 im Vergleich zu BGA A wesentlich geringer.



**Abbildung 33: Verlauf der pH-Werte im Versuchszeitraum (Anlage B)**

**Tabelle 21: Kenngrößen zum pH-Wert (Anlage A)**

	Fermenter 1	Fermenter 2	Endlager
Mittelwert	8,0	8,1	8,1
Minimum	7,8	7,9	7,8
Maximum	8,3	8,5	8,3

Abschließend kann festgehalten werden, dass der pH-Wert ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Prozessstabilität ist. Jedoch ist er als alleiniger Parameter ungeeignet und sollte immer in Kombination mit anderen Parametern betrachtet werden.

Laut Literatur liegt ein optimales pH-Milieu für die Mikroorganismen in dem Bereich von 6,4 – 8,0 (KOSTER, 1989; HAUER, 1993). Das pH-Optimum der hydrolisierenden und säurebildenden Bakterien befindet sich in dem Bereich von 4,5 – 6,3, jedoch können diese Mikroorganismen auch bei höheren pH-Werten gut überleben. Speziell die essigsäure- und methanbildenden Bakterien benötigen zwingend einen neutralen pH-Bereich von 6,8 – 7,5 (FNR, 2006). Vergleicht man die Messwerte mit den Literaturangaben, wird deutlich, dass die pH-Werte beider Untersuchungsbetriebe im oberen Grenzbereich liegen und diesen auch teilweise überschreiten. Biologische Prozessstörungen oder Einbrüche in den Gasausbeuten konnten im gesamten Versuchszeitraum nicht nachgewiesen werden.

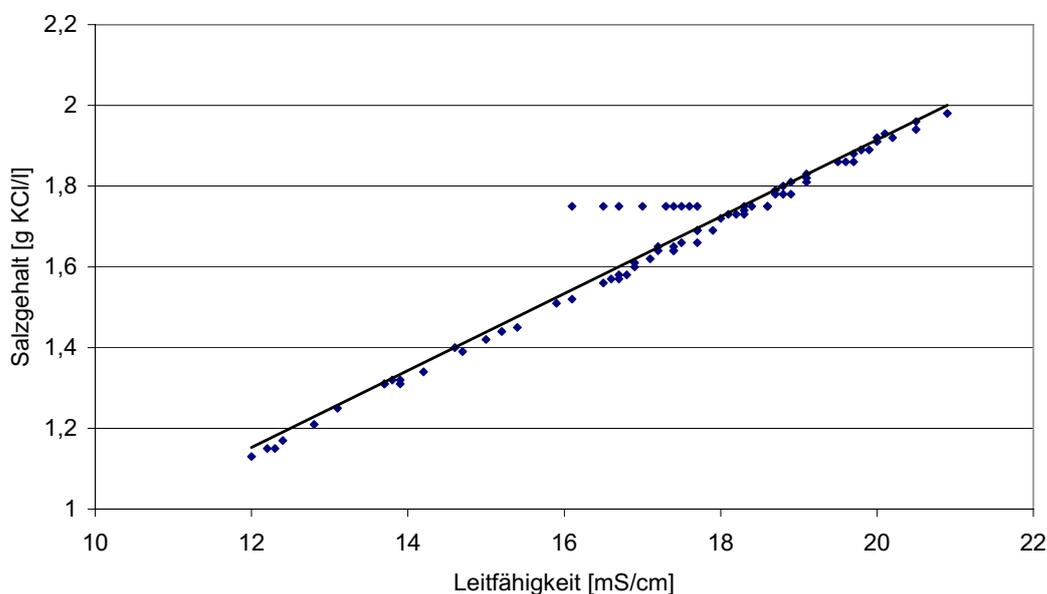
#### **4.3.4 Salzgehalt und Leitfähigkeit**

Leitfähigkeitsmessungen dienen der täglichen biologischen Prozesskontrolle und können als ergänzender Kontrollparameter genutzt werden. Der Versalzungsgrad des Substrates wird überprüft und damit das Risiko einer Hemmung des Biogasprozesses reduziert. Ein zu hoher Salzgehalt wirkt sich negativ auf die Bakterien aus. Die folgende Tabelle stellt die Mittel-, Minimal- und Maximalwerte des Salzgehalts [g KCl/l] und die der Leitfähigkeit [mS/cm] beider Untersuchungsanlagen dar. Der direkte Anlagenvergleich zeigt durchschnittlich geringere Werte bei Anlage A als bei Anlage B. Der Salzgehalt ist abhängig von den eingebrachten Inputmaterialien. In der Literatur sind kaum Angaben zum optimalen Salzgehalt zu finden, dagegen werden Angaben zum Normbereich der Leitfähigkeit gemacht. BAUMANN (2007) nennt einen Optimalbereich zwischen 18 – 20 mS/cm, während laut EHRMANN (2004) ein für den Biogasprozess kritischer Wert erst ab 60 mS/cm erreicht ist. Keiner der gemessenen Werte überschreitet den kritischen Grenzwert von 60 mS/cm.

**Tabelle 22: Darstellung der Salzgehalte und Leitfähigkeit beider Biogasanlagen**

	Anlage A						Anlage B			
	Salzgehalt [g KCl/l]			Leitfähigkeit [mS/cm]			Salzgehalt [g KCl/l]		Leitfähigkeit [mS/cm]	
	F 1	F 2	F 3	F 1	F 2	F 3	F 1	F 2	F 1	F 2
Mittelwert	17,9	15,5	18,0	17	14	17	22,57	23,25	21,4	22,3
Minimum	13,9	12	16,1	13,2	11,3	15,6	18,5	13,8	17,5	13,2
Maximum	20,9	19,7	20,5	19,8	18,6	19,6	27,7	32,9	26,2	31,4

Dass zwischen dem Salzgehalt und der Leitfähigkeit eine Abhängigkeit besteht, beschreibt die folgende Abbildung.

**Abbildung 34: Beziehung zwischen dem Salzgehalt und der Leitfähigkeit**

#### 4.3.5 Fettsäuren und FOS/TAC

Zur Anlagenführung ist die Beobachtung der organischen Säuren ein optimales Steuerungselement. Neben Essig- und Propionsäure wurde zusätzlich der Gehalt an Buttersäure bestimmt, allerdings lag dieser Wert bei beiden Anlagen immer unter 0,05 g/kg. Aus diesem Grund wird dieser Wert in den nachfolgenden Tabellen nicht mit aufgeführt. Im Endlager wurde der Gehalt an Fettsäuren nicht bestimmt.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass Anlage A deutlich höhere Werte aufweist als Anlage B. Der Mittelwert des Essigsäuregehalts von Anlage A liegt in Fermenter 1 bei 0,73 g/kg, bei Fermenter 2 bei 0,97 g/kg. Anlage B dagegen liegen die Essigsäuregehalte bei 0,12 g/kg in F 1 bzw. 0,1 g/kg in F 2.

Der FOS/TAC-Wert zeigt das Verhältnis aus der Menge an flüchtigen organischen Säuren (FOS) und dem gesamten anorganischen Carbonat (TAC). Es kann davon ausgegangen werden, dass der Säureverbrauch durch Titration bis zum Erreichen von pH 5 auf die Carbonat- und Hydrogencarbonatkonzentration zurück zu führen ist und der pH-Bereich 5,0 – 4,3 auf den Anteil organischer Säuren schließen lässt. Die flüchtigen organischen Säuren (FOS) werden als Essigsäureäquivalent in mg/l gemessen. Die Carbonatpufferkapazität wird in in mg CaCO<sub>3</sub>/l gemessen. Ein FOS/TAC-Verhältnis von 0,3 bis 0,4 gilt in der Praxis als normal, allerdings hat jede Anlage ihren eigenen Optimalwert. Dieser anlagenspezifische Wert ist abhängig von der Substratzusammensetzung und lässt sich nur über regelmäßige Messungen und längerfristige Dokumentation ermitteln. Die gemessenen FOS/TAC-Werte liegen im Normalbereich. Bei BGA A liegt in Fermenter 2 ein Maximalwert von 0,38 vor, der eine Tendenz Richtung oberen Grenzwert aufweist, aber immer noch nicht als kritisch einzuordnen ist.

**Tabelle 23: Vergleich von Essigsäuregehalt und FOS/TAC beider Untersuchungsbetriebe**

	Essigsäure [g*kg <sup>-1</sup> ]				FOS/TAC			
	Fermenter 1		Fermenter 2		Fermenter 1		Fermenter 2	
	BGA A	BGA B	BGA A	BGA B	BGA A	BGA B	BGA A	BGA B
Mittelwert	0,73	0,12	0,97	0,1	0,08	0,02	0,12	0,01
Minimum	0,07	0,05	0,14	0,06	0,03	0,01	0,03	0,01
Maximum	1,81	0,05	2,54	0,17	0,21	0,07	0,38	0,07

Die folgende Tabelle zeigt die Gehalte an Propionsäure im direkten Anlagen Vergleich. Bei Anlage B lagen alle Messwerte in einem Bereich unterhalb von 0,05 g/kg. Dieser Bereich ist vernachlässigbar und wird aus diesem Grund nicht als exaktes Analyseergebnis dargestellt.

**Tabelle 24: Kennwerte der Propionsäuregehalte von Untersuchungsbetrieb A und B**

	Propionsäure [g*kg <sup>-1</sup> ]				
	BGA A			BGA B	
	F 1	F 2	F 3	F 1	F 2
Mittelwert	0,08	0,16	0,08	< 0,05	< 0,05
Minimum	0,05	0,08	0,08	< 0,05	< 0,05
Maximum	0,1	0,26	0,08	< 0,05	< 0,05

Da die Anhäufung von Säuren hemmend auf den anaeroben Abbau wirkt, kommt dem Verhältnis der organischen Säuren zueinander eine besondere Bedeutung zu. Das Verhältnis von Essigsäure zu Propionsäure soll nach STENGL ET AL. (2007) sowie EDER UND SCHULZ (2006) bei 3:1 liegen. Ein Verhältnis kleiner 2:1 deutet auf eine Prozessstörung hin (PREIBLER), das bedeutet, je enger das Verhältnis der Säuren zueinander liegt, desto eher kommt es zu einer Hemmung oder Störung des Abbauprozesses. BISCHOFF (mündliche Mitteilung, 2009) spricht von einem günstigen Essigsäure-Propionsäure-Verhältnis von 5:1. Die gemessenen Werte von Essig- und Propionsäure beider Untersuchungsbetriebe geben keinen Hinweis auf eine Prozessstörung. Das Verhältnis der Säuren zueinander ist unbedenklich.

#### 4.3.6 Essigsäureäquivalent

Ein weiterer Parameter zur Beurteilung der Prozessstabilität stellt das Essigsäureäquivalent dar, welches sich aus der Summe der organischen Säuren zusammensetzt. Im Folgenden werden die Essigsäureäquivalente beider Untersuchungsbetriebe anhand der Abbildungen vorgestellt. Das Endlager wird dabei nicht berücksichtigt. BGA A beschreibt Werte zwischen 0,2 und 3,5 mg/l. Es ist erkennbar, dass in Fermenter 2 deutlich höhere Gehalte vorliegen.



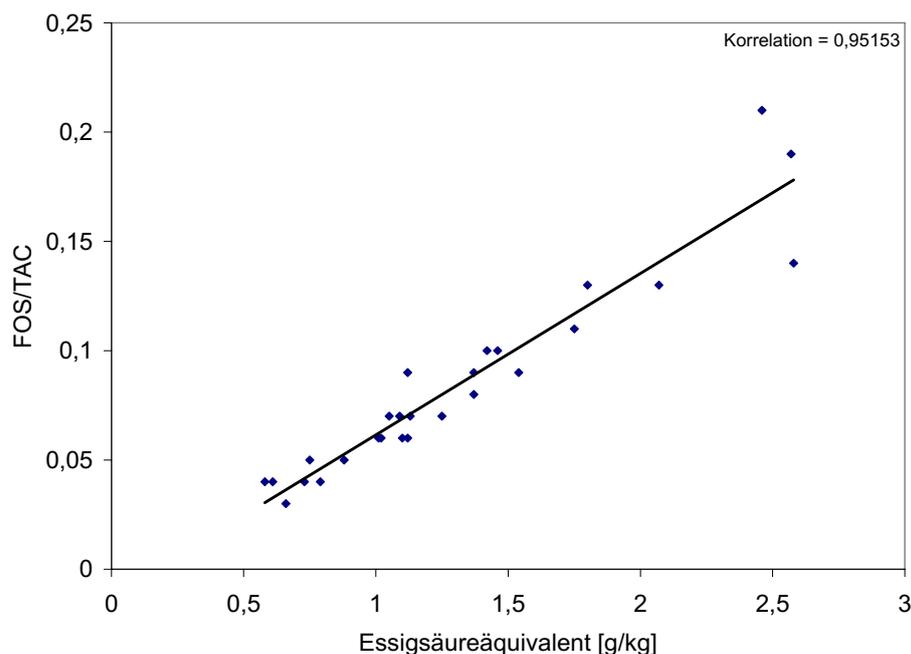


Abbildung 37: Beziehung zwischen Essigsäureäquivalent und FOS/TAC

#### 4.3.7 Vergleich der Prozessstabilität zwischen zwei Anlagentypen

Für den Vergleich der Prozessstabilität zwischen Anlagen mit und ohne Flüssigmistbeschickung wurde der Parameter „Essigsäureäquivalent“ verwendet. Die Untersuchungsbetriebe A und B wurden hier mit drei weiteren NawaRo-Anlagen verglichen, die eine tägliche Flüssigmistzugabe erhalten. Das Ergebnis soll die Antwort auf die Ausgangshypothese geben, in der von einer geringeren Prozessstabilität gegenüber Anlagen mit Flüssigmistbeschickung ausgegangen wird. Da die Einzelwerte der Untersuchungsbetriebe A und B bereits vorgestellt wurden, werden die Werte der Übersicht halber zusammenfassend mit einem schwarzen Dreieck gekennzeichnet.

Festzustellen war, dass die Werte der Betriebe mit Flüssigmisteinsatz mit denen von BGA A und B vergleichbar sind. Es gibt daher keinen Hinweis dafür, dass sich die Werte von den beiden Untersuchungsbetrieben in besonderer Weise abheben, überwiegend liegen die Werte sogar im gleichen Bereich zwischen 0,5 und 1,7 mg/l. Einzelwerte der mit Festmist beschickten Anlage liegen etwas höher, sind jedoch weit unter dem Grenzbereich angesiedelt. Aufgrund der geringen Anzahl der Anlagen, die den Daten zu Grunde lagen, ist die Übertragbarkeit auf andere Anlagen kritisch. Weiterhin muss beachtet werden, dass hier nur zwei spezielle Anlagentypen verglichen wurden. Trotzdem kann man für die

vorgestellte Untersuchung das Fazit ziehen, dass die Prozessstabilität von NawaRo-Anlagen, die auf den kontinuierlichen Einsatz von Flüssigmist verzichten, nicht instabiler ist als bei den Vergleichsanlagen.

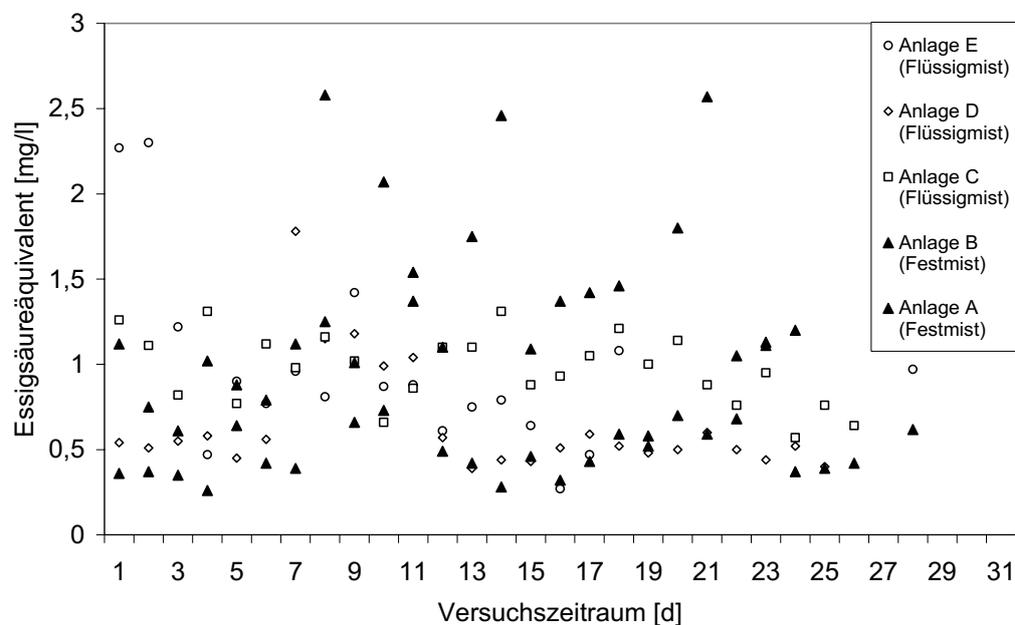


Abb.: Vergleich der Prozessstabilität anhand des Parameters „ Essigsäureäquivalent“

#### 4.4 Gasanalyse

Die wichtigste Größe im Verfahrensablauf ist der Biogas- bzw. Methanertrag, wobei eine Unterscheidung der beiden Größen von großer Bedeutung ist, da allein der Methangehalt den energetischen Ertrag widerspiegelt. Im Biogasgehalt sind  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$  und andere Spurengase enthalten, die keine Energie liefern.

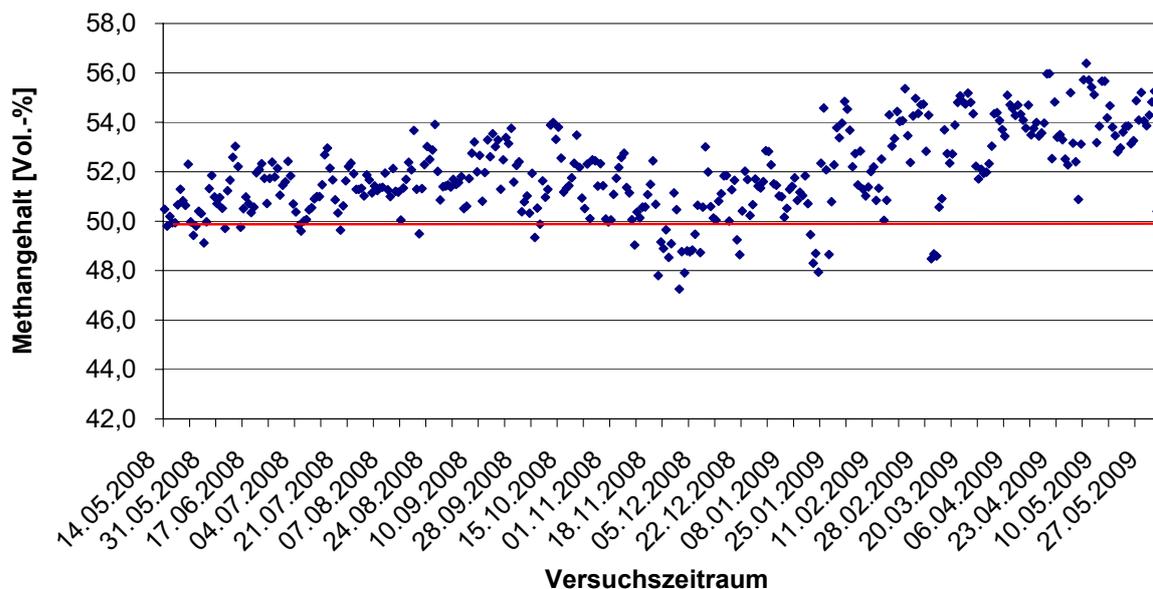
##### 4.4.1 Methan

Die Höhe des Methanertrags ist von vielen Faktoren abhängig. Zu diesen Faktoren zählen die Substratzusammensetzung, die mikrobielle Abbaubarkeit des Materials, der Gehalt an TS und oTS sowie das Nährstoffverhältnis. Auch die Fermentertechnologie kann sich auf den Methangehalt auswirken. Rührtechnik, Fermentertemperatur sowie Häufigkeit der

Substratzugabe und Schwankungen der täglichen Substratzufuhr können sich auf den Methangehalt auswirken (SCHATTNER, S; GRONAUER, A., 2000).

Da der Methangehalt unter Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis und nicht unter standardisierten Laborbedingungen erfasst wurde, ist es schwierig die in der Abbildung dargestellten Schwankungen von einzelnen Einflussfaktoren abhängig zu machen. Die hier dargestellten Tagesmittelwerte zeigen den Methangehalt im gesamten Versuchszeitraum.

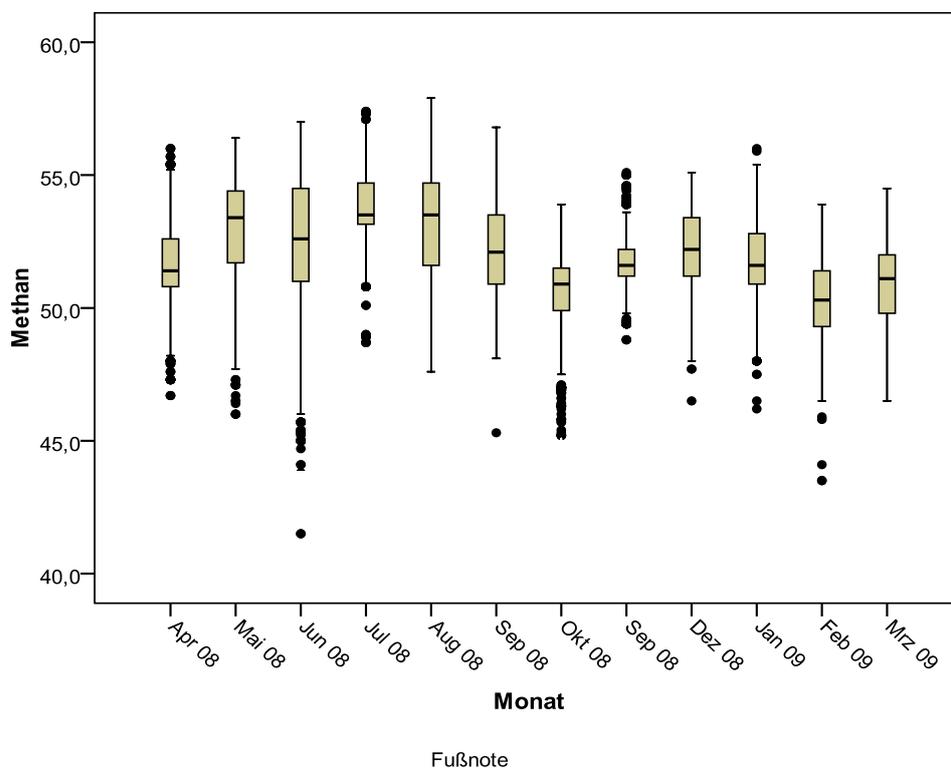
Der Methangehalt des zur Verbrennung aufbereiteten Biogases erreichte bei der Anlage A Werte zwischen 40 und 57,9 Vol.-%. Die Langzeituntersuchung zeigt einen Mittelwert von 51,9 Vol.-%. Nach Literaturangaben sollte der Methangehalt nicht unter 50 Vol.-% liegen (KTBL, 2009).



**Abbildung 38: Methangehalt der Anlage A im Versuchszeitraum**

Nach statistischer Auswertung der gemessenen Einzeldaten für jeden Versuchsmonat zeigt sich folgendes Bild (Abb. 39), wobei der Median den Wert der Verteilung kennzeichnet, bis zu dem 50 % aller Daten vorliegen. Auch anhand dieser Darstellung ist erkennbar, dass ein Großteil der Daten, die den Methangehalt beschreiben, über dem Mindestgehalt von 50 % liegt. Die Länge der Box entspricht dem Interquartilsabstand, welcher das Maß der

Streuung der Daten angibt. Dieses wird durch die Differenz des oberen und unteren Quartils bestimmt.



**Abbildung 39: Boxplot zur Darstellung des Methangehalts bei BGA A**

Die Tagesmittelwerte der Methangehalte der BGA B liegen zunächst deutlich über der 50 % Grenze. Mit der Erhöhung des Festmistanteils ab dem 01.01.2009 wurde der Methangehalt vermindert und lag für die Zeitdauer von ca. vier Monaten teilweise nur bei 48 %. Ab Versuchsmonat Mai 09 konnte wieder ein Anstieg des Methangehalts verzeichnet werden.

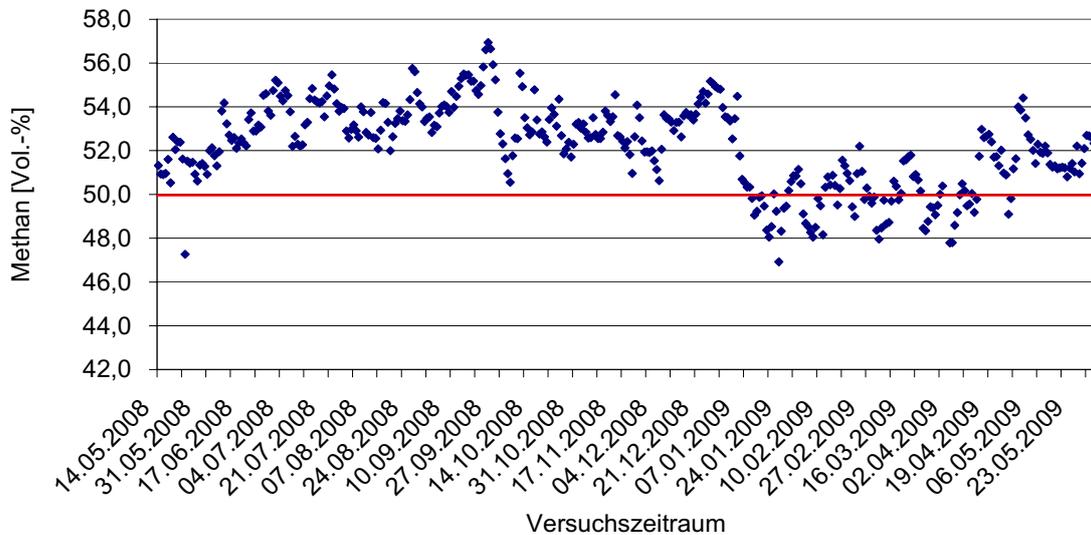


Abbildung 40: Methangehalt Anlage B

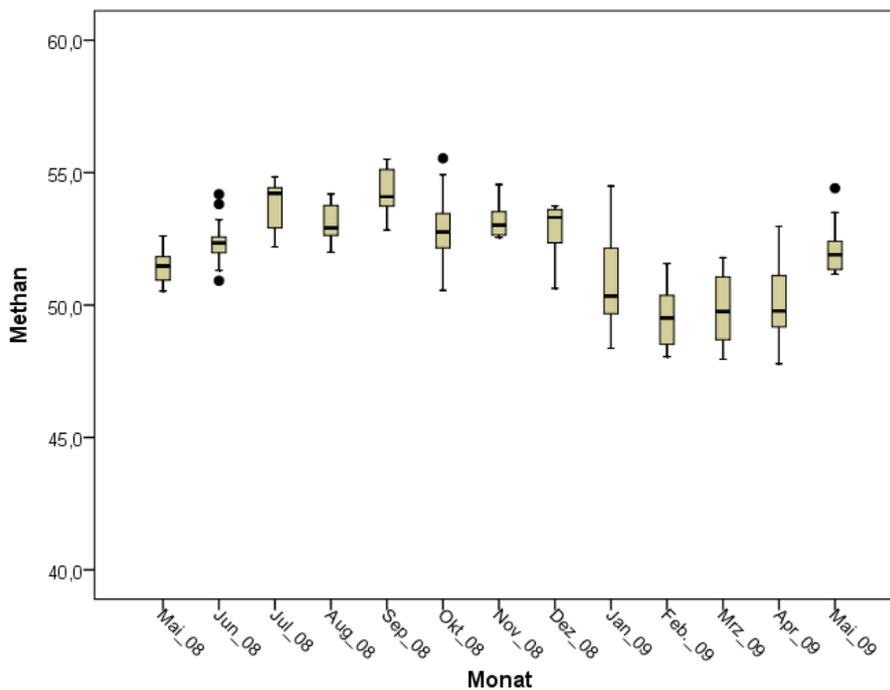


Abbildung 41: Boxplot zur Darstellung des Methangehalts bei BGA B

#### 4.4.2 Schwefelwasserstoff

Die gemessenen Werte des Schwefelwasserstoffgehaltes liegen bei BGA A im Mittel bei 24,3 ppm. Es konnten Minimalwerte von 0 und Maximalwerte von 348 ppm festgestellt werden. In der folgenden Abbildung wird der Schwefelwasserstoffgehalt dem Methangehalt gegenübergestellt, da bei Anlage A Einzelversuche mit Zugabe von Eisenhydroxid stattgefunden haben, die sich positiv auf den Methangehalt im Biogas ausgewirkt haben. Anhand der Abbildung ist schon erkennbar, dass der Methangehalt steigt, wenn der Schwefelgehalt reduziert ist.

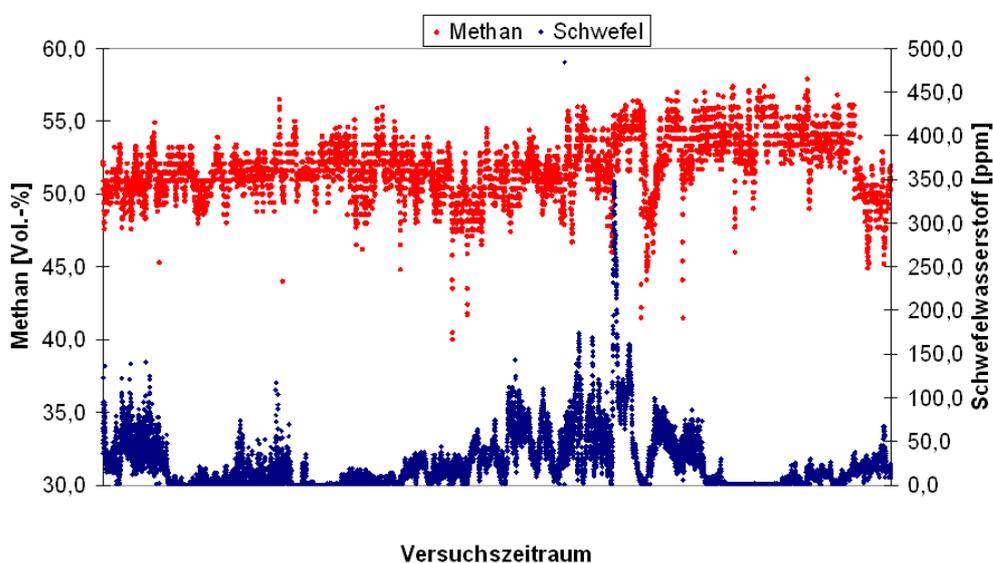


Abbildung 42: Schwefelwasserstoffgehalte der Anlage A

#### Eisenzugabe

Als unterstützendes Instrument zur Entschwefelung wurde Eisenhydroxid hinzugegeben. Im Einzelversuch konnten durch die Zugabe von Eisenhydroxid Schwefelwasserstoffgehalte von 0 bis 10 ppm gemessen werden, wodurch der Anteil an Methan im Gasgemisch gesteigert werden konnte. Die statistische Auswertung zeigt diesen Zusammenhang in dem Zeitraum, in dem die Eisenzugabe erfolgte.

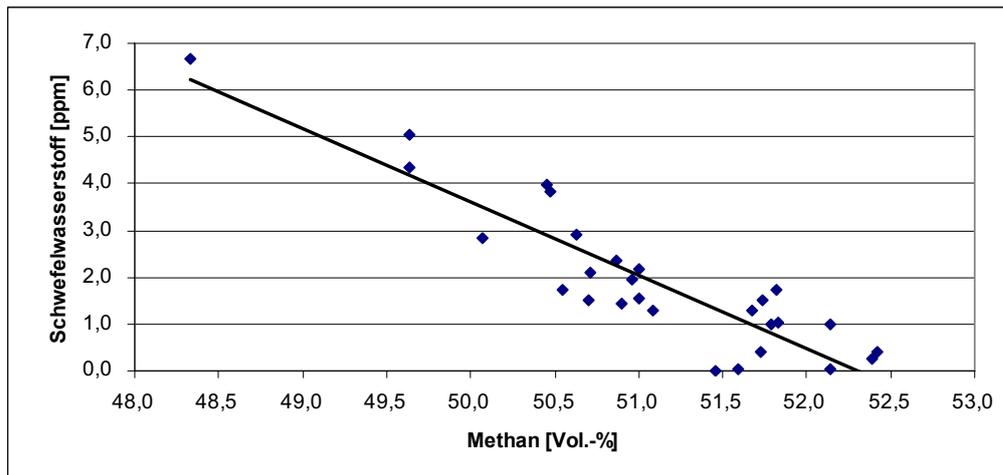


Abbildung 43: Abhängigkeit des Methangehaltes vom Schwefelwasserstoff nach Eisenzugabe

Die gemessenen Schwefelwasserstoffgehalte für Anlage B liegen im Vergleich höher. Hier wurde ein Mittelwert von 62,6 ppm errechnet. Das Maximum liegt bei 347,9 ppm, das Minimum bei 0 ppm.

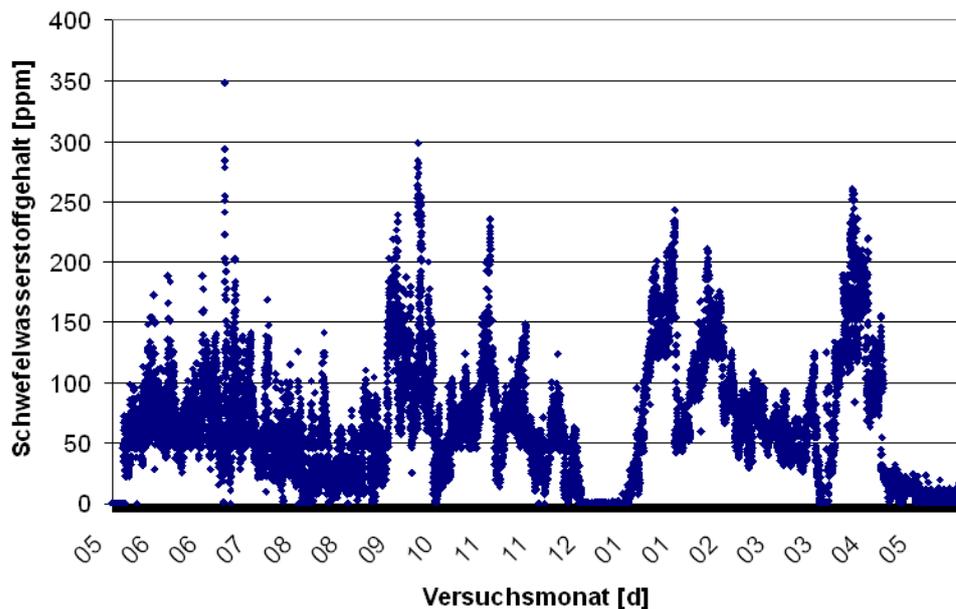


Abbildung 44: Schwefelwasserstoffgehalt Anlage B

Der Vergleich der ermittelten Werte mit der Literatur zeigt, dass beide Anlagen nahezu im Optimalbereich liegen. Der empfohlene Grenzwert von 200 ppm (KTBL, 2009) wird. Ebenso empfehlen EDER UND SCHULZ (2006) einen Gehalt unter 200 ppm anzustreben. Durch

die Zugabe von Eisen kann der Schwefelwasserstoffgehalt zwar gesenkt werden, allerdings ist zu viel Eisen auch nicht gut für die Lebensbedingungen der Bakterien im Fermenter.

#### 4.4.3 Sauerstoff

Der Sauerstoffeintrag erfolgt zum einen über die Substratzugabe und zum anderen über die biologische Entschwefelung, bei der Außenluft in den Gasraum eingeblasen wird, um den Schwefelwasserstoff in elementaren Schwefel sowie Schwefelsäure und Wasser umzuwandeln. Der Sauerstoffgehalt wird anhand der Abbildung 44 im direkten Vergleich dargestellt.

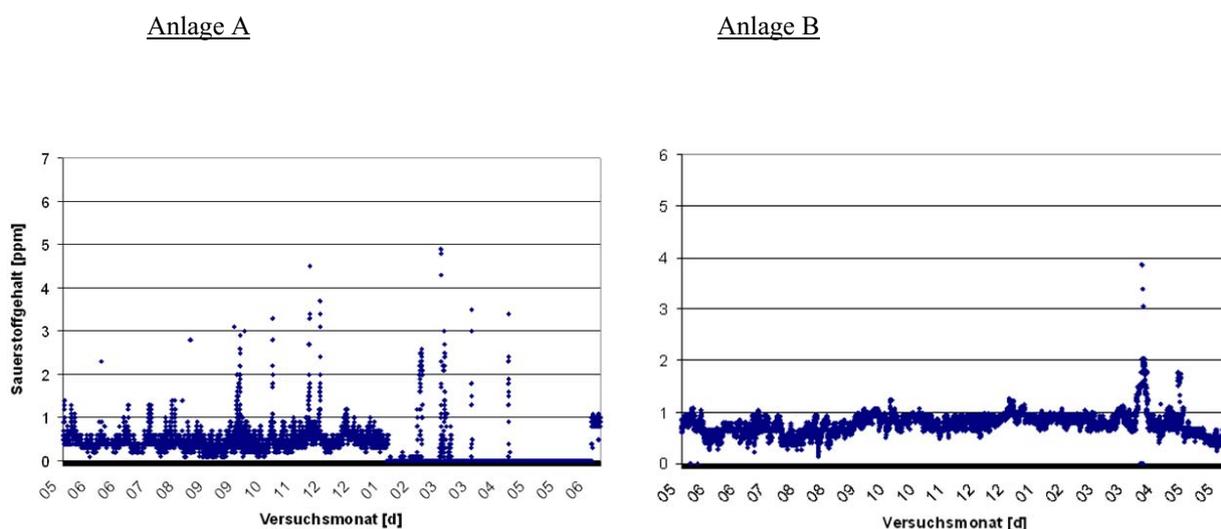


Abbildung 45: Sauerstoffgehalt der Anlagen A und B

Im Jahresverlauf ergibt sich ein Mittelwert bei Anlage A von 0,32 Vol.-% und bei Anlage B von 0,77 Vol.-%. Als kritischer Grenzwert wird in der Literatur ein Gehalt von 2 Vol.-% beschrieben (FNR, 2006). BGA A überschreitet diesen Grenzwert an 11 Versuchstagen, Anlage B an einem. Diese Überschreitung ist als unbedenklich einzuschätzen.

#### 4.5 Spurenelemente

Spurenelemente stabilisieren den biologischen Prozess im Fermenter. Durch die Wirkungsweise der Nährstoffe soll die Gasbildung gefördert werden. Weiterhin soll die Ausnutzung des Einsatzsubstrates gefördert werden (PREIBLER, 2009).

An beiden Anlagen wurde eine Untersuchung auf Spurenelemente durchgeführt:

**Tabelle 25: Gehalt an Spurenelementen 1.Termin**

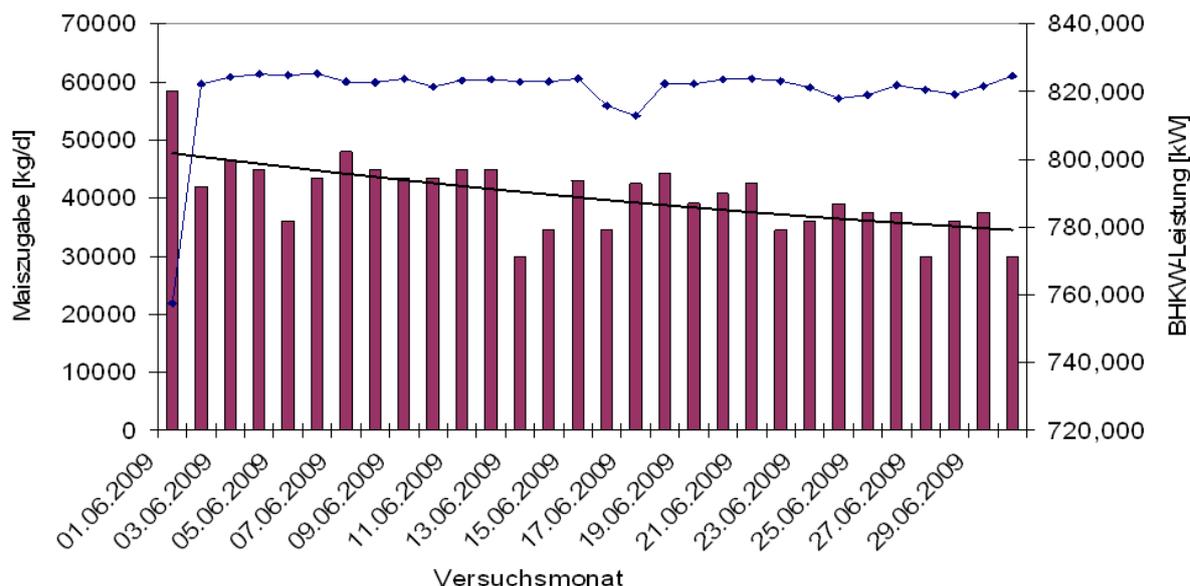
	Anlage A			Anlage B	
	F 1	F 2	F 3	F 1	F 2
Nickel [ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	0,3	0,19	0,33	1,03	1,2
Kobalt [ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	0,07	0,04	0,07	0,21	0,23
Molybdän [ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	0,25	0,16	0,24	0,3	0,32
Selen [ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	0,02	0,01	0,02	0,08	0,08

**Tabelle 26: Gehalt an Spurenelementen 2.Termin (Kontrolltermin)**

	Anlage A			Anlage B	
	F 1	F 2	F 3	F 1	F 2
Nickel [ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	0,28	0,21	0,26	0,96	1,08
Kobalt [ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	0,12	0,13	0,1	0,35	0,39
Molybdän [ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	0,19	0,15	0,19	0,33	0,34
Selen [ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	0,03	0,03	0,03	0,09	0,09

Vergleicht man die Ergebnisse mit den Zielvorgaben nach SAHM (1981) fällt auf, dass Untersuchungsbetrieb A einen Mangel an Kobalt speziell in Fermenter 2 aufweist; Untersuchungsbetrieb B ist dagegen übertversorgt. Bei Anlage A wurde der Mangel durch Spurenelementergänzungen behoben. Eine erneute Analyse des Gärsubstrates bestätigte, dass dadurch die Zielwerte erreicht werden konnten. Bei Anlage B wurde zum zweiten Probenahmetermin nochmals eine Kontrollanalyse durchgeführt, in der sich wiederholt ein ausreichender Gehalt aller essenziellen Spurenelemente bestätigte.

Die Zugabe an Spurenelementen erfolgte am Monatsbeginn. Als Effekt der Spurenelementzugabe konnte festgestellt werden, dass bei abnehmender Substratzugabe die Leistung nahezu konstant blieb.



**Abbildung 46: Substrateinsatz und BHKW-Leistung nach Spurenelementzugabe BGA A**

Nach Untersuchungen von PREIBLER (2009) tritt ein Spurenelementmangel oft an güllefreien bzw. güllearmen Biogasanlagen auf. In der Regel sind Spurenelemente aufgrund der tierischen Versorgung aber auch in Festmist enthalten. Beide Anlagenbetreiber verarbeiten einen geringen Anteil an Festmist, wobei der Einsatz bei BGA B im Vergleich zu BGA A deutlich höher ist. Mit Beginn dieses Jahres wurde der Anteil auf nahezu 30 % erhöht. Es besteht die Möglichkeit, dass dies der Grund für die ausreichende Versorgung mit Spurenelementen ist.

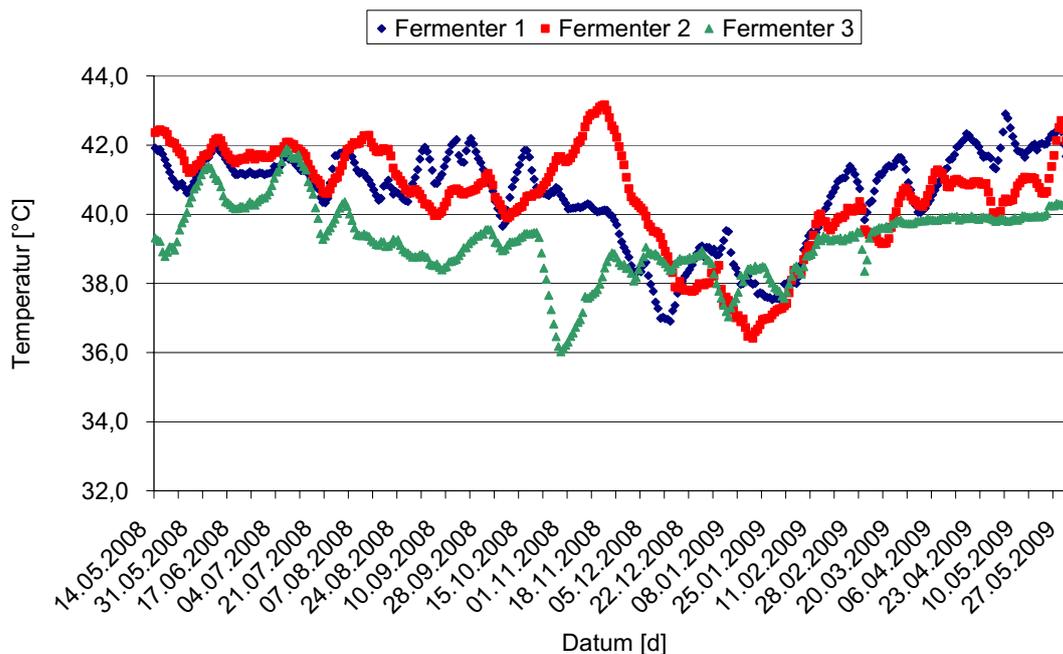
#### 4.6 Darstellung der energetischen Parameter

Zu den technischen Parametern zählen Fermentertemperaturen, Betriebstunden des BHKW, elektrische und thermische Leistung der Biogasanlage.

##### 4.6.1 Temperatur

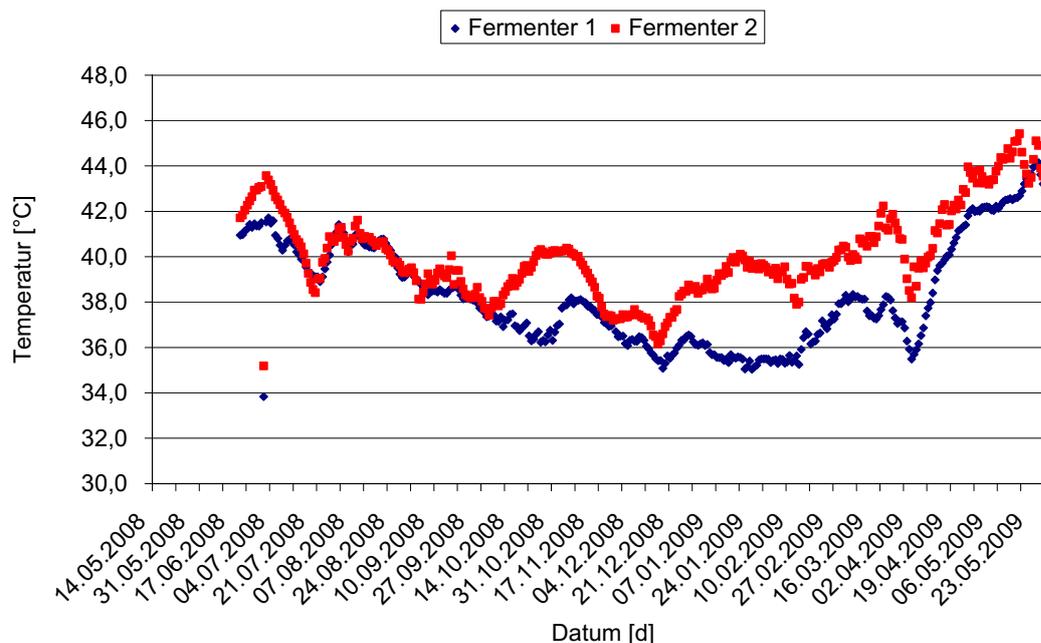
Die dargestellten Temperaturen beziehen sich auf die Tagesmittelwerte im Versuchszeitraum. Da sich die Temperaturen zeitlich nicht schnell verändern, sollen hier nicht die gemessenen Einzelwerte erläutert werden.

Der Temperaturverlauf von Anlage A zeigt einen deutlichen Abfall während der Wintermonate. Somit ergeben sich Schwankungsbreiten von 9,2 in F 1, von 17,3 in F 2 und 7,6°C. Im Endlager schwankten die Temperaturen zwischen 21,5 und 43,1°C, wobei diese Werte zu vernachlässigen sind, denn die Temperaturmessung ist abhängig von dem Füllstand des Endlagers. Nach Entleerung des Endlagers wurden daher automatisch niedrigere Werte aufgezeichnet.



**Abbildung 47: Darstellung des Temperaturverlaufs im Versuchszeitraum (BGA A)**

Auch bei Anlage B ist erkennbar, dass höhere Fermentertemperaturen in den Monaten April bis August vorliegen als während der kalten Jahreszeit. Die Mittelwerte lagen im Bereich 36,6 in F 1, 38,2 in F 2 und 34,0°C im Endlager. Durch Auswertung der Minimal- und Maximalwerte konnten Schwankungsbreiten von 13,4 (F 2) bis 15,4°C (F 1) festgestellt werden.



**Abbildung 48: Darstellung des Temperaturverlaufs im Versuchszeitraum (BGA A)**

Laut KTBL (2009) kann sich ein stabiler Biogasprozess nur bei konstanten Temperaturbedingungen einstellen. Temperaturschwankungen von 1°C können Auswirkungen auf die Gasbildungsrate oder andere Parameter haben. Aufgrund dessen wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt, um herauszufinden, welcher der gemessenen Parameter von den Temperaturschwankungen betroffen sein könnte. Ein Zusammenhang konnte nicht festgestellt werden. Wie die Laboruntersuchungen belegen, konnte auch eine Prozessinstabilität nicht nachgewiesen werden, also ist auch hier kein negativer Zusammenhang nachzuweisen. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass durch 2 Temperatursensoren nicht der komplette Fermenterinhalt beurteilt werden kann. Die Temperaturerfassung ist außerdem von vielen anderen Faktoren abhängig, wie zum Beispiel von der Substratzugabe oder den Rührintervallen. Die ermittelten Schwankungsbreiten der Werte können daher eher auf Messfehlern beruhen.

#### 4.6.2 Leistung

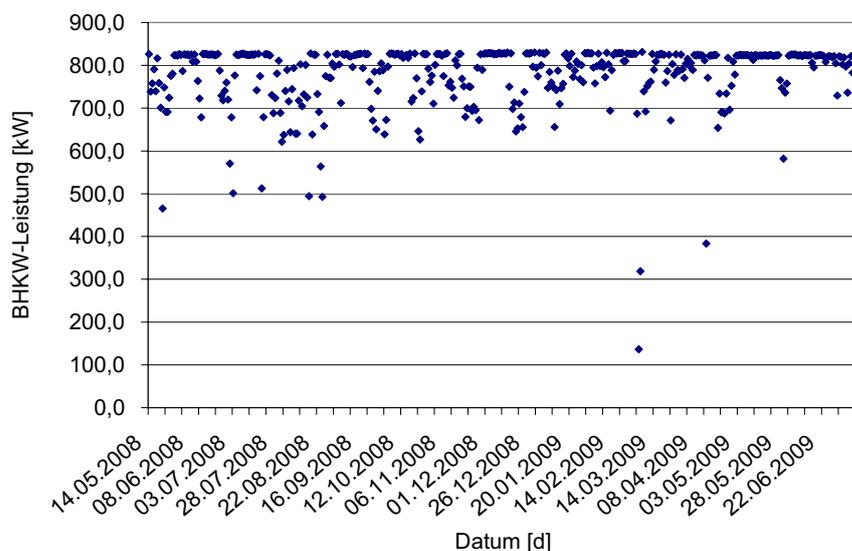
In diesem Kapitel wird die Leistung des Blockheizkraftwerkes beschrieben. Für die Wirtschaftlichkeit sind Leistung und Wirkungsgrad der Verstromung entscheidende Größen. Untersuchungsbetrieb A hat eine installierte elektrische Leistung von 835 kW<sub>el</sub>, Untersuchungsbetrieb B von 625 kW<sub>el</sub>.

Das Blockheizkraftwerk von BGA A konnte im Betriebsjahr 2008 bei 8652 Stunden eine Auslastung von 98 % verzeichnen, wobei die verkaufte Strommenge 6.531.833 kWh betrug.

**Tabelle 27: Betriebsstunden des BHKW (BGA A)**

<b>BHKW-Laufzeit BGA A</b>			
	1 Tag des M.	1 Tag des M.	
<b>2008</b>	Monatsbeginn	Monatsende	<b>Differenz</b>
Jan	14242	14996	754
Feb	14996	15643	647
Mrz	15643	16352	709
Apr	16352	17091	739
Mai	17091	17791	700
Jun	17791	18510	719
Jul	18510	19248	738
Aug	19248	19974	726
Sep	19974	20692	718
Okt	20692	21435	743
Nov	21435	22152	717
Dez	22152	22894	742
Summe	-	-	8652

Eine relativ konstante Leistung um die 780 kW konnte im Mittel errechnet werden.



**Abbildung 49: Leistungsverlauf auf Basis der Mittelwerte (Anlage A)**

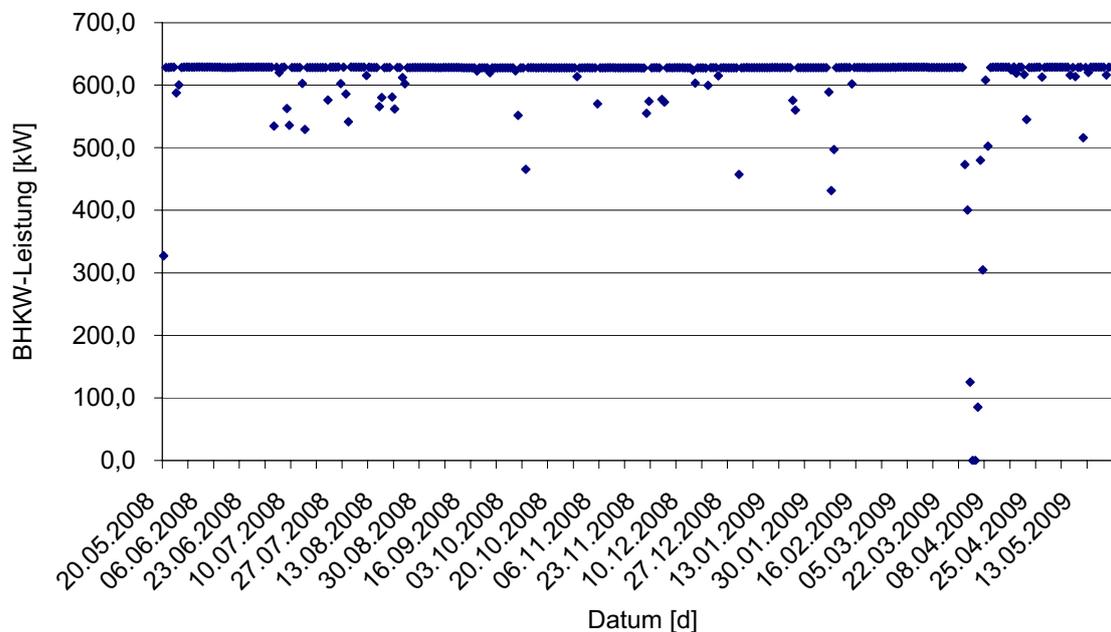
Ziel der Kraft-Wärme-Kopplung aus Biogas ist nicht nur den Strom, sondern auch die entstandene Abwärme möglichst vollständig zu nutzen. Ein Teil der Abwärme dient der Beheizung der Fermenter. Die übrige Abwärme des BHKW wird zur Beheizung des Sauenstalls, der angrenzenden Wohnhäuser und der Betriebsgebäude verwendet. Seit Beginn des Jahres 2009 gehört eine Trocknungsanlage zum Abwärmenutzungskonzept, welches die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage beeinflusst. Denn für die Nutzung der Abwärme erhält der Betreiber den sogenannten KWK-Bonus (EDER UND SCHULZ, 2006).

**Tabelle 28: Abwärmenutzung der BGA A im Versuchszeitraum**

Wärmeverbrauch [kW] BGA A		
	Sauenstall	Rest
Apr 08	3138,3	137,9
Mai 08	3346,3	219,6
Jun 08	3471,1	315,2
Jul 08	3574,9	413,2
Aug 08	3672,8	506,7
Sep 08	3763,4	601,3
Okt 08	3864,3	699
Nov 08	3994,7	805
Dez 08	4201,7	910,6
Jan 09	4414,2	1050,1
Feb 09	4647,2	1188,5
Mrz 09	4853,4	1309,6
Apr 09	5057,7	1416,6
Mai 09	5193,3	1527,7

Rest = Trocknung, Hallenheizung, Wohnhäuser

Die Leistung von Anlage B befand sich nahezu an der Grenze von 625 kW<sub>el</sub>. Der Motor läuft auf Vollast, daher wurde kürzlich ein zusätzliches BHKW-Modul installiert. Der Leistungsabfall im Monat April 09 basiert auf Wartungsarbeiten am BHKW.



**Abbildung 50: Leistungsverlauf auf Basis der Mittelwerte (Anlage B)**

Die folgende Abbildung beschreibt den Wirkungsgrad des BHKW von Untersuchungsbetrieb B. Dieser ist ein Maß dafür, wie effektiv die zugeführte Energie genutzt wird und liegt im Mittel bei 30 %, gegen Ende der Datenaufzeichnung sogar bei 37,3 %. Der elektrische Wirkungsgrad sollte zwischen 30 und 40 % liegen (GRUBER, 2007; KTBL, 2007). Dieses Kriterium konnte Untersuchungsbetrieb B erfüllen.

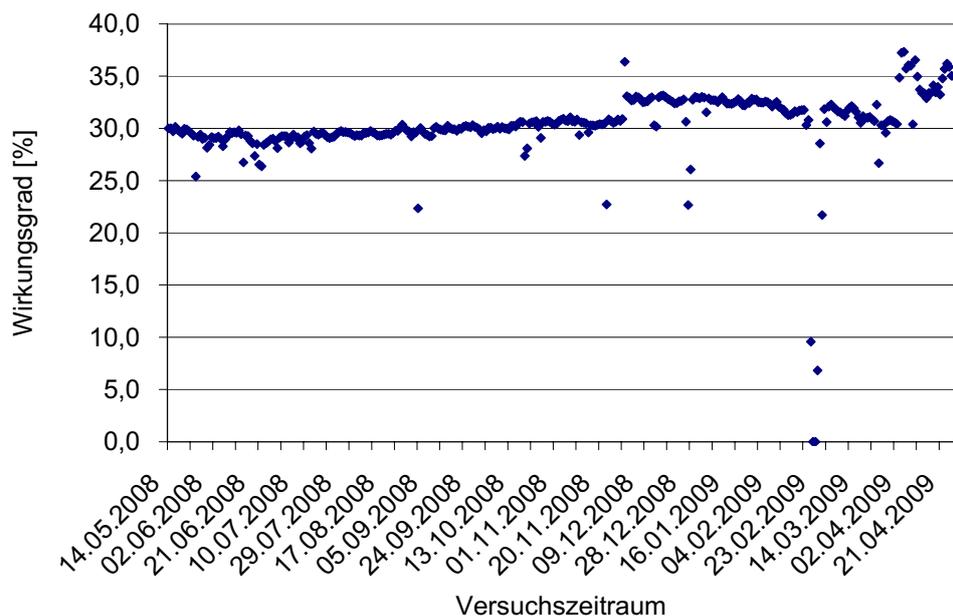


Abbildung 51: Wirkungsgrad Anlage B

#### 4.7 Untersuchungsergebnisse der Gärversuche im Batchfermenter

Da das Volumen von Gasen von der Temperatur und dem Druck abhängig ist, beziehen sich die folgenden Messergebnisse auf die normierten Eigenschaften. Eine Ausdehnung des Gases wird durch hohe Temperaturen hervorgerufen und führt zu einem geringeren volumenbezogenen Heizwert und umgekehrt. Mit steigendem Luftdruck enthält eine Volumeneinheit mehr Gas und steigert somit den Heizwert. Mit zunehmendem Feuchtegehalt sinkt der Heizwert. Der Normzustand liegt demnach bei einer Temperatur von 0 °C und bei einem Luftdruck von 1,01325 bar bei einer relativen Gasfeuchte von 0 %. Die Angabe der Gasproduktion erfolgt in Norm-l pro kg oTS.

Zunächst werden die Ergebnisse der Gärversuche der Biogasanlage A vorgestellt. Es wurden die Gaserträge der Inputmaterialien Maissilage und Hähnchenmist ermittelt, sowie die CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>-Gehalte im Gärgas gemessen. Der Versuch wurde im Batchfermenter in 3-facher Wiederholung durchgeführt.

Die Maisproben wurden direkt dem Silo aus zwei verschiedenen Schichten entnommen, 50 cm unterhalb der Oberfläche mittig des Silo, um verminderte Gaserträge als Folge von

Qualitätsunterschieden innerhalb der gelagerten Maissilage zu finden. Die Tabelle zeigt die gemessenen Werte innerhalb eines Versuchszeitraumes von 23 bzw. 30 Tagen.

**Tabelle 29: Vergleich der Gaserträge aus der Maissilage (oben/mitte Anlage A) vom 26.5.09**

Mais oben				Mais mitte		
Gaserträge [NI/kg oTS]				Gaserträge [NI/kg oTS]		
Tag	F 1	F 2	F 3	F 1	F 2	F 3
0	0	0	0	0	0	0
1	41,64	29,1	49,51	37,81	25,5	31,12
2	215,97	204,51	219,19	191,13	176,14	130,37
3	347,23	319,65	344,37	338,77	322,71	268,9
6	501,15	440,98	460,32	506,81	506,54	455,41
9	556,66	491,84	511,53	565,97	552,86	514,58
15	611,55	559,62	582,9	651,43	650,63	585,85
23	678,52	600,8	652,02	708,45	683,29	614,49
30	-	-	-	715,68	691,32	614,49

Der Gasertrag der Maisprobe aus dem oberen Bereich ist ab dem Tag 23 nach Erreichung des Maximalwertes nicht mehr in die Ergebnisdarstellung mit eingeflossen. Es ist deutlich zu sehen, dass der Gasertrag der ersten Probe aus dem oberen Bereich gegenüber der Probe aus der Mitte stark vermindert ist. Es können Maximalwerte zwischen 600, 8 und 678,52 NI/kg oTS erzielt werden. Bei der Probe aus der Mitte konnten hingegen bis zum 30. Tag noch 708,45 NI/kg oTS gemessen werden

Die statistische Auswertung der Einzeldaten aus drei Wiederholungen hat ergeben, dass der TS-Gehalt der beiden Maisproben um 7,6 % differiert. Die erzielbare Gasausbeute lag bei dem Mais aus dem Randbereich im Mittel bei 655 NI/kg oTS, während sich ein Mittelwert der Probe aus der Mitte des Silos bei 674 NI/kg oTS errechnete. Der Variationskoeffizient ergab 6,2 bzw. 7,8 %. Die Bestimmung der Methanausbeute zeigte einen Unterschied der beiden Proben von 8 NI/kg oTS, wobei der Methangehalt bei 54,9 bzw. 55,3 % lag.

**Tabelle 30: Kennwerte der Maissilage von Untersuchungsbetrieb A**

Probe	TS [%]	oTS/TS [%]	NI/kg oTS	CV [%]	CH4 [%]	CH4 [NI]
Mais oben	22,3	97,2	655	6,2	55,3	362
Mais mitte	29,9	97,0	674	7,8	54,9	370

Der Vergleich der Messergebnisse mit Literaturwerten zeigt, dass die ermittelten Werte im Normbereich liegen (KTBL, 2005).

Der Gärtest aus Hähnchenmist lieferte folgendes Ergebnis:

**Tabelle 31: Gasertrag des Hähnchenmistes (Anlage A) vom 26.05.09**

Hähnchenmist	NI/kg oTS		
	Gaserträge $\Sigma$		
Tag	F 1	F 2	F 3
0	0,00	0,00	0,00
1	25,97	14,57	12,91
2	73,40	70,50	85,84
3	119,33	89,26	101,49
6	172,56	133,58	164,68
9	205,74	170,07	193,50
15	353,83	320,86	347,61
23	499,59	463,72	513,49
30	517,63	468,28	535,88
37	528,47	475,18	544,43
45	531,37	478,29	554,38

Der Hähnchenmist hatte einen TS-Gehalt von 42,3 %, die gemessenen NI/kg oTS lagen bei 521. Laut KTBL (2005) weist Hähnchenmist einen Gasertrag von ca. 500 NI/kg oTS auf. Der Messwert des Gasertrages liegt also über den Literaturwerten.

Nun folgen die Ergebnisse der Gärversuche zu den Inputmaterialien der Biogasanlage B. Es handelt sich ebenfalls um Versuche mit Maissilage aus verschiedenen Schichten des Silos. Die Hähnchenmistprobe wurde durch Rindermist ersetzt.

**Tabelle 32: Gaserträge der Maissilage oben (Anlage B) vom 26.05.09**

Mais oben				Mais mitte			
Gaserträge [NI/kg oTS]				Gaserträge [NI/kg oTS]			
Tag	F 1	F 2	F 3	Tag	F 1	F 2	F 3
0	0	0	0	0	0	0	0
1	53,15	40,51	31,53	1	19,80	25,48	44,40
2	204,75	203,63	200,82	2	167,59	167,04	220,83
3	364,14	348,98	338,30	3	260,70	298,82	370,17
6	526,41	524,73	536,80	6	479,31	493,36	546,88
9	579,50	577,25	594,10	9	533,37	552,83	605,81
15	655,12	657,37	680,68	15	622,63	614,26	655,34
23	702,31	712,70	719,16	23	647,23	638,58	705,35
30	718,03	732,08	732,64	30	668,59	662,10	718,05

Die Auswertung zeigt, dass auch bei Untersuchungsbetrieb B verminderte Gasausbeuten aus der Probe des oberen Bereichs der Maissilage erzielt wurden. Im Vergleich zur Probe aus der Mitte ergaben sich 39 NI weniger (Methan). Pro kg oTS wurden mittig des Silos 728 NI und oben nur 683 NI ermittelt. Weiterhin konnte ein um 3,3 %geringerer TS-Gehalt im oberen Bereich festgestellt werden.

**Tabelle 33: Auswertung der Gärversuche (Anlage B) vom 26.05.09**

Probe	TS [%]	oTS/TS [%]	NI/kg oTS	CV [%]	CH4 [%]	CH4 [NI]
Mais oben	29,0	95,4	683	4,5	52,6	359
Mais mitte	32,3	97,0	728	1,1	54,7	398

Der Gärversuch mit Rinderfestmist hat folgende Gaserträge geliefert:

**Tabelle 34: Gasertrag des Rindermistes (Anlage B) vom 26.05.09**

Rindermist	NI/kg oTS	
	Gaserträge $\Sigma$	
Tag	F 1	F 3
0	0,00	0,00
1	35,96	47,89
2	81,07	94,58
3	118,03	128,36
6	214,00	211,61
9	287,12	272,81
15	459,78	411,30
23	519,39	515,42
30	571,05	581,38
37	590,32	615,76
45	595,89	626,09

Da der Versuchsfermenter 2 als Ausreißer gewertet wurde, konnten nur die Werte aus Fermenter 1 und 3 betrachtet werden (n = 2).

**Tabelle 35: Auswertung des Gärversuchs „Rindermist“ (Anlage B) vom 26.05.09**

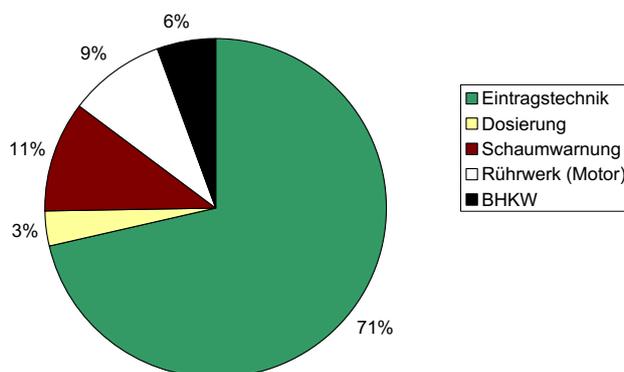
Probe	TS [%]	oTS/TS [%]	oTS/FS [%]	NI/kg oTS	CV [%]	CH4 [%]	CH4 [NI]
Rindermist	21,6	90,5	19,5	611	3,5	56,5	345

Rindermist (n = 2)

Der Vergleich mit Literaturwerten zeigt, dass TS und oTS-Gehalt nahezu übereinstimmen. Laut KTBL (2005) liegen der TS-Gehalt bei 21,8 % und der oTS-Gehalt bei 82,3 %. Der Methangehalt weist einen Wert von 53,2 % auf, während die eigens gemessenen Werte bei 56,5 % liegen. Eine große Abweichung besteht in der Angabe des Biogasertrages. Während laut Literatur nur 337 NI/kg oTS zu erzielen sein soll, konnten im eigenen Gärversuch 611 NI/kg oTS festgestellt werden.

#### 4.8 Störfallanalyse

Die Analyse der Störfälle konnte aufgrund der Steuerungssoftware nur anhand der Daten von Untersuchungsbetrieb A ausgewertet werden. Dabei wurden von allen eingehenden Störmeldungen die relevanten Betriebsstörungen mit der größten Häufigkeit berücksichtigt. Die Eintragstechnik bereitete zeitweise die größten Probleme, die inzwischen durch Umbaumaßnahmen behoben wurden. Auf dem zweiten Platz rangiert der Störfall „Schaumwarnung“. Dies bedeutet, dass durch einen Sensor die Gefahr gemeldet wird, dass Gärsubstrat oder Schaum auf eine kritische Höhe angestiegen sind und in gasführende Rohrleitungen eindringen können. Der Motor der Rührwerke hatte einen Anteil von 9 % an den Störmeldungen, das Blockheizkraftwerk 6 %. Ca. 3 % der Störfälle sind auf die Dosierung zurück zu führen.



**Abbildung 52: Auswertung der Störfälle**

Im Vergleich mit Literaturangaben zeigt sich, dass auch dort die meisten Störungen an den Funktionseinheiten BHKW, Feststoffeintrag, Pumpen und Rohrleitungen sowie Rührwerke festzustellen waren (KTBL, 2009).

## 4.9 Ergebnisse des Qualitätsmanagements

Als Optimierungsmethode fand der DLG Qualitätsstandard für Biogasanlagen Anwendung, welcher durch den Katalog der Mindestanforderungen und der zugehörigen Checklisten beschrieben wird (MÖLLER, 2008). Das Qualitätsmanagementsystem soll eine Optimierung der Biogasanlagen durch strukturierte Planung und kontinuierliche Verbesserungsprozesse (KVP) bewirken. Auf der Basis eines Kriterienkataloges mit beschriebenen Mindestanforderungen und Rahmenrichtlinien soll eine Zustandsbeschreibung der Anlage erfasst werden um anschließend einzelne Betriebsparameter optimieren zu können. Ein Verbesserungsprozess kann nur durch die Entwicklung von mittel- und langfristigen Zielen erreicht werden und den Anlagenbetreiber durch darauf aufbauende Struktur- und Prozessoptimierung unterstützen.

Das Bewertungssystem ist folgendermaßen aufgebaut:

A: Kriterium erfüllt (100 Punkte)

B: Kriterium nahezu erfüllt (75 Punkte)

C: Kriterium größtenteils nicht erfüllt (25 Punkte)

D: Kriterium nicht erfüllt (0 Punkte)

E: Nicht anwendbar

KO: Ein für das Bestehen des Audits erforderlicher Bestandteil des Standards wurde nicht erfüllt. Bei KO-Kriterien ist nur eine Bewertung mit A oder KO möglich.

Kapitel 1 des Standards beinhaltet die Planung, den Bau und die Inbetriebnahme einer Biogasanlage. Die wesentlichen Planungsbereiche werden an dieser Stelle nicht erwähnt, da die Biogasanlage A bereits seit 2006 in Betrieb ist. Aus diesem Grund wird mit Kapitel 2 „Qualitätsmanagement einer Biomethananlage“ begonnen.

Zunächst ist die Festlegung einer Unternehmensleitung von besonderer Wichtigkeit, da diese die Verantwortung für die Entwicklung, Verwirklichung und die ständige Verbesserung des Qualitätsmanagementsystems trägt. Zusätzlich ist die Unternehmensleitung verpflichtet, rechtliche Anforderungen mit der zugehörigen Dokumentation einzuhalten. Mindestens einmal pro Jahr überprüft die Unternehmensleitung die Eignung und Wirksamkeit des QM-Systems, wobei die Verbesserungsmöglichkeiten beurteilt, notwendige Änderungen des QM-Systems überprüft, Ziele angepasst und bewertet und die Aktualität des QM-Handbuches geprüft werden. Die Geschäftsführererklärung liegt vor, allerdings kann eine

Bewertung des QM-Systems noch nicht erfolgen, da die Einführung des System kürzlich erst vorgenommen wurde (s. Tab.36).

**Tabelle 36: Checkliste – Verantwortung der Leitung**

2.	Qualitätsmanagementsystem	A	B	C	D	E
2.1 Verantwortung der Leitung	Liegt eine schriftliche Geschäftsführererklärung vor? • Einhaltung gesetzlicher Anforderungen, • Verpflichtung zur kontinuierlichen Verbesserung, • Anforderungen der Kunden.	x				
	Liegt eine Bewertung des QM -Systems vor?					x

In Abstimmung mit der Qualitätspolitik entwickelt der Anlagenbetreiber messbare Ziele, die schriftlich definiert sind und vergleichbare Soll-Größen erhalten. Diese Kriterien werden erfüllt (s. Tab.37)

**Tabelle 37: Checkliste – Ziele des Anlagenbetreibers**

2.	Qualitätsmanagementsystem	A	B	C	D	E
2.1.1. Ziele	Wurden messbare Ziele festgelegt?	x				
	Stehen die Ziele im Einklang mit der Q- Politik (kontinuierliche Verbesserung)	x				

Da der Betrieb einer Biogasanlage sich direkt und indirekt auf die Umwelt auswirkt, sollte der Anlagenbetreiber über Kenntnisse bzgl. dieser Auswirkungen verfügen. Alle im Betrieb befindlichen und auftretenden Gefahrenstoffe, Abfälle und Emissionen sind in einem Umweltregister aufzuführen. Wünschenswert ist die Entwicklung eines Maßnahmenplans zur Minderung von negativen Umweltwirkungen. Dieses Kriterium wurde mit A bewertet.

**Tabelle 38: Checkliste - Umweltaspekte**

2.	Qualitätsmanagementsystem	A	B	C	D	E
2.1.2 Umwelt- aspekte	Sind die negativen/positiven Auswirkungen des Betriebs der Anlage (Umweltaspekte) ausreichend erkannt? Mindestinhalte: Gefahrstoffe, Abfälle, Emissionen	X				
	Wurden konkrete und realistische Maßnahmen festgelegt, um die Auswirkungen wirksam zu reduzieren?	X				

Der Anlagenbetreiber kann die anfallenden Tätigkeiten zum Betrieb der Biogasanlage beschreiben, wobei Kenntnisse und Fähigkeiten definiert werden. Zuständigkeiten und Kompetenzen der Mitarbeiter können erläutert werden. Eine Dokumentation sollte Schulungsbedarf und Aufgabenverteilung enthalten, insbesondere sollten auch Qualifikationsmaßnahmen festgehalten werden. Wie der Tabelle 39 entnommen werden kann, wurden diese Kriterien erfüllt bzw. nahezu erfüllt. Die Fähigkeiten des Personals sind im QM-Handbuch definiert, ein konkreter Schulungsplan fehlt, wobei Aufzeichnungen über durchgeführte Schulungen vorliegen.

**Tabelle 39: Checkliste – Qualifikation von Mitarbeitern**

2.	Qualitätsmanagementsystem	A	B	C	D	E
2.1.3. Mitarbeiter- qualifikation	Sind die erforderlichen Fähigkeiten des Personals in einem Qualifikationsprofil festgelegt?		X			
	Wird Schulungsbedarf regelmäßig ermittelt?	X				
	Gibt es einen Schulungsplan/Aufzeichnung über durchgeführte Schulung?		X			

Die folgende Checkliste bezieht sich auf den Inhalt des QM-Handbuches, welches die Prozessbeschreibung und dokumentierten Verfahren des Standards beinhaltet. Hierzu zählen die Dokumente für Planung, Durchführung und Lenkung der Prozesse.

Die Prozesse sind mit einer Verfahrensbeschreibung, mit Anweisungen und Verweisdokumenten zu versehen, nach deren Regelung zu handeln ist. Folgende Prozesse sollten dabei aufgeführt werden:

- Substratannahme und –prüfung,
- Substrateintrag,
- Hauptgärung und Nachgärung,
- Gasaufbereitung und Gasverwertung,
- Gärrestentnahme,
- Wartung und Instandhaltung,
- Lieferantenbewertung,
- Ordnung, Sauberkeit, Hygiene sowie Umgang mit Abfällen,
- Schulung, Weiterbildung und Information der Mitarbeiter,
- Interne Qualitätsaudits,
- Störfallplan,
- Bewertung des Qualitätsmanagementsystems.

Alle Aufzeichnungen sind mindestens 3 Jahre aufzubewahren, sofern gesetzlich keine längeren Fristen vorgeschrieben sind. Weiterhin sind Abläufe und Zuständigkeiten der Mitarbeiter im QM-Handbuch zu beschreiben. Stellvertretungsregelungen und Notfallpläne müssen ersichtlich sein. Ein Qualitätsbeauftragter muss zur Umsetzung des Standards für NawaRo-Biogasanlagen benannt sein.

Tabelle 40: Checkliste - Qualitätsmanagement-Handbuch

2.	Qualitätsmanagementsystem	A	B	C	D	E
<b>2.2 Qualitäts- management- Handbuch</b>	Hat das Unternehmen ein Qualitätshandbuch eingeführt?	x				
	Liegen alle relevanten Genehmigungen vor?		x			
	Liegt eine Übersicht der Anlage vor? Landkarte der Prozesse.	x				
<b>2.2.1 Organisation</b>	Sind Zuständigkeiten ausreichend festgelegt (ggf. Organigramm)?	x				
	Existiert eine ausreichende schriftliche Stellvertreterregelung?		x			
	Ist ein QM-Beauftragter mit ausreichenden Befugnissen schriftlich benannt?	x				
<b>2.2.2 Verfahren</b>	Liegen die geforderten Verfahrensbeschreibungen vor und werden sie umgesetzt? <ul style="list-style-type: none"> <li>• Substratannahme und -prüfung</li> <li>• Substrateintrag</li> <li>• Hauptgärung und Nachgärung</li> <li>• Gasaufbereitung</li> <li>• Gasverwertung</li> <li>• Gärrestentnahme</li> <li>• Wartung BHKW</li> <li>• Wartung Technik Gasaufbereitung</li> <li>• Betriebscheck (täglicher Rundgang)</li> <li>• Lieferantenbewertung</li> <li>• Ordnung, Sauberkeit &amp; Hygiene</li> </ul>	x				
<b>2.2.3 Dokumentation</b>	Sind sämtliche geforderten Dokumente und Aufzeichnungen wirksam gelenkt und sind sie leicht auffindbar?			x		
	Sind die Anweisungen für die betroffenen Personen verfügbar und werden sie verstanden?	x				
<b>2.2.4 Aufbewahrungs- fristen</b>	Werden die Dokumente entsprechend den gesetzlichen Forderungen, aber mindestens 3 Jahre lang, aufbewahrt?	x				

Der technische Betrieb soll der guten fachlichen Praxis entsprechen. Durch eine ordnungsgemäße Dokumentation ist dies nachzuweisen, dazu dient die Führung eines Betriebstagebuches. Definierte Ziele für Produktion und Leistung sollen im technischen Betrieb nachweisbar umgesetzt werden. Ergebnis des Audits war, dass die Störfälle unübersichtlich hinterlegt sind, so dass eine schnelle Auswertung erschwert wird. Reinigungen werden durchgeführt, jedoch gibt es dafür keinen Beleg. Weiterhin ist festzuhalten, dass die Outputmengen in Form von Leistungszahlen kW nicht im Betriebstagebuch festgehalten werden.

Tabelle 41: Checkliste – Technischer Betrieb

3.	Anforderungen an den Betrieb	A	B	C	D	E
<b>3.1</b>	<b>Betriebliche Grundlagen</b>					
<b>3.1.1.</b>	<b>Technischer Betrieb</b>					
	Enthält das Betriebstagebuch Aufzeichnungen zu Störfällen?		x			
	Enthält das Betriebstagebuch Aufzeichnungen zu Wartungen?	x				
	Enthält das Betriebstagebuch Aufzeichnungen zu Reinigungen?		x			
	Enthält das Betriebstagebuch Aufzeichnungen zu personenbezogenen Tätigkeitsnachweisen?	x				
	Enthält das Betriebstagebuch Aufzeichnungen Input -Output Mengen und Qualitäten?		x			

Eine ökonomische Bewertung der Biogasanlage wird einmal jährlich empfohlen. Als Basis dafür eignet sich die DLG-Betriebszweigabrechnung für Biogas (JOCHIMSEN, 2006). Die Dokumentation sollte die Buchhaltung, eine Gewinn- und Verlustrechnung sowie eine Bilanz beinhalten. Lieferscheine und Abrechnungen mit Lieferanten und Abnehmern sowie die ökonomischen Daten müssen vollständig aufbewahrt werden. Diese Kriterien werden weitestgehend erfüllt. Ein Erfahrungsaustausch mit anderen Biogasbetreibern bezüglich eines überbetrieblichen Vergleichs wird derzeit nicht durchgeführt, ist jedoch in Planung.

Tabelle 42: Checkliste – Ökonomie des Betriebes

3.	Anforderungen an den Betrieb	A	B	C	D	E
<b>3.1.2. Ökonomischer Betrieb</b>	Gibt es eine ordnungsgemäße Buchhaltung?	X				
	Werden betriebswirtschaftliche Kennzahlen abgeleitet?	X				
	Werden die Rückstellungen für Kapitalersatzinvestitionen nachweisbar gebildet?					
	Lässt sich die Schadensquote aktuell ermitteln?	X				
	Nimmt die Anlage an überbetrieblichen Vergleichsauswertungen teil?		X			

Um einen störungsfreien Betrieb der Biogasanlage gewährleisten zu können, müssen entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Es ist ein Wartungsplan zu erstellen, der Anforderungen an Wartungsintervalle, gewartete Komponenten, benötigte Betriebsmittel und Ersatzteile sowie die dafür verantwortlichen Mitarbeiter stellt. Eine angemessene Sauberkeit sollte auf dem Betriebsgelände grundsätzlich eingehalten werden. Weiterhin ist ein Plan zur Schädlingsbekämpfung zu erstellen, der eingesetzte Schädlingsbekämpfungsmittel einschließlich der zugehörigen Sicherheitsdatenpläne enthält. Mitarbeiter müssen qualifiziert sein, die Schädlingsbekämpfung durchzuführen. Es sollten zu den Aufzeichnungen zu ausgelegten Ködern und gefundenen Schädlingen existieren.

Tabelle 43: Checkliste – Wartung, Reinigung und Schädlingsbekämpfung

3.	Anforderungen an den Betrieb	A	B	C	D	E
<b>3.1.3. Wartung und Reinigung</b>	Liegt ein zentraler Wartungs- und Reinigungsplan vor und werden die Tätigkeiten aufgezeichnet?			X		
<b>3.1.4. Schädlingsbekämpfung</b>	Sind Anweisungen und Aufzeichnungen für die Schädlingsbekämpfung vorhanden?	X				

Die Checkliste „Grundstück und Erschließung“ fordert, dass das Betriebsgelände und die zugehörigen Lagerflächen Unbefugten nicht zugänglich sein darf. Warnhinweise, die dieses kenntlich machen, sind an den Eingängen anzubringen.

Die Zufahrtswege für Fahrzeuge sollen angemessen befestigt und ausgebaut sein. Dieses Kriterium ist zu 100 % erfüllt und wurde daher mit A bewertet. Ein Zaun schließt das gesamte Betriebsgelände ein. Sozialräume mit Schlaf- und Waschgelegenheiten sowie einer Küche stehen den Mitarbeitern zur Verfügung.

**Tabelle 44: Checkliste – Grundstück und Erschließung**

3.	Anforderungen an den Betrieb	A	B	C	D	E
<b>3.2.1. Grundstück und Erschließung</b>	Genügt das Substratlager geltenden Umweltauflagen und gewährleistet es eine hohe Substratqualität?	x				
	Entspricht der Gesamtzustand der Anlage den Anforderungen an Sauberkeit?	x				
	Gibt es eine ausreichende Löschwasserversorgung?	x				
	Ist das Gelände eingefriedet?	x				
	Stehen wenn notwendig Sozialräume zur Verfügung?	x				

Ein störungsfreier Betrieb der Anlage soll gewährleistet werden, indem die technischen Komponenten zur Betriebsweise passen. Lieferanten und Monteure von Bauteilen müssen nachvollziehbar dokumentiert werden. Die Abnahme der untersuchten Anlage hat durch einen technischen Sachverständigen stattgefunden und hat das Kriterium zu 100 % erfüllt. Da erhebliche Änderungen nicht vorgenommen wurden, wurde der Kontrollpunkt mit E bewertet. Eine Auflistung der Bauteile mit zugehörigen Datenblättern liegt vor, somit wurde auch dieser Punkt zu 100 % erfüllt.

**Tabelle 45: Checkliste – Anlage und Ausrüstung**

3.	Anforderungen an den Betrieb	A	B	C	D	E
<b>3.2.2. Anlage und Ausrüstung</b>	Hat die Abnahme der Neuanlage durch einen technischen Sachverständigen stattgefunden?	x				
	Hat die Abnahme veränderter Bauteile durch einen technischen Sachverständigen stattgefunden (bezieht sich nur auf erhebliche Änderungen)?					x
	Liegt eine vollständige Bauteilliste vor (Datenblätter, Übersicht der Produktgarantien) zu Anlagenteilen und Baugeräte (Gewährleistung)?	x				

Der Substrateinsatz muss gemäß des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes auf nachwachsenden Rohstoffen basieren. Zum Nachweis ist der vollständige Prozess von der Substratbeschaffung bis zum Eintrag in den Fermenter zu dokumentieren. Die Rückverfolgbarkeit wird somit gewährleistet.

**Tabelle 46: Checkliste - Substratbeschaffung**

3.	Anforderungen an den Betrieb	A	B	C	D	E
<b>3.2.3. Substratbeschaffung</b>	Ist die Rückverfolgbarkeit der Ware bis zum Erzeuger/Lieferant gewährleistet?	x				
	Erfolgt regelmäßig ein Abgleich zwischen Bedarf und verfügbarer Menge?	x				
	Wird der Wareneingang quantitativ und qualitativ erfasst und dokumentiert?	x				
	Wird die Substratbeschaffung dokumentiert?	x				
	Handelt es sich bei den angelieferten Substraten um NawaRo?	x	K O	K O	K O	

Betriebsmittel spielen bei der Biogasproduktion eine bedeutende Rolle bezüglich der Zündung und Gefahrenstoffe, aber auch der dem Gärprozess zugeführten Zusatzstoffe. Daher muss der Einsatz Betriebsmittel jeglicher Art sorgfältig dokumentiert werden. Es dürfen nur zugelassene Betriebsmittel verwendet werden. Gefahrenstoffe sind ordnungsgemäß zu lagern, wobei alle Stoffe dieser Art einer Kennzeichnungspflicht unterliegen. Das Audit

ergab, dass nahezu alle Anforderungen eingehalten wurden. Lediglich bei der Frage der Dokumentation von Zusatzstoffen konnte der Betrieb nur in Kategorie C eingestuft werden.

**Tabelle 47: Checkliste - Betriebsmittel**

3.	Anforderungen an den Betrieb	A	B	C	D	E
<b>3.2.4. Betriebsmittel</b>	Wird nur eine zugelassene Zünd- und Stützfeuerung verwendet (wenn notwendig)?	x	K O	K O	K O	
	Sind Aufzeichnungen und Kennzeichnungen für Gefahrstoffe vorhanden (Gefahrstoffkataster)?	x				
	Sind die Lagerstätten für Gefahrstoffe geeignet und ggf. behördlich abgenommen?	x				
	Sind die Mitarbeiter für den Umgang mit Gefahrstoffen geschult?	x				
	Werden nur zugelassenen Stoffe dem Gärprozess zugeführt und ihr Einsatz dokumentiert?			x		

Da durch den Gärprozess große Menge an Gärrest anfallen, müssen die Art und der Umfang der Verwertung geplant sein. Die jährlichen Mengen sind zu ermitteln und die Verwendung ist zu dokumentieren. Analysen des Gärrests und Bestimmung des Nährstoffgehaltes sind inbegriffen. Die Düngemittelverordnung ist zu beachten. Die Ausbringung von Gärresten auf nicht eigenen Flächen sollte durch eine vertragliche Vereinbarung festgehalten werden. Der Betrieb konnte allen Anforderungen gerecht werden (Tab. 48).

**Tabelle 48: Checkliste – Verwertung von Gärresten**

3.	Anforderungen an den Betrieb	A	B	C	D	E
<b>3.2.5. Verwertung</b>	Wird die Gärrestverwertung dokumentiert?	x				
	Liegen Abnahmeverträge vor?	x				
	Werden Analysen vor der Ausbringung durchgeführt?	x				
	Werden, wenn anwendbar, die Kennzeichnungspflichten gemäß Düngemittelverkehrsgesetz eingehalten?	x				
	Liegt ein ordnungsgemäßes Gärrest-Verwertungskonzept vor?	x				

Die folgende Checkliste beinhaltet die Abnahme von Gas, Strom und Wärme sowie die Risikominderung durch Versicherungen. Abnahmeverträge müssen vorhanden sein, diese sollen Laufzeit, Preis je Einheit, Menge und Übergabezeitpunkt regeln. Die Abwärmenutzung trägt wesentlich zur Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage bei. Wird die anfallende Wärmemenge nicht verwertet, muss dies plausibel begründet werden.

Risiken während des Betriebs der Anlage sind festzulegen. Als Minimalabsicherung sind im Schadensfall folgende Versicherungen vorzuweisen:

- Sachversicherungen,
- Betriebshaftpflicht,
- Umwelthaftpflicht.

Darüber hinaus ist eine Maschinenbruch- und Betriebsunterbrechungsversicherung empfehlenswert. Die Einhaltung dieser Kriterien ist der Tabelle 50 zu entnehmen.

Tabelle 49: Checkliste – Abnahme von Gas, Strom und Wärme

3.	Anforderungen an den Betrieb	A	B	C	D	E
<b>3.2.6. Abnahme Gas/Strom/Wärme</b>	Berücksichtigen die Wärmeabnahmeverträge die geforderten Parameter?(Produktspezifikationen, Übergabepunkt, Messinstrument)	x				
	Berücksichtigen die Gasabnahmeverträge die geforderten Parameter?(Produktspezifikationen, Übergabepunkt, Messinstrument)					x
	Liegen Wärmeabnahmeverträge für mindestens 30% der erzeugten Wärme über 5 Jahre vor?	x				
	Sind Wärmekonzepte vorhanden (ausgenommen Prozesswärme)?	x				
	Ist das Wärmekonzept plausibel?	x				
<b>3.2.7. Versicherungen</b>	Liegen die vom Standard geforderten Policen vor (Sach-, Betriebshaftpflicht-, Umwelthaftpflichtversicherung)?	x				
	Liegen weitere Versicherungen vor? (Maschinenbruch-, Betriebsunterbrechungsversicherung)	x				

Um den Betriebszweig Biogas bewerten und lenken zu können, müssen Kenn- und Messgrößen vorhanden sein. Auf diese Weise kann die Wirksamkeit der Prozesse sichergestellt und verbessert werden. Es müssen geeignete Messmethoden gefunden und die Ergebnisse müssen dokumentiert und ausgewertet werden. Bezüglich des Substrates, mit dem die Anlage beschickt wird, sollten Menge, Trockensubstanz und organischer Trockensubstanzgehalt sowie die Substratqualität bekannt sein. Die Inputmengen werden mittels einer Waage erfasst, Beschickungsintervalle und –dauer werden dokumentiert. Das Gärsubstrat des Fermenters sollte auf TS-Gehalt, organische Säuren, FOS/TAC, pH-Wert und  $\text{NH}_4$  untersucht werden. Weiterhin ist die Kenntnis über die produzierte Gasmenge und Gaszusammensetzung sowie die Fermentertemperatur von besonderer Wichtigkeit. Hinsichtlich des Blockheizkraftwerkes sind die Parameter Laufzeit, elektrische und thermische Leistung sowie der Zündölverbrauch zu messen.

Die Anforderungen des Qualitätsstandards werden von BGA A erfüllt.

**Tabelle 50: Checkliste – Messung technischer und biologischer Parameter**

4.	Überwachung und Sicherheit	A	B	C	D	E
<b>4.1. Messung technischer und biologischer Parameter</b>	Sind die Mindestanforderungen der Überwachung erfüllt und werden die Ergebnisse dokumentiert?	x				
	Werden die Daten ausgewertet?	x				
	Werden weitere Kennzahlen erfasst? (A oder E möglich)					x
	Gibt es eine prozessbiologische Beratung und/oder Betreuung?	x				

Der Umgang mit Reklamationen und Beschwerden soll professionell behandelt werden. Beschwerdepunkte sind schriftlich festzuhalten, um Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Gegenstand der Beschwerde, Ursache, ergriffene Maßnahmen zur Abhilfe sowie entstandene Kosten des Verfahrens sind schriftlich niederzulegen. Die Erfüllung des Kriteriums wird in Kategorie A eingestuft.

**Tabelle 51: Checkliste – Reklamation und Beschwerde**

4.	Überwachung und Sicherheit	A	B	C	D	E
<b>4.2. Reklamations- und Beschwerdeverfahren</b>	Verfügt der Betreiber über ein Verfahren zur Behandlung von Reklamationen / Beschwerden?	x				
	Werden ausreichende Maßnahmen bei festgestellten Reklamationen ergriffen?	x				

Störfälle und Fehler können im täglichen Betrieb einer Biogasanlage auftreten und technische sowie gärbiologische Prozesse beeinflussen. Durch die regelmäßige Aufzeichnung von Messwerten und der Vergleich von Soll-Ist-Zuständen, können Fehler frühzeitig erkannt und behoben werden. Eine präventive Maßnahme zur Fehlervermeidung erfordert eine ordnungsgemäße Dokumentation und Auswertung aller Störfälle. Diese Auswertung ist Bestandteil der jährlichen Bewertung des Qualitätsmanagementsystems und ist Voraussetzung für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess. Bei dem untersuchten Betrieb

werden die Störungen zwar erfasst, aber nicht ausgewertet. Zu dem erweist sich die Art der Aufzeichnung als unübersichtlich. Eine zeitnahe Reaktion auf Störfallmeldungen wird gewährleistet.

**Tabelle 52: Checkliste – Störfallmanagement und Fehlerbehebung**

4.	Überwachung und Sicherheit	A	B	C	D	E
4.3. Störfall- management und Fehlerbe- hebung	Werden alle Fehler und Störungen er- fasst und dokumentiert?			X		
	Werden Fehler/Störungsmeldungen ausgewertet?			X		
	Wird sicher gestellt, dass auf Fehler/Störungen zeitnah reagiert wird?	X				

Das Kapitel „Sicherheit“ setzt eine sichere und umweltbewusste Biogasproduktion voraus. Die Vorgaben werden erfüllt, indem Rechtsvorschriften, Normen, technische Regelwerke und rechtskräftige Auflagen beachtet und eingehalten werden. Die Beurteilung der Sicherheit erfolgt durch einen Sachverständigen, welcher die funktionale und elektrische Sicherheit, Explosions- und Brandschutz, Gewässerschutz, Emissionsschutz sowie die bauliche Ausführung prüft. Unabhängig von einem Audit muss eine Abnahme der Berufsgenossenschaft erfolgen; dabei festgestellte Mängel müssen beseitigt werden. Vorkehrungen für den Personenschutz werden durch Feuerlöscher, Löschdecken und Erste-Hilfe-Kästen getroffen. Wie der Checkliste zu entnehmen ist, werden alle Anforderungen des Betriebs A eingehalten.

**Tabelle 53: Checkliste - Sicherheit**

4.	Überwachung und Sicherheit	A	B	C	D	E
4.4. Sicherheit	Sind die gesetzlichen Vorschriften bezüg- lich der Betriebssicherheit in einer Bege- hung der BGA bewertet?	x	K O	K O	K O	
	Ist die Anlage gegen Blitzeinschlag ge- schützt? (Notstrom, Blitzableiter, Über- spannungsschutz)	x				

Die Rückverfolgbarkeit der Stoffströme sollte möglich sein. Alle Input- und Outputmenüen müssen dokumentiert werden. Dazu zählen der Einsatz aller nachwachsenden Rohstoffe, Flüssig- und Festmist, Betriebshilfsstoffe und des ausgehenden Gärrestes. Kontrollpunkt 4.5 wird erfüllt.

**Tabelle 54: Checkliste -Rückverfolgbarkeit**

4.	Überwachung und Sicherheit	A	B	C	D	E
<b>4.5. Rückverfolgbarkeit</b>	Stellen die Aufzeichnungen eine Rückverfolgbarkeit der Stoffströme sicher (Datum, Name, Stoffbezeichnung)?	x				

Der Betreiber ist für den Einsatz ordnungsgemäßer Mess- und Prüfmittel verantwortlich. Das Labor, welches mit Analysen beauftragt wird, muss akkreditiert sein. Für interne Messungen muss die Messtechnik über eine gültige Kalibrierung verfügen. Alle geforderten Kriterien werden vom Anlagenbetreiber des Untersuchungsbetriebes A eingehalten und mit A bewertet.

**Tabelle 55: Checkliste – Mess- und Prüfmittel**

4.	Überwachung und Sicherheit	A	B	C	D	E
<b>4.6. Mess- und Prüfmittel</b>	Findet die Mengenbestimmung des eingehenden Substrates, der erzeugten Wärme, des Stroms und des Biomethans mittels geeichter/kalibrierter Technik statt?	x				
	Findet die qualitative Bestimmung des Gases und der Substrates mit geeichter/kalibrierter Technik statt?	x				
	Sind die eingesetzten Labore akkreditiert?	x				
	Werden die Mess- und Prüfmittel regelmäßig bzw. bei Bedarf kalibriert und wird dies dokumentiert?	x				

Der Betrieb sollte im eigenen Interesse interne Audits durchführen, um Abweichungen des Standards ausfindig zu machen und um den kontinuierlichen Verbesserungsprozess gewährleisten zu können. Korrekturmaßnahmen sind zu dokumentieren. Weiterhin werden die Inhalte des QM-Handbuches auf Aktualität, Verständnis und Umsetzbarkeit geprüft. In diesem Punkt konnte die volle Punktzahl nicht erreicht werden, da ein internes Audit noch nicht stattfinden konnte.

**Tabelle 56: Checkliste – Interne Audits**

4.	Überwachung und Sicherheit	A	B	C	D	E
4.7. Interne Audits	Wird das interne Audit mindestens einmal jährlich durchgeführt?			x		
	Sind Abweichungen ausreichend dokumentiert und Korrekturmaßnahmen eingeleitet?		x			
	Beinhaltet das Programm für interne Audits alle relevanten Aktivitäten?			x		

#### 4.9.1 Auswertung des Audits

Die Auswertung des Audits erfolgt durch die Ermittlung einer Gesamtpunktzahl, die sich aus den jeweils erreichten Punkten der Einzelchecklisten durch Addition ( $x = 1$  Punkt) ergibt. Die Bestimmung des Wiederholungsaudits ergibt sich aus der Gesamtpunktzahl und dem davon abhängigen Erfüllungsgrad, welcher die erfüllten Kriterien des Standards in Prozent ausdrückt. Bei einer erreichten Punktzahl von über 90 % der Gesamtpunktzahl wird der Betrieb in Stufe I eingeordnet, das Wiederholungsaudit muss dann erst nach 24 Monaten erfolgen. Ein Betrieb wird in Stufe II bei Erreichung des Erfüllungsgrades von 75 bis < 90 % eingestuft. Das Wiederholungsaudit findet dann nach 12 Monaten statt. Das Wiederholungsaudit kann auch schon nach 6 Monaten festgelegt werden, wenn der Betrieb der Kategorie III angehört und nur 50 bis < 75 % der Gesamtpunktzahl erzielen konnte. Bei weniger als 50 % erfolgt eine Neuzertifizierung nach 3 Monaten, da die Anforderungen des Qualitätsstandards nicht erfüllt wurden.

Der Untersuchungsbetrieb A hat das Audit erfolgreich bestanden und wurde in Kategorie I eingestuft. Es hat sich ein Gesamtergebnis von 90,06 % ergeben, das sich aus den Einzel-

bereichen „Qualitätsmanagement“, „Anforderungen an den Betrieb“ und „Überwachung und Sicherheit“ wie folgt zusammensetzt:

**Tabelle 57: Auswertung des QM-Systems auf Untersuchungsbetrieb A**

Auswertung Qualitätsmanagement			
Kategorie	Anzahl Bewertungen	Punkte	Gesamtpunktzahl
A =	13	100	1300
B =	4	75	300
C =	1	25	25
D =	0	0	0
E =	0	n.A.	0
Summe	18		1625
Prozent			<b>90,28%</b>
Auswertung Anforderungen an den Betrieb			
Kategorie	Anzahl Bewertungen	Punkte	Gesamtpunktzahl
A =	35	100	3500
B =	4	75	300
C =	2	25	50
D =	0	0	0
E =	0	n.A.	0
Summe	41		3850
Prozent			<b>93,90%</b>
Auswertung Überwachung und Sicherheit			
Kategorie	Anzahl Bewertungen	Punkte	Gesamtpunktzahl
A =	13	100	1300
B =	2	75	150
C =	4	25	100
D =	0	0	0
E =	0	n.A.	0
Summe	19		1550
Prozent			<b>81,58%</b>

Der Bewertungspunkt E steht für die nicht Anwendbarkeit (n.A.) eines Kontrollpunktes und ist der Vollständigkeit halber mit in der Auswertung aufgeführt, wobei es für dieses Kriterium keine Punkte geben kann.

Der Qualitätsstandard für Biogasanlagen beabsichtigt einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess im laufenden Betrieb zu erreichen. Das Erstaudit, wie es in diesem Fall auf Untersuchungsbetrieb A stattgefunden hat, soll einen gewissen Mindeststandard beschreiben und auf Basis eines Korrekturmaßnahmenplans, der qualitativen Verbesserung der

Prozessabläufe und des Managements dienen. Der Mindeststandard wird erreicht, wenn mindestens 50 % der Gesamtpunktzahl erzielt werden können. Die Verbesserungsmaßnahmen bauen darauf auf.

Untersuchungsbetrieb A hat mit 90 % das gewünschte Ergebnis erreicht, dennoch wurden durch den Auditor Verbesserungsvorschläge zur Betriebsoptimierung entwickelt. Diese beziehen sich weitestgehend auf Schwachstellen, die die Dokumentation betreffen. Außerdem wird dringend empfohlen die Auswertung des Störfallmanagements zu optimieren. Die aktuelle Erfassung der Störfälle ist unübersichtlich und nicht effektiv, um daraus Korrekturmaßnahmen ableiten zu können.

#### 4.9.2 Vergleich der Ergebnisse mit anderen NawaRo-Biogasanlagen

In diesem Kapitel werden Auswertungen von Vergleichsanlagen (BGA 1 – BGA 5) (MÖLLER, 2008) hinzugezogen, um eine bessere Einschätzung der Ergebnisse des Untersuchungsbetriebes A vornehmen zu können. Da das Audit bei allen Biogasanlagen von dem gleichen Unternehmen durchgeführt wurde, ist eine hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben, da Abweichungen durch menschliche Kompetenz weitestgehend ausgeschlossen werden können.

Der Vergleich der Ergebnisse des Qualitätsstandards für NawaRo-Anlagen mit Literaturwerten zeigt, dass sich Biogasanlage A deutlich von den Biogasanlagen 1- 5 unterscheidet. Im Gegensatz zu BGA A zeigen die Anlagen 1 – 4 deutliche Schwächen im Bereich Qualitätsmanagement und erfüllen die Anforderungen dieses Bereichs insgesamt nicht. BGA 5 erreicht knapp die 50 % Grenze und erlangt somit die Bewertungsstufe III. Der Aspekt „Anforderungen an den Betrieb“ wird von allen Vergleichsanlagen erfüllt, wobei das beste Ergebnis bei 81,1 % (BGA 5) vorliegt und somit immer noch ein Unterschied von 12,8 % zu BGA A zu verzeichnen ist. Der Erfüllungsgrad im Bereich „Überwachung und Sicherheit“ befindet sich bei den Vergleichsanlagen zwischen 55,6 und 67,5 %, während BGA A 81,58 % erzielen konnte.

**Tabelle 58: Vergleich der Ergebnisse des Qualitätsstandards**

Bereich des Qualitätsstandards	Erfüllungsgrad [%]					
	BGA A	BGA 1	BGA 2	BGA 3	BGA 4	BGA 5
Qualitätsmanagement	90,28	32,9	31,6	25	42,1	51,4
Anforderungen an den Betrieb	93,9	61,5	73,7	76,8	63,8	81,1
Überwachung und Sicherheit	81,58	58,8	67,5	65,3	55,6	57,5

Abschließend kann festgehalten werden, dass Untersuchungsbetrieb A im Vergleich mit den NawaRo-Anlagen der Literatur sehr gut abgeschnitten hat. In den Bereichen „Qualitätsmanagement“ und „Anforderungen an den Betrieb“ wurden über 90 % der Punkte erreicht, wodurch eine Einstufung in Kategorie I, im Bereich „Überwachung und Sicherheit“ mit 81,58 % in Kategorie II erfolgt. Insgesamt ergibt sich für BGA A mit einem Erfüllungsgrad von 90,06 % die Einstufung in Kategorie I, wodurch ein externes Wiederholungsaudit erst nach 24 Monaten zur Erhaltung des Zertifikates notwendig ist. Keine der fünf Vergleichsanlagen konnte die Einstufung in Kategorie I erreichen. Von den fünf Anlagen erhielt nur eine Anlage (BGA 5) eine ausreichende Mindestpunktzahl, um mit der Stufe III die Mindestanerkennung für 6 Monate zu erhalten.

#### **4.9.3 Bewertung der Methode des Qualitätsmanagements**

Im Folgenden soll die Methode des Qualitätsmanagements zur Betriebsoptimierung bewertet werden. Ziel dieser Arbeit war, neben einer Anlagen-Charakterisierung auch eine Optimierung durchzuführen und Schwachstellen heraus zu arbeiten. Neben den eigens gewählten Methoden (Langzeitbetrachtung der Prozessparameter) wurde der QS-Standard als eine zweite Methode verwendet, um Optimierungspotenziale aufzudecken. Dabei werden Kenntnisse über Qualitätsmanagement und Auditierung mit denen aus biochemischen, technischen und wirtschaftlichen Prozessen verbunden. Der Betrieb einer Biogasanlage erfordert vom Betriebsleiter bzw. Anlagenbetreiber ein gutes Management mit fundierten Kenntnissen im Bereich Fermenterbiologie, Funktionsweise und Ökonomie. Zur Einschätzung der Anlage müssen wichtige Führungsgrößen sowie optimale Regelungs- und Steuerungsgrößen festgesetzt werden. Der Standard stellt dafür einen Leitfaden dar, auf dem der Anlagenbetreiber sein eigenes Managementsystem aufbauen kann. Vorteilhaft ist, dass der Betrieb der Anlage von einem externen Gutachter bewertet wird, so dass die eigene „Betriebsblindheit“ den Prozessablauf nicht negativ beeinflussen kann. Erhebliche Defizite im Management der Anlage können so gefunden und beseitigt werden. Da sich im Biogasbereich ständig neue wissenschaftliche Erkenntnisse ergeben, ist es weiterhin von Vorteil, dass durch ein regelmäßiges Audit ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess gewährleistet wird. Der Verbesserungsprozess sollte den Fermenter- und BHKW-Betrieb, das gesamte Betriebsmanagement und die Mitarbeiterqualifikation einbeziehen.

Der Unterschied zwischen der Methode des QM-Systems und der eigenen Methodik ist, dass der Standard eher ein Instrument zur Unterstützung der guten Betriebspraxis ist, während sich die eigene Methodik detaillierter mit der Auswertung von Daten beschäftigt. Ein weiterer Unterschied der beiden Methoden ist, dass die eigene nur die betriebliche Prozesskette vom Inputmaterial bis zum Output in Form von Strom und Wärme berücksichtigt, während der Qualitätsstandard Anforderungen zu Bereichen weit darüber hinaus stellt, wie z.B. Planung, Bau, Mitarbeiterqualifikation, Umweltaspekte, Rechtsgrundlagen, Finanzierung und Versicherung.

Um einer Schwachstellenanalyse gerecht zu werden, reicht der Qualitätsstandard als alleiniges Werkzeug nicht aus, da viele Aspekte nicht mit der notwendigen Ausführlichkeit angesprochen werden. Trotzdem ist es eine gelungene Methode, um den Betrieb einer Anlage in den vielfältigen Bereichen zu überprüfen und dem Betriebsleiter eine unterstützende Funktion und Beratung zu bieten.

Durch Kombination beider Methoden erlangt man eine ganzheitliche und abgerundete Systembewertung für nahezu alle Bereiche, die im Betriebszweig Biogasproduktion eine Rolle spielen.

## 5 Fazit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war eine Zustandsbeschreibung von zwei typischen NawaRo-Biogasanlagen ohne Flüssigmistbeschickung. Es wurde eine Langzeituntersuchung durchgeführt, um Anlagenzustände, Massenströme, Wirtschaftlichkeit sowie spezielle Handhabungsprobleme dieses Anlagentyps aufzudecken. Daraus sollten Optimierungspotenziale abgeleitet werden. Auf der Basis einer „Schwachstellenanalyse“ sollen die ungenutzten Potenziale der Anlagen beschrieben werden.

Während der Langzeituntersuchung von 12 Monaten wurden folgende Teilziele bearbeitet, um die Zielsetzung zu erfüllen:

Nach einer intensiven Literaturrecherche und Gesprächen mit Anlagenherstellern wurden zwei NawaRo-Biogasanlagen, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, ausgewählt. Deutschlandweit existieren überwiegend Biogasanlagen, die aus stehenden Fermentern bestehen und im mesophilen Temperaturbereich arbeiten. Die Untersuchungsbetriebe sollten diesem Typ entsprechen. Bei der Suche nach geeigneten Anlagen wurde deutlich, dass die Betriebsweise „Monovergärung“ kaum Anwendung findet. Selbst in reinen Ackerbauregionen ohne Anbindung an tierhaltende Betriebe, wählen die Anlagenbetreiber Festmist als kostengünstige Substratkomponente. Aus diesem Grund wurden Anlagen ausgewählt, die auf Maisbasis arbeiten und nur geringe Anteile an Festmist verwerten. Auf den kontinuierlichen Einsatz von Flüssigmist soll verzichtet werden. Vorausgesetzt wurden eine bereits installierte und funktionierende Messtechnik zur Erfassung aller Daten, ein ausführlich geführtes Betriebstagebuch sowie die Bereitschaft des Anlagenbetreibers/Betriebsleiters an dem Projekt für ein Jahr teilzunehmen.

Zur Beurteilung der Massenströme wurden die täglichen Inputmengen und die Massenanteile der Einzelkomponenten erfasst. Darüber hinaus wurde auch die Qualität der Substrate ermittelt. Laborversuche und Analysen des Inputmaterials und des Gärsubstrates wurden zur Bestimmung des Biogaspotenzials sowie des Restgaspotenzials durchgeführt. Das Gärsubstrat wurde zusätzlich auf einen Spurenelementmangel untersucht, der zumindest bei einer Biogasanlagen nachzuweisen war.

Zu den kontinuierlichen Parametern der erfassten Daten zählten die Gasmenge, Gaszusammensetzung (Methan, Sauerstoff, Schwefelwasserstoff), Fermentertemperaturen, Leistung des Blockheizkraftwerkes und daraus resultierende Strom- und Wärmemengen, welche die Wirtschaftlichkeit einer Anlage maßgebend bestimmen. Eine Aufzeichnung und

Auswertung der betrieblichen Störmeldungen hat außerdem stattgefunden, um auf diesem Weg spezielle Handhabungsprobleme zu entdecken. Ein Ausfall der Anlagen ist jeweils mit großen finanziellen Einbußen verbunden, da ein längerer Zeitraum erforderlich ist, bis die Anlagen wieder konstant den angestrebten Gasertrag liefern. Ein Ausfall der Anlagen ist im Untersuchungszeitraum nicht eingetreten.

Zur Einschätzung der Prozessstabilität wurden im 14-tägigen Rhythmus mittels Laboranalysen organische Säuren, pH-Wert, Leitfähigkeit, Ammoniumstickstoff, Trockensubstanzgehalt, Essigsäureäquivalent und FOS/TAC bestimmt. Um die Prozessstabilität der Untersuchungsbetriebe mit Flüssigmist beschickten Anlagen vergleichen zu können, wurden Laborergebnisse von drei entsprechenden Anlagentypen hinzugezogen.

Als eine zusätzliche Optimierungs-Methode wurde der von der DLG entwickelte Qualitätsstandard für NawaRo-Biogasanlagen hinzugezogen, um über die eigens gemessenen Daten hinaus Optimierungsmöglichkeiten festzustellen. Dabei wurde die Methode des Qualitätsstandards auf ihre Eignung zur Schwachstellenanalyse geprüft.

Abschließend kann gesagt werden, dass nach Auswertung der umfangreichen Datenbasis keine besonderen Handhabungsprobleme bei dem speziellen Anlagentyp aufgetreten sind. Eine größere Instabilität der Prozesse im Vergleich zu konventionellen Biogasanlagen mit Flüssigmisteinsatz konnte entgegen der Erwartung nicht festgestellt werden und die Arbeitshypothese somit nicht bestätigt werden. Die Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen ohne Gülle stellt ähnlich hohe Anforderungen an die Prozesssteuerung wie bei Biogasanlagen, die Gülle einsetzen. Als erwartetes Problem ist eine Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes bei beiden Praxisanlagen eingetreten. Durch geeignete Gegenmaßnahmen konnte dem entgegengewirkt werden. Ein weiteres Problem stellte sich bei Untersuchungsbetrieb A nach Zugabe des Sickersaftes (pH 3,6) heraus. Der pH-Wert im Fermenter ist dadurch stark abgefallen und konnte nur durch die Zugabe von Kalk angehoben werden.

Optimierungen konnten zum einen durch die Zugabe von Spurenelementen zur Verbesserung der Abbaubarkeit und zum anderen durch die Anwendung des Qualitäts-Standards erzielt werden. Festzustellen war auch, dass der Eigenstromverbrauch zum Beispiel durch Reduzierung der Rührintensität gesenkt werden kann, indem laut Praxiserfahrung der Betriebsleiter der BGA A, nur zu Beginn der Substratbeschickung gerührt und die anschließende Eigenbewegung des Fermenterinhalt für eine weiterführende Durchmischung

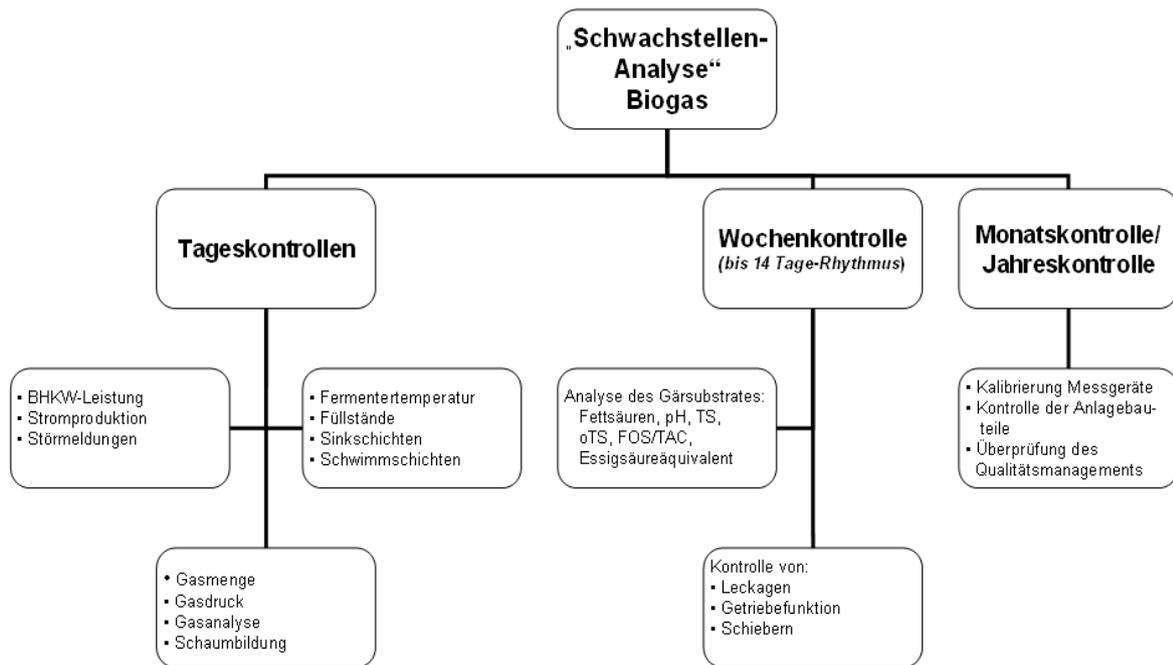
genutzt wird. Weiteres Optimierungspotenzial besteht bei der Lagerung der Maissilage als Energielieferant für die Mikroorganismen. Beide Betriebe verzichteten auf eine Folienabdeckung des Silos, wodurch eindeutig Qualitätsverluste zu verzeichnen waren. Durch Abdeckung der Silage könnten Energieverluste vermindert werden und für die Anlage genutzt werden. Untersuchungsbetrieb B optimierte den wirtschaftlichen Aspekt, in dem eine Anpassung an das neue EEG 2009 erfolgte und der „Güllebonus“ durch einen Massenanteil an Festmist von 30 % geltend gemacht werden konnte. Mit der Novellierung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes und der Einführung des Güllebonus wird deutlich, dass es aus finanzieller Sicht für viele Anlagenbetreiber attraktiver ist, Wirtschaftsdünger in der Anlage zu verwerten. Reine Monovergärungsanlagen auf pflanzlicher Basis sind aufgrund der Rechtslage nicht das politische Ziel der Zukunft.

Das Gesamtziel des Projekts, die Charakterisierung und Optimierung von Biogasanlagen zur Nassvergärung ausgewählter nachwachsender Rohstoffe ohne Flüssigmisteinsatz, konnte im Projektzeitraum vereinbarungsgemäß bearbeitet werden. Die Ergebnisse können als Grundlage für Beratungsempfehlungen in der Praxis eingesetzt werden.

Um Schwachstellen beim Betrieb einer NawaRo-Biogasanlage zu vermeiden bzw. frühzeitig zu erkennen und gegen zu steuern, lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Die konventionellen Methoden der Futterkonservierung sollten beachtet werden. Eine Lagerung der Silage mit Folienabdeckung zur Reduzierung der Energieverluste ist zu empfehlen.
- Die Potenziale der Gasausbeuten der Ausgangssubstrate sind abzuschätzen.
- Durch Nährstoffanalysen der Ausgangssubstrate kann einer Mangelsituation im Fermenter vorgebeugt werden. Durch Zugabe von Prozesshilfsstoffen wie z.B. Spurenelementen kann in vielen Fällen eine Prozessoptimierung erreicht werden.
- Substratwechsel sind durch eine langsame Steigerung durchzuführen, um die Mikroorganismen an das neue Substrat anzupassen und Einbrüche in der Prozessstabilität zu vermeiden.
- Die sorgfältige Planung und Ausführung der Eintragstechnik ist von großer Bedeutung, um Störungen vorzubeugen.
- Kurze Beschickungsintervalle unterstützen stabile Prozessbedingungen.

- 
- Die Auswahl und der Einsatz der Rührwerke sollten an die Bedingungen im Fermenter angepasst werden. Im Vordergrund steht, die Lebensbedingungen der Mikroorganismen zu optimieren anstatt den Eigenstromverbrauch zu minimieren.
  - Durch eine solide Wärmedämmung der Fermenter und angepasste Heizsysteme sind große Temperaturschwankungen zu vermeiden.
  - Biologische und technische Indikatoren, die Informationen über die Prozessstabilität liefern, sind zu beachten. Dazu zählen die täglichen Eintragsmengen, Fermentertemperaturen und Gasanalysen. Wichtige Steuerungsgrößen sind aber auch die Erfassung der Betriebsstunden des BHKW, Strom- sowie Wärmeerzeugung.
  - Bestimmte Parameter sind in festgesetzten Intervallen gemäß Abbildung 53 zu kontrollieren
  - Störfälle sollte erfasst und ausgewertet werden, um deren Häufigkeit im Sinne einer Erfolgskontrolle systematisch zu vermeiden.
  - Die Qualifikation der Anlagenbetreiber sowie deren Mitarbeiter erweist sich als ein wichtiger Einflussfaktor bei professionell geführten Biogasanlagen.
  - Eine Zertifizierung nach dem DLG-Standard kann auch bei gut geführten Anlagen helfen, „Betriebsblindheiten“ zu überwinden. Neben der Prozessoptimierung umfasst die Zertifizierung auch den Bereich der Dokumentation und Fragen der Unternehmensführung.



**Abbildung 53: Kontrollempfehlung**

## 6 Zusammenfassung

Mit der Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im Jahr 2004 wird der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in Biogasanlagen gefördert. Es ist davon auszugehen, dass die Anlagenbetreiber in viehlosen Ackerbauregionen auch weiterhin auf den Erwerbszweig „Energiewirtschaft“ umstellen und ihre Biogasanlage überwiegend mit pflanzlichen Materialien beschicken. Die Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen ohne Zugabe der prozessstabilisierend wirkenden Gülle stellt besonders hohe Anforderungen an die Verfahrenstechnik und die biologische Stabilität der Biogasanlage. Ein Ausfall der Anlagen ist jeweils mit großen finanziellen Einbußen verbunden, da ein längerer Zeitraum erforderlich ist, bis die Anlagen wieder konstant den angestrebten Gasertrag liefern.

Das Gesamtziel des Projekts ist die Charakterisierung und Optimierung von Biogasanlagen zur Nassvergärung ausgewählter nachwachsender Rohstoffe ohne Flüssigmisteinsatz in typischen Ackerbauregionen. Untersuchungen zur Bilanzierung der Stoffströme und Gaserträge sollen der Prozessoptimierung dienen. Die Ergebnisse sollen als Grundlage für Beratungsempfehlungen in der Praxis verwendbar sein.

Folgende Teilziele lassen sich hieraus ableiten:

- Nachweis der Wirtschaftlichkeit dieses Anlagentyps mit Hilfe von Langzeit-Begleituntersuchungen zur Erfassung aller relevanten Kenndaten;
- Einschätzung der Prozessstabilität im Vergleich zu konventionellen Biogasanlagen;
- Laborversuche und Analyse der Substrate zur Abschätzung der Potenzialreserven;
- Erarbeitung einer Schwachstellenanalyse in der gesamten Prozesskette.

Für die wissenschaftlichen Untersuchungen wurden nach einer ausführlichen Literaturrecherche und Methodenerarbeitung zwei Praxisanlagen ausgewählt.

Anlage A wurde im Mai 2006 in Betrieb genommen, verfügt über eine installierte Leistung von 835 kW<sub>el</sub> und wird mit Silomais [40 t/d], CCM [1,4 t/d] und Hähnchenmist [1 t/d] beschickt. Anlage B ging im Dezember 2006 ans Netz und weist eine Leistung von 625 kW<sub>el</sub> auf. Die Substratgrundlage bilden Silomais [12 t/d], CCM [2 t/d], Grassilage [3 t/d] und Putenmist [2 t/d] bzw. ab dem Jahr 2009 Fetsmist aus der Rinderhaltung.

Um eine Einschätzung für den gesamten Prozess geben zu können, wurden folgende Messparameter für jeden Fermenter der beiden Biogasanlagen festgelegt: Temperatur, pH, Gehalte an Trockensubstanz, organische Trockensubstanz, Fettsäuren sowie FOS/TAC,

NH<sub>4</sub> und Leitfähigkeit. Zusätzlich werden die Werte der Gasanalyse und der Gasdurchfluss am BHKW erfasst. Auch die Inputmaterialien (Weender-Analyse) und die Qualität der Silage (Gärtest) wurden untersucht. Die täglichen Fütterungsmengen der einzelnen Komponenten wurden detailliert festgehalten, um Aussagen über die Stoffströme treffen zu können. Eine Bestimmung des Gärrestpotenzials wurde regelmäßig aus dem Endlager durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die biologischen Prozesse nach einer Anlagenlaufzeit von ca. zwei Jahren als stabil einzuschätzen sind. Problematisch dagegen ist der erhöhte Trockensubstanzgehalt einer güllfreien Anlage. Um die Pumpfähigkeit des Gärsubstrates zu erhalten, müssen gezielte Gegenmaßnahmen getroffen werden, wie z.B. durch den Einsatz eines Separators zur Feststoffabtrennung. Optimierungspotenziale bestehen außerdem bei der Lagerung der Substrate. Hier sollten die konventionellen Methoden der Futterkonservierung beachtet werden. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass bei der Eintragstechnik häufig Probleme zu verzeichnen sind. Diese Problematik soll künftig näher untersucht werden. Bei Untersuchungsbetrieb A konnte eine Optimierung durch Spurenelementzugabe erzielt werden, indem die Maiszugabe bei gleich bleibender BHKW-Leistung reduziert werden konnte. Die Anwendung des DLG-Standards diente der Schwachstellenidentifizierung und Optimierung in den Bereichen Dokumentation und Unternehmensführung.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass jede Biogasanlage individuell zu betrachten ist, was entscheidend für die Auswertung der Messparameter ist. Die menschliche Kompetenz sowie die Qualifikation der Mitarbeiter erweist sich als der wichtigste Einflussfaktor bei der Anlagenführung.

## 7 Literaturverzeichnis

- BARNEMANN, D.; NELLES, M. (2009):** Anforderungen an Silage zur Biogasproduktion – Anpassung des Gär säuremusters an die speziellen Anforderungen der Biogasproduktion, International Energy Farming Congress, Papenburg, 10.-12.03.2009
- BAUMANN, Toni (2007):** Hemmstoffe und Hilfsstoffe für Biogasanlagen, 6.Rottaler Biomasse Fachgespräch: Biomasse – Kostenfaktor Nr.1 in der Biogasanlage
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2007):** „Sicherung der Prozess-Stabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen“, Freising-Weißenstephan ISBN 978-3-946609-45-9
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT (LfU) (2006):** „Biogashandbuch Bayern“, Augsburg 2006, S.6-13, ISBN 1611-3278
- BISCHOFBERGER, W., DICHTL, N., ROSENWINKEL, KH., SEYFRIED, CF. (2004):** Anaerobtechnik. Springer Verlag, 2. Auflage
- BRAUN, R. (1982):** Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe; Springer Verlag Wien, New York, 1982
- BROCKHAUS ENZYKLOPÄDIE (1991):** „Optimierung“; Band 16, 18. Auflage; Mannheim, ISBN 3-7653-116-2
- BRUNERT, U. (2007):** Untersuchungsverfahren zur Überwachung und Optimierung von Biogasanlagen, VDM Verlag Dr. Müller, S. 10
- BUNDESGESETZBLATT JAHRGANG (2008) Teil 1 Nr. 49:** „Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften“ ausgegeben zu Bonn am 31.Oktober 2008, Bundesanzeiger Verlag
- BURTON, C.H.; TURNER, C., (2003):** Manure Management Treatment Strategies for Sustainable Agriculture, second edition, Silsoe Research Institute
- CAMPBELL, N.A. (1997):** Biologie. Heidelberg
- DIN EN ISO 9000:** Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe 2005, Berlin
- DIN EN ISO 9001:** Qualitätsmanagementsysteme – Forderungen. Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe 2000, Berlin
- DISSEMOND, H., EILMSTEINER, H., NOWAK, H., SEDLAR, C., RAUCHENBERGER, M. (1993):** Biogasnutzung aus der Landwirtschaft, Wien
- EDER, B.; SCHULZ, H. (2006):** Biogas Praxis, 3. Auflage, Ökobuch Verlag, Staufen
- EHRMANN, T. (2004):** Einflüsse von NawaRos auf die Gärbiologie von Biogasanlagen, 13. Jahrestagung „Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft“, 02.-04.12.2004, Kirchberg / Jagst

- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR) (2005b):** Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, Gülzow
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR) (2006):** Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung, Gülzow
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR) (2008):** Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen, Gülzow
- FUCHS, G. (2006):** Zentrale Stoffwechselwege. In: Allgemeine Mikrobiologie, Hrsg. G. Fuchs, 8. Auflage, Stuttgart
- GAUDCHAU, M.; LUTHARDT-BEHLE, TH.; HONERMEIER; B. (2004):** Feldversuche zur Kennzeichnung der Biogaserträge verschiedener Maissorten. Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 16; 129-130.
- GEMBRY, S.; HERMANN, J. (2007):** Qualitätsmanagement. Taschenguide, Haufe, Planegg
- GERADI, M.H. (2003):** The microbiology of anaerobic digesters, John Wiley Sons Inc., Hoboken, New Jersey
- GIETL, G.; LOBINGER, W. (2004):** Leitfaden für Qualitätsauditoren – Planung und Durchführung von Audits nach ISO 9001:2000. 2. Aufl., München
- GÖRISCH, U. (2006):** „Biogasanlagen“, Planung, Errichtung und Betrieb von landwirtschaftlichen und industriellen Biogasanlagen, S.27ff., Ulmer-Verlag
- GOSCH, A. (1984):** Anaerober Abbau von flüssigen Abfällen aus Tierhaltungen. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen
- GREPMEIER, M. (2002):** Experimentelle Untersuchungen an einer zweistufigen fuzzy-geregelten anaeroben Abwasserreinigungsanlage mit neuartigem Festbettmaterial, Dissertation, München
- GRUBER, W. (2007):** Biogasanlagen in der Landwirtschaft. 4. Auflage. AID Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V., Bonn
- GUJER, W.; ZEHNDER, A.J.B (1983):** Conversion processes in anaerobic digestion. Water Science and Technology, 15, S. 127-167
- HAUER, I. (1993):** Biogas-, Klärgas-, und Deponiegasanlagen im Praxisbetrieb. Landtechnische Schriftenreihe (192). Österreichisches Kuratorium für Landtechnik, Wien
- HECHT, M.; CLEMENS, J.; WULFF, S. (2007):** Entwicklung eines einfachen und für den Landwirt durchführbaren Verfahrens zur Überwachung der Prozessstabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen; Forschungsbericht 151; ISSN 1610-2460
- HECHT, M. (2008):** Die Bedeutung des Carbonatpuffersystems für die Stabilität des Gärprozesses landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- HENNING, T.; GRÄN-HEEDFELD, J.; DEERBERG, G. (2006):** Simulation der Strömung in Fermentern von Biogasanlagen, Chemie Ingenieur Technik, 78, No.12

- HILL, D.T (1982):** A comprehensive dynamic model for animal waste methanogenesis. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 25, 1374-1380
- ISHIKAWA, K. (1987):** The Quality Control Audit. In: Quality Progress, Vol.1, S. 39-41
- JÄKEL, K.; MAU, S. (2003):** Biogaserzeugung und –verwertung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Dresden
- JEROCH, H; DROCHNER, W., SIMON, O. (1999):** Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere, Ulmer Verlag, Stuttgart
- JOCHIMSEN, H. (2006):** Betriebszweigabrechnung für Biogasanlagen. DLG-Fachzentrum Land- und ernährungswirtschaft – Arbeitsgruppe Biogas, Arbeiten der DLG, Bd. 200, Frankfurt/M.
- JUNGBLUTH, T., BÜSCHER, W., KRAUSE, M. (2005):** Technik Tierhaltung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- KALTSCHMITT, M., KUHN, F., DÖHLER, H. (1993):** Biogas – Potentiale und Kosten. Möglichkeiten und Grenzen einer Biogaserzeugung aus Reststoffen der landwirtschaftlichen Tierhaltung in der Bundesrepublik Deutschland. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Arbeitspapier 178, Darmstadt
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (2001):** Energie aus Biomasse; Springer Verlag, Berlin
- KAMISKE, G.F.; BRAUER, J.-P. (2008):** Qualitätsmanagement von A-Z – Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements. 6. Aufl., München
- KARIM, K; HOFFMANN, R.; KLASSON, K.T; AL-DAHMAN, M.H. (2005):** Anaerobic digestion of animal waste: effect of mode of mixing. Water research 39, S
- KARPENSTEIN-MACHAN, M. (2005):** Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber, DLG Verlag, Frankfurt; ISBN 3-7690-0651-8
- KASPAR, H.F.; WUHRMANN, K. (1978):** Product Inhibition in Sludge Digestion. Microbial Ecology, 4, S. 241-248
- KERSTEN, J.;ROHDE, H.-R.; NEF, E. (2003):** Mischfutterherstellung – Rohware, Prozesse, Technologie. Agrimedia GmbH, Gerben/Dumme
- KIRCHMEYR, F.; Anzengruber, G. (2008):** Leitfaden zur Wärmenutzung bei Biogasanlagen (in: ARGE Biogas und Kompost), Linz
- KLEEMANN, M.; MELIß, M. (1993):** Regenerative Energiequellen. 2. überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag New York
- KOSTER, I. (1989):** Toxicity in anaerobic digestion. With emphasis on the effect of ammonia, sulfide and long-chain fatty acids on methanogenesis, Wageningen
- KÜHL, R.W (1998):** Private und öffentliche Qualitätsstandards und die Bedeutung von Informationen. Bonn
- KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL) (2007):** Faustzahlen Biogas, Darmstadt

- KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL) (2009):** Schwachstellen an Biogasanlagen verstehen und vermeiden, KTBL-Heft 84, Darmstadt, ISBN 978-3-939371-81-6
- KUTSCHERA, A.P. (2003):** Qualitätssicherung durch Qualitätsmanagement, Deutsches Steuerberaterinstitut, Wirtschaftsuniversität Wien, Dissertation
- LANDBECK, M.; SCHMIDT, W. (2005):** Energiemais – Ziele, Strategien und erste Züchtungserfolge. International Energy Farming Congress, Papenburg, 3. März 2005.
- LINKE, B; HEIERMANN, M.; GRUNDMANN, P.; HERTWIG, F. (2003):** Grundlagen, Verfahren und Potenzial der Biogasgewinnung im Land Brandenburg. In: Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, Potsdam (Hrsg.): Biogas in der Landwirtschaft – Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg. 2. Auflage
- LINKE, B; MÄHNERT, P. (2005):** Einfluss der Raumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und Nachwachsenden Rohstoffen. In: Tagungsband 2005, Fachverband Biogas
- MADIGAN, M.T., MARTINKO, J.M., PARKER, J. (2001):** Brock Mikrobiologie. Hersg. W. BOEBEL, Heidelberg
- MCCARTY, P.L. (1964):** Anaerobic waste treatment fundamentals. Public works, 95, 91-126.
- MÖLLER, A. (2008):** Entwicklung eines Qualitätsstandards für Planung und Betrieb von Biomethananlagen zur Verbesserung der Prozessabläufe, Funktionssicherheit, Effektivität und Wirtschaftlichkeit. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen
- MÜLLER, I. (1998):** Gülle – lukrativer Mist. Umwelt Magazin (8), S. 54-55
- MUNDRACK, K; KUNST, S. (2003):** Biologie der Abwasserreinigung, Spektrum Verlag
- NUSSBAUM, H. (2009):** Ensiling energy crops without plastic film cover: Part 1. Effects on silage quality. XV<sup>th</sup> International Silage Conference Proceeding, 27.-29.07.2009, Madison.
- OECHSNER, H.; GOSCH, A. (1998):** Vergärbare Stoffe. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Kofermentation. Arbeitspapier 249, Darmstadt.
- OSTEROTH, D. (1992):** Biomasse: Rückkehr zum ökologischen Gleichgewicht. Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg
- PAHLOW, G. (2006):** Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In: Praxishandbuch Futterkonservierung. DLG-Verlag, 7. Auflage, 11-30
- PESTA, G.; RUß, W. (2004):** Die zuverlässige Reinigung von Biogas – Verfahren und Lösungsansätze. Fachtagung: Innovationen in der Biogastechnologie. Deggendorf 2. Dezember 2004, Tagungsband, S. 99-123
- REHM, H.; HAMMAR, F. (2005):** Biochemie light. 3. Auflage, Verlag Harri Deutsch
- SAHM, H. (1981):** Biologie der Methanbildung. Chemie-Ingenieur-Technik 53, Nr. 11
- SEGEHZZI, H.; FAHRNI, F.; HERRMANN, F. (2007):** Integriertes Qualitätsmanagement. 3. Aufl., München

- SEUFERT, H.; HESSE, J. (2008):** Landwirtschaft = QM – Qualitätsmanagement im Lebensmittel- und Futtermittelsektor. Frankfurt/M.
- SUTTOR, W. (2006):** Blockheizkraftwerke – Ein Leitfaden für den Anwender. 6. Auflage. Bine Informationsdienst. Verlag Solarpraxis AG, Berlin
- THAYSEN, J. (2007):** Qualitätsanforderungen an Silage für Biogasanlagen. Fortbildungsseminar LK SH Nr. 786, 28.06.2007
- TRAUNER, B.; LUCKO, S. (2004):** ABC der Managementtechniken. München
- TRÖSCH, W.; WEILAND, P. (1998):** Verfahrenstechnik der Kofermentation. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Kofermentation. Arbeitspapier 249, Darmstadt
- WEILAND, P. (1998):** Technik anaerober Prozesse. Abfallverwertung durch Kofermentation – Anforderungen, Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen, Tagungsschrift, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (Hrsg.), Hamburg, ISBN3-926959-95-9
- WEILAND, P. (2001):** Grundlagen der Methangärung – Biologie der Substrate. In: Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven. Hrsg. VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Berichte Nr. 1620, Düsseldorf
- WELLINGER, R.; BASERGA, U.; EDELMANN, W.; EGGER, K.; SEILER, B. (1991):** Biogas-Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen; Verlag Wirz-Aarau
- WENZEL, W. (2002):** Mikrobiologische Charakterisierung eines Anaerobreaktors zur Behandlung von Rübenmelasseschnitzel. Dissertation, TU Berlin
- WERNSMANN, P. (2008):** „Das neue EEG – Auswirkungen auf Biogasanlagen“, in Agrar- und Umweltrecht, 38/10, 2008, S. 329-336
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT AGRARPOLITIK (2007):** Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik. Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Berlin.
- WITTKOPF, S. (2005):** „Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern“, TU- München, ISBN 978-393350613
- ZOLLONDZ, H.-D. (2001):** Lexikon Qualitätsmanagement: Handbuch des modernen Managements auf Basis des Qualitätsmanagements, S.801, München

**1. Liste über Veröffentlichungen**

- Artikel für die Zeitschrift „Landtechnik“ (eingereicht)
- 

**2. Liste über Vorträge**

- 24. Wissenschaftliche Fachtagung „Biogaserzeugung in Nordrhein-Westfalen – Rahmenbedingungen, Fortschritte und Perspektiven“ USL-Tagung; 24.01.2009
- Projektvorstellung an der Agricultural University of Ya'an (China); 02.06.2009

**3. Liste über Posterpräsentationen, Vorführungen und Demonstrationen**

- International Energie Farming Congress, Papenburg; 10.-12.3.2009
- 121. VDLUFA Kongress, Karlsruhe, 15.-18.09.2009 (eingereicht)