

## Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis	XIII
	Tabellenverzeichnis	XVIII
	Abkürzungsverzeichnis	XXIII
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Einführung in die Thematik</b>	<b>1</b>
1.1.1	Abgrenzung	2
1.1.2	Inhalt	2
<b>1.2</b>	<b>Bioenergie - Biogastechnologie</b>	<b>3</b>
1.2.1	Energie aus Biomasse - Bioenergie	3
1.2.2	Entwicklung der Biogastechnologie	5
1.2.3	Potenzial der Biogastechnologie	8
1.2.4	Bestehende Herausforderung	10
<b>2</b>	<b>Biologische und biochemische Grundlagen</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Klassifizierung der Lebewesen</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Mikroorganismen und ihre Taxonomie</b>	<b>13</b>
2.2.1	Bakterien (Eubakterien)	15
2.2.2	Archaeen	15
<b>2.3</b>	<b>Standard- und Redoxreaktionen</b>	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>Enzyme und Cofaktoren</b>	<b>18</b>
<b>2.5</b>	<b>Leistungs- und Energiestoffwechsel der Mikroorganismen</b>	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>Temperatureinfluss auf biologische Abbauprozesse</b>	<b>22</b>
<b>2.7</b>	<b>Einfluss des pH-Wertes und der Puffersysteme auf biol. Abbauprozesse</b>	<b>24</b>
<b>2.8</b>	<b>Einteilung der biologischen Leistungs- und Energiestoffwechsel</b>	<b>25</b>
2.8.1	Photosynthese	25
2.8.2	Atmung	26
2.8.2.1	Aerobe Atmung	26
2.8.2.2	Anaerobe Atmung	28
2.8.3	Gärung	28
2.8.4	Syntrophie	30
2.8.5	Gewässersediment als Beispiel für Leistungs- und Energiestoffwechsel im komplexen Ökosystem	31
<b>2.9</b>	<b>Anaerober Abbau organischer Substanz</b>	<b>33</b>
2.9.1	Anaerober Abbau von Kohlenhydraten	34
2.9.2	Anaerober Abbau von Proteinen	38
2.9.3	Anaerober Abbau von Lipiden	39
2.9.4	Anaerober Abbau am Beispiel des Vormagensystems der Wiederkäuer	40
<b>2.10</b>	<b>Einflussfaktoren auf den anaeroben Abbauprozess</b>	<b>45</b>
2.10.1	Substratzusammensetzung und Makronährstoffe	45
2.10.2	Mikronährstoffe (Spurenelemente)	47
2.10.3	Organische Säuren	48
2.10.4	Stickstoffzufuhr und Ammoniakhemmung	50

2.10.5	Schwefelverbindungen und Schwefelwasserstoff-Hemmung	52
2.10.6	Übersicht der Hemmstoffe	53
<b>2.11</b>	<b>Mikrobielles Wachstum und Enzymkinetik</b>	<b>55</b>
2.11.1	Mikrobielles Wachstum	55
2.11.2	Enzymkinetik	57
2.11.3	Der geschwindigkeitslimitierende Schritt	61
2.11.4	Simulation und Modellierung anaerober Umsetzungsprozesse	62
<b>3</b>	<b>Analytik, Messverfahren und Prozesskontrolle</b>	<b>67</b>
<b>3.1</b>	<b>Substratcharakterisierung</b>	<b>68</b>
3.1.1	Probenahme	68
3.1.2	Probeaufbereitung	69
3.1.3	Trockensubstanz (Trockenmasse) - Wassergehalt	70
3.1.4	Brennwert und Heizwert fester und flüssiger Substrate	71
3.1.5	Einzelparameterbestimmung – Elementaranalyse	72
3.1.6	Kohlenstoff (TC, TOC und TIC)	73
3.1.7	Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	74
3.1.8	CSB/TOC Verhältnis	75
3.1.9	Vergärbarkeit - Biogasertrag	77
3.1.9.1	Stöchiometrische Berechnung	78
3.1.9.2	Weender Futterwertanalyse	78
3.1.9.3	Erweiterte Weender Futterwertanalyse	81
3.1.9.4	Bestimmung der fermentierbaren org. Trockensubstanz (FoTS) nach Weißbach	82
3.1.9.5	Rumen-Simulationstechnik RUSITEC	84
3.1.9.6	Erweiterte Rumen-Simulationstechnik RUSITEC N	86
3.1.9.7	Gärversuche – Biogasertragstest nach VDI-Richtlinie 4630	87
3.1.9.8	Datenbanken zur Substratcharakterisierung	91
3.1.10	Hemmstoffe im Substrat	91
<b>3.2</b>	<b>Prozesskontrolle und Charakterisierung der Gärbiologie</b>	<b>92</b>
3.2.1	Probenahme	92
3.2.2	pH-Wert	92
3.2.3	Redoxpotenzial	93
3.2.4	Temperatur	94
3.2.5	Kurzkettige organische Fettsäuren - flüchtige organischen Säuren	94
3.2.6	Pufferkapazität / Säurekapazität / Basizität	95
3.2.7	FOS / TAC	95
3.2.8	Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS)	98
3.2.9	Spurenelemente und Mikronährstoffe	98
3.2.10	Stickstoff	99
3.2.10.1	Organischer Stickstoff ( $N_{org}$ ) und Kjeldahl-Stickstoff (KN)	99
3.2.10.2	Ammoniumstickstoff ( $NH_4-N$ ), Ammoniak ( $NH_3$ )	100
3.2.10.3	Nitrat-Stickstoff ( $NO_3-N$ ), Nitrit-Stickstoff ( $NO_2-N$ )	100
3.2.11	Schlammaktivität – Biogasertrag - Restgaspotential	101
<b>3.3</b>	<b>Gärrest</b>	<b>103</b>
3.3.1	Probenahme und Probeaufbereitung	103
3.3.2	Gärproduktqualitätsanalyse und -sicherung	103

<b>3.4</b>	<b>Biogas</b>	<b>104</b>
3.4.1	Probenahme	105
3.4.2	Gasmengenmessung	106
3.4.3	Gaszusammensetzung und -qualität	107
3.4.3.1	Methan (CH <sub>4</sub> ) und Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )	107
3.4.3.2	Wasserstoff (H <sub>2</sub> ) und Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	108
3.4.3.3	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) Gas	108
3.4.3.4	Silizium (organisch im Gas)	109
3.4.3.5	Kohlenwasserstoffe	109
3.4.4	Brennwert und Heizwert gasförmiger Substanzen	109
<b>4</b>	<b>Substratauswahl und -charakteristik</b>	<b>111</b>
<b>4.1</b>	<b>Indikatoren und Parameter</b>	<b>111</b>
<b>4.2</b>	<b>Substratunterscheidung und -eignung</b>	<b>112</b>
<b>4.3</b>	<b>Wirtschaftsdünger</b>	<b>114</b>
4.3.1	Allgemeine Einteilung	114
4.3.2	Anfall- und Einsatzmengen	115
4.3.3	Bereitstellung und Vorbehandlung	117
4.3.4	Substratspezifische Eigenschaften	117
4.3.5	Besonderheiten	118
<b>4.4</b>	<b>Nachwachsende Rohstoffe</b>	<b>119</b>
4.4.1	Einteilung	119
4.4.2	Anbau- und Einsatzmengen	119
4.4.3	Substratanbau	120
4.4.4	Bereitstellung und Vorbehandlung	123
4.4.4.1	Störstoffabtrennung	123
4.4.4.2	Aufbereitung / Aufschluss	124
4.4.4.3	Konservierung und Sillierung	124
4.4.5	Substratspezifische Eigenschaften	126
4.4.5.1	Mais	126
4.4.5.2	Lieschkolbenschrot, Corn-Cob-Mix und reine Maiskörner	127
4.4.5.3	Grünland, Grassilage, Kleegrasmenge	127
4.4.5.4	Zuckerrübe	128
4.4.5.5	Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS)	130
4.4.5.6	Getreidekorn und -schrote	131
4.4.5.7	Miscanthus (Chinaschilf, Elefantengras)	131
4.4.5.8	Durchwachsende Silphie	132
4.4.5.9	Sorghum	132
4.4.6	Besonderheiten und Probleme	133
<b>4.5</b>	<b>Organische Abfälle und industrielle Nebenprodukte</b>	<b>135</b>
4.5.1	Einteilung und Herkunft	135
4.5.1.1	Industrie	135
4.5.1.2	Landwirtschaft	137
4.5.1.3	Kommunal	138
4.5.2	Substrateigenschaften	138
4.5.3	Nährstoff- und Schadstoffgehalte	139

4.6	<b>Anforderungen bei der Substratauswahl</b>	<b>140</b>
4.7	<b>Herstellung von Substratmischungen</b>	<b>141</b>
<b>5</b>	<b>Verfahrenstechnik der anaeroben Behandlung</b>	<b>143</b>
5.1	<b>Reaktorkinetik</b>	<b>144</b>
5.1.1	<i>Bilanzgleichung - Massenbilanz</i>	144
5.1.2	<i>Reaktionsordnung</i>	144
5.1.3	<i>Reaktionsräume</i>	146
5.1.4	<i>Vergleich der idealisierten Reaktortypen</i>	149
5.1.5	<i>Prozessführung – Anpassung der Reaktionsräume</i>	151
5.2	<b>Kennwerte und Bemessungsparameter</b>	<b>152</b>
5.2.1	<i>Hydraulische Verweilzeit</i>	152
5.2.2	<i>Schlammalter - Feststoffverweilzeit</i>	153
5.2.3	<i>Raum- und Schlammbelastung</i>	153
5.2.4	<i>Abbaugrad</i>	154
5.2.5	<i>Ausbeute und Produktivität</i>	155
5.2.6	<i>Übersicht der Kennwerte und Bemessungsparameter</i>	156
5.3	<b>Behandlung von flüssigen und fließfähigen Substraten</b>	<b>157</b>
5.4	<b>Landwirtschaftliche Biogasanlagen</b>	<b>159</b>
5.4.1	<i>Gesamtaufbau</i>	159
5.4.2	<i>Nassfermentation</i>	162
5.4.2.1	<i>Fermenter</i>	162
5.4.2.2	<i>Eintrags- und Fördersysteme</i>	163
5.4.2.3	<i>Durchmischung</i>	168
5.4.3	<i>Trockenfermentation / Feststoff-Verfahren</i>	169
5.4.3.1	<i>Verfahren zur Trockenfermentation</i>	170
5.4.3.2	<i>Fermenter und Prozessführung</i>	171
5.4.4	<i>Gasspeicher</i>	173
5.4.4.1	<i>Interne Gasspeicherung</i>	174
5.4.4.2	<i>Externe Gasspeicherung</i>	174
5.4.4.3	<i>Zusätzliche Gasverbrauchseinrichtung nach EEG 2012</i>	175
5.4.5	<i>Gärrestlager</i>	175
5.4.6	<i>Prozessüberwachung</i>	176
5.4.6.1	<i>Substratmenge und Substratmanagement</i>	177
5.4.6.2	<i>Gasmenge/Stromproduktion</i>	178
5.4.6.3	<i>Gasqualität</i>	179
5.4.6.4	<i>Analysenhäufigkeit</i>	179
5.5	<b>Erweiterte Verfahren – mehrstufige Prozesse</b>	<b>180</b>
5.5.1	<i>Vorgeschaltete aerobe Hydrolyse-/Versäuerungsstufe</i>	182
5.5.2	<i>Vorgeschaltete anaerobe Hydrolyse-/Versäuerungsstufe</i>	183
5.5.3	<i>Getrennter Betrieb von Hydrolyse-/Versäuerung und Methanisierung</i>	184
5.5.3.1	<i>Hydrolyse-/Versäuerung mit Hilfe der Perkolation</i>	184
5.5.3.2	<i>Hydrolyse-/Versäuerung entsprechend dem Pansen der Wiederkäuer</i>	184
<b>6</b>	<b>Biogas (Zusammensetzung, Nutzung und Aufbereitung)</b>	<b>190</b>
6.1	<b>Zusammensetzung und Inhaltsstoffe</b>	<b>191</b>
6.1.1	<i>Methan (CH<sub>4</sub>) und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)</i>	192

6.1.2	Wasser (H <sub>2</sub> O)	194
6.1.3	Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	194
6.1.4	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) Gas	195
6.1.5	Siliziumverbindungen (organisch im Gas)	195
6.1.6	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	195
6.1.7	Carbonylsulfid (COS)	196
<b>6.2</b>	<b>Biogasqualität - Energieinhalt</b>	<b>196</b>
6.2.1	Anforderungen an die Gasqualität	197
6.2.2	Anforderungen an die Sicherheit	198
6.2.2.1	Methan (CH <sub>4</sub> )	198
6.2.2.2	Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )	199
6.2.2.3	Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	199
<b>6.3</b>	<b>Biogasnutzung</b>	<b>200</b>
6.3.1	Biogasnutzung stationär	201
6.3.1.2	Zündstrahlmotor - BHKW	203
6.3.1.3	Gas-Otto-Motor - BHKW	203
6.3.1.4	Stirlingmotor - BHKW	204
6.3.1.5	Gasturbinen – (Mikrogasturbinen) - BHKW	205
6.3.1.6	Brennstoffzellen BHKW - stationär	206
6.3.1.7	Betriebsführung und Energieauskopplung	207
6.3.1.8	Nahwärmenetz	208
6.3.2	Biogasnutzung mobil	209
6.3.2.1	Fahrzeugantrieb	209
6.3.2.2	Brennstoffzelle mobil	210
6.3.3	Biogas Netzeinspeisung	211
6.3.3.1	Lokales Netz zur dezentralen Energieversorgung	211
6.3.3.2	Erdgasnetz, Städtnetz zur zentralen Energieversorgung	211
<b>6.4</b>	<b>Biogasaufbereitung</b>	<b>212</b>
6.4.1	Biologische Verfahren	213
6.4.1.2	Interne biologische Entschwefelung	214
6.4.1.3	Externe Biologische Entschwefelung	215
6.4.2	Physikalische Verfahren	218
6.4.2.1	Kondensation / Entfeuchtung	218
6.4.2.2	Adsorption	218
6.4.2.3	Absorption	221
6.4.2.4	Filtration / Membranfiltration	223
6.4.3	Chemische Verfahren	225
6.4.3.1	Oxidation / Verbrennung	225
6.4.3.2	Fällungsreaktion (Entschwefelung über FeOH)	225
6.4.4	Chemisch-physikalische Verfahren	226
6.4.4.1	Reaktiv-Adsorption	226
6.4.4.2	Chemisorption	227
6.4.5	Konditionierung - Herstellung regelkonformer Gase	228
6.4.5.1	Druckanpassung - Verdichtung	228
6.4.5.2	Brennwertanpassung	228
6.4.5.3	Odorierung	228
6.4.6	Übersicht und Auswahl der Aufbereitungsverfahren	228

<b>7</b>	<b>Gärrest</b>	<b>234</b>
<b>7.1</b>	<b>Gärrestzusammensetzung und -qualität</b>	<b>234</b>
<b>7.2</b>	<b>Gärrestlagerung und -verwertung</b>	<b>236</b>
7.2.1	<i>Klimarelevante Emissionen und Restgaspotenzial</i>	237
7.2.2	<i>Ammoniakemissionen</i>	238
7.2.3	Nährstoffgehalt und Düngewirkung	238
7.2.3.1	Humusbilanz	238
7.2.3.2	Nährstoffverfügbarkeit und -bedarf	240
7.2.4	Applikationstechniken für Gärrest	242
<b>7.3</b>	<b>Gärrestaufbereitung</b>	<b>244</b>
7.3.1	<i>Mechanische Separierung – Fest-/Flüssigtrennung</i>	245
7.3.2	<i>Thermische Verfahren</i>	246
7.3.2.1	<i>Trocknung</i>	246
7.3.2.2	<i>Verdunstung</i>	248
7.3.2.3	<i>Verdampfung</i>	248
7.3.3	<i>Membrantrennverfahren</i>	250
7.3.4	<i>Ammoniak-Strippung</i>	251
7.3.5	<i>Chemische Nährstoffabtrennung</i>	251
7.3.6	<i>Kompostierung</i>	251
7.3.7	<i>Übersicht</i>	252
<b>8</b>	<b>Rechtliche Anforderungen und Sicherheit</b>	<b>253</b>
<b>8.1</b>	<b>Genehmigung von Biogasanlagen</b>	<b>254</b>
8.1.2	Genehmigungsverfahren	255
8.1.2.2	Baurecht	256
8.1.2.3	<i>Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV)</i>	258
8.1.3	<i>Naturschutzrechtliche Anforderungen</i>	263
8.1.4	<i>Wasserrechtliche Anforderungen</i>	263
8.1.5	<i>Abfallrecht</i>	265
<b>8.2</b>	<b>Substratbedingte Anforderungen</b>	<b>265</b>
8.2.1	Zulässigkeit von Einsatzstoffen	265
8.2.2	Tierseuchen- und hygienerechtliche Vorschriften der EU	267
8.2.3	Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung und -gesetz	268
8.2.4	<i>Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG</i>	269
8.2.5	<i>Bioabfallverordnung</i>	270
<b>8.3</b>	<b>Gärrestbedingte Anforderungen</b>	<b>271</b>
8.3.1	<i>Anforderungen an die Gärrestlagerung</i>	271
8.3.2	<i>Anforderungen an die Gärrestverwertung und -ausbringung</i>	272
8.3.2.1	<i>Düngerverordnung (DüV)</i>	273
8.3.2.2	<i>Düngemittelverordnung (DüMV)</i>	274
8.3.2.3	<i>Wirtschaftsdüngerverordnung</i>	275
<b>8.4</b>	<b>Sicherheit / Explosionsschutz</b>	<b>275</b>
8.4.1	Eigenschaften von Biogas und deren Wirkung	275
8.4.2	Explosionseigenschaften von Biogas	276
8.4.3	Gefahrenarten	277
8.4.3.1	Explosion	277
8.4.3.2	Verpuffung	277

8.4.3.3	Brand	277
8.4.3.4	Blitzschlag	278
8.4.3.5	Erstickung	278
8.4.3.6	Vergiftung	278
8.4.3.7	Sorglosigkeit und Routine	279
8.4.4	Relevante Vorschriften	279
8.4.5	Betriebszustände	280
8.4.6	Gefahrenanalyse und -abwehr	281
8.4.6.2	Ex-Zoneneinteilung	282
8.4.6.3	Zündquellen nach DIN 1127-1	283
8.4.6.4	Elektrische Betriebsmittel	284
8.4.6.5	Beschilderung, Anweisungen, Verbote, Dokumentation	285
8.4.6.6	Gefahrenpotenzial von Schwefelwasserstoff	286
8.4.6.7	EG-Konformitätserklärung	287
8.4.6.8	Explosionsschutzdokument	287
8.4.6.9	Unterrichtung und Unterweisung	288
<b>9</b>	<b><i>Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen und Vergütungen</i></b>	<b>289</b>
<b>9.2</b>	<b>Kosten</b>	<b>289</b>
9.2.1	<i>Substratkosten</i>	290
9.2.1.2	<i>Substrate aus der Landwirtschaft (Wirtschaftsdünger und NawaRo)</i>	291
9.2.1.3	<i>Organische Abfälle und Nebenprodukte</i>	292
9.2.2	<i>Betriebskosten</i>	293
9.2.2.1	Arbeitskosten	293
9.2.2.2	Transportkosten Gärrestaubsbringung	293
9.2.2.3	Betriebsstoffe	294
9.2.2.4	Wartung und Reparatur	294
9.2.2.5	<i>Prozessmesstechnik und Laboranalysen</i>	295
9.2.2.6	<i>Kosten einer Gärrestaubaufbereitung</i>	295
9.2.3	Investition und investitionsabhängige Kosten	295
9.2.4	<i>Flächenkosten</i>	297
<b>9.3</b>	<b>EEG-Vergütung</b>	<b>297</b>
9.3.1	Grundlagen für die Vergütungsermittlung	298
9.3.1.1	Höhe der Vergütung	298
9.3.1.2	Dauer der Vergütung	298
9.3.1.3	Degression	298
9.3.1.4	Anlage im Sinne des EEG	299
9.3.2	Vergütung	300
9.3.2.2	Grundvergütung	301
9.3.2.3	Bedingung der Kraft-Wärme-Kopplung	301
9.3.2.4	Bedingung der Gärresteabdeckung	302
9.3.2.5	Boni für Einsatz von Substraten der Rohstoffvergütungsklasse I und II	302
9.3.2.6	Bonus bei Vergärung von Gülle	303
9.3.2.7	Regelung bei Vergärung von Bioabfall	303
9.3.2.8	Gasaufbereitungsbonus	303
9.3.3	Vergleich der Vergütungen und Boni nach EEG 2009 und EEG 2012	304

<b>9.4</b>	<b><i>Erlöse</i></b>	<b>305</b>
9.4.1	Erlöse aus der Stromeinspeisung entsprechend der EEG Förderung	305
9.4.2	Erlöse aus dem Stromverkauf	306
9.4.3	Wärmeverkauf	306
9.4.4	Gasverkauf	307
9.4.5	Substraterlös	308
9.4.6	Gärrestverkauf	308
<b>9.5</b>	<b><i>Berechnung der Wirtschaftlichkeit</i></b>	<b>310</b>
<b>9.6</b>	<b><i>Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen</i></b>	<b>314</b>
<b>10</b>	<b><i>Ausblick</i></b>	<b>318</b>
<b>11</b>	<b><i>Lernkontrolle und Übungsaufgaben</i></b>	<b>321</b>
<b>A.</b>	<b><i>Stichwortverzeichnis</i></b>	<b>A-1</b>
<b>B.</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b>	<b>B-1</b>
<b>C.</b>	<b><i>Anhang</i></b>	<b>C-1</b>
<b>I.</b>	<b><i>Probennahme</i></b>	<b>C-1</b>
<b>II.</b>	<b><i>Korrelation von CSB, Nährwerten und Reaktionsenthalpie</i></b>	<b>C-3</b>
<b>III.</b>	<b><i>Rechenweg für den spezifische Gasertrag</i></b>	<b>C-4</b>
<b>IV.</b>	<b><i>Wirtschaftsdünger</i></b>	<b>C-5</b>
<b>V.</b>	<b><i>NawaRo - Energiepflanzen</i></b>	<b>C-6</b>
<b>VI.</b>	<b><i>Organische Nebenprodukte und Abfälle</i></b>	<b>C-7</b>
<b>VII.</b>	<b><i>Zusammenstellung der Genehmigungsunterlagen</i></b>	<b>C-9</b>
<b>VIII.</b>	<b><i>Kennzeichnungsbeispiel für Gärrest</i></b>	<b>C-10</b>
<b>IX.</b>	<b><i>Vorhandensein von wirksamen Zündquellen nach DIN 1127 Teil 1 und BGR 104, Abschn. E2.3 [DBFZ, 2008, geändert]</i></b>	<b>C-11</b>
<b>X.</b>	<b><i>Relevante Gesetze, Verordnungen und Regelwerke</i></b>	<b>C-12</b>