

# Inhalt

I	LANDWIRTSCHAFTLICHE BIOGASANLAGEN IN DEUTSCHLAND .....	11
II	BIOGASPRODUKTION .....	18
1	Allgemeines .....	18
2	Nassvergärung .....	20
2.1	Allgemeines .....	20
2.2	Substrataufbereitung .....	20
2.2.1	Übersicht der Verfahren zur Substrataufbereitung (Desintegration) .....	21
2.2.2	Verfahren zur Aufbereitung von Biomasse .....	24
2.3	Substratförderung und -einbringung .....	27
2.3.1	Allgemeines .....	27
2.3.2	Feststoffeintragssysteme .....	27
2.3.3	Eintragungssysteme für pumpfähige Substrate .....	32
2.3.4	Fest-Flüssig-Eintragungssysteme .....	34
2.3.5	Beispiele für Substrateintrags- und Fördersysteme .....	35
2.4	Fermenterbauarten .....	36
2.4.1	Allgemeines .....	36
2.4.2	Materialverwendung im Behälter- und Fermenterbau .....	38
2.4.3	Wirtschaftliche Kennwerte von Fermentern .....	40
2.4.4	Oberflächenbeschichtung von Fermentern .....	41
2.5	Fermenterdämmung .....	42
2.6	Armaturen und Rohrleitungen .....	43
2.7	Leckageerkennungssystem .....	47
2.8	Substrathomogenisierung .....	49
2.9	Fermenterheizungssysteme .....	57
2.10	Hygenisierung von Biomassen .....	59
2.11	Sedimentaustrag .....	61
3	Feststoffvergärung .....	62
3.1	Allgemeines .....	62
3.2	Diskontinuierliche Verfahren .....	63
3.3	Kontinuierliche Verfahren .....	65
4	Sonderverfahren .....	66
4.1	Gülle-Kleinanlagen .....	66
4.2	Festbettfermenter .....	68
5	Biogasspeicherung .....	70
5.1	Allgemeines .....	70
5.2	Interne Biogasspeicher .....	71
5.3	Externe Biogasspeicher .....	73

6	Verfahrens- und prozesstechnische Auslegungsgrößen .....	76
7	Messtechnik für Biogasanlagen .....	83
8	Sicherheitstechnik .....	89
9	Betriebsstörungen an Biogasanlagen .....	94
III	SUBSTRATE .....	98
1	Anfallmengen von Substraten .....	98
2	Substrate aus Wirtschaftsdüngern und tierischen Nebenprodukten .....	100
3	Energiepflanzen .....	104
3.1	Sorteneigenschaften, Standortansprüche und Nachernteverfahren von Energiepflanzen .....	105
3.2	Kennwerte zur Produktion und Kosten von Energiepflanzen .....	108
3.3	Substratlagerung .....	113
IV	GAS AUSBEUTE AUS SUBSTRATEN .....	125
1	Methoden zur Ermittlung der Gasausbeute .....	125
1.1	Batchversuche .....	125
1.2	Kontinuierliche Versuche .....	126
1.3	Rechenmodelle .....	127
1.4	Berechnung von Normvolumen .....	130
2	Bezugsgrößen für den Energieertrag .....	131
3	Richtwerte für Gasausbeuten .....	132
3.1	Zusammensetzung von Biogas .....	132
3.2	Richtwerte und Laborergebnisse für Gasausbeuten wichtiger Biogassubstrate .....	132
3.3	Umrechnung der Gaserträge auf die Frischmasse und abweichende Trockenmassegehalte .....	136
3.4	Gasausbeuten gemäß Biomasseverordnung .....	136
4	Einflussfaktoren auf die Gasausbeute .....	141
4.1	Einfluss von Gärsubstrat .....	141
4.2	Technische Faktoren .....	143
4.3	Relative Substratausnutzung .....	146
V	BIOLOGIE UND STEUERUNG DES VERGÄRUNGSPROZESSES .....	148
1	Ablauf der Biogasbildung .....	148
2	Stabilität des Gärprozesses .....	153
3	Erkennen von Prozessstörungen .....	160
4	Inbetriebnahme und Anfahrphase einer Biogasanlage .....	165

VI	BIOGASVERWERTUNG .....	167
1	Allgemeines .....	167
2	Stromerzeugung .....	167
2.1	Blockheizkraftwerke (BHKW) .....	167
2.2	Mikrogasturbine .....	174
2.3	Brennstoffzelle .....	177
3	Auskopplung und Nutzung der BHKW-Wärme .....	179
3.1	Nutzung der Wärme zur Beheizung von Gebäuden und Gewerbebetrieben .....	180
3.1.1	Kennwerte für Nahwärmenetze, Gebäude und nicht landwirtschaftliche Gewerbebetriebe .....	180
3.1.2	Kosten für die Wärmeverteilung im Nahwärmenetz .....	183
3.2	Nutzung der Wärme im Gartenbau sowie in der Land- und Forstwirtschaft .....	186
3.2.1	Beheizung von Unterglaskulturen .....	188
3.2.2	Druschfruchttrocknung .....	190
3.2.3	Trocknung von Brennholz .....	192
3.2.4	Beheizung von Ställen .....	195
3.3	Stromerzeugung aus BHKW-Wärme mit Organic-Rankine-Cycle- Anlagen und Clausius-Rankine-Cycle-Anlagen .....	196
3.4	Nutzung der Wärme zur Kühlung .....	199
3.4.1	Kälteanlagen .....	199
3.4.2	Milchkühlung .....	203
3.4.3	Kühlung von Obst und Gemüse .....	205
4	Biogasaufbereitung zur Einspeisung ins Erdgasnetz .....	206
4.1	Allgemeines .....	206
4.2	Anforderungen an das einzuspeisende Biogas .....	207
4.3	Verfahren zur Aufbereitung von Biogas .....	209
4.3.1	Druckwasserwäsche (DWW) .....	211
4.3.2	Druckwechseladsorption (PSA) .....	213
4.3.3	Aminwäsche .....	214
4.3.4	Organisch-physikalische Wäsche (PEG-Wäsche) .....	216
4.3.5	Membrantrennverfahren .....	216
4.3.6	Tiefemperaturverfahren (kryogene Verfahren) .....	217
4.3.7	Vergleich der Aufbereitungsverfahren .....	217
5	Nutzung von Biogas als Kraftstoff .....	220
5.1	Gasförmige und flüssige Kraftstoffe im Vergleich .....	220
5.2	Tankstellen und Betankungssysteme .....	222

<b>VII</b>	<b>GÄRPRODUKTE</b> .....	<b>227</b>
1	Lagerung von Gärprodukten .....	227
1.1	Lagerung von flüssigen Gärprodukten .....	227
1.2	Homogenisieren und Fördern von Gärprodukten .....	229
1.3	Minderung von Ammoniakemissionen bei der Lagerung von Gärprodukten .....	231
1.4	Lagerung von stapelbaren Gärprodukten (separierte Feststoffe und Gärprodukte aus der Feststoffvergärung) ..	233
1.5	Investitionsbedarf Gärproduktlager .....	235
2	Behandlung und Aufbereitung von Gärprodukten .....	236
2.1	Ziele der Behandlung und Aufbereitung von Gärprodukten .....	236
2.2	Verfahren der Behandlung und Aufbereitung von Gärprodukten .....	237
2.2.1	Separation .....	237
2.2.2	Verfahren zur Aufbereitung der Festphase .....	240
2.2.3	Verfahren zur Aufbereitung der Flüssigphase .....	242
2.3	Planungsbeispiele für die Aufbereitung von 30000 m <sup>3</sup> Gärprodukt ..	247
3	Düngung mit Gärprodukten .....	250
3.1	Ableitung und Berechnung von Gärprodukteigenschaften .....	250
3.2	Nährstoffwirkung und Nährstoffbilanz .....	253
3.2.1	Ammoniakverluste, Emissionsminderung und Stickstoffwirkung .....	253
3.2.2	Nährstoffbilanz .....	257
3.3	Humusbilanz .....	260
4	Minderung von Methanemissionen bei der Lagerung von flüssigen Gärprodukten durch Gärproduktlagerabdeckung .....	261
5	Hygiene und Schadstoffe .....	264
<b>VIII</b>	<b>Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen</b> .....	<b>272</b>
1	Erträge aus dem Stromverkauf nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) .....	272
2	Modellanlagen .....	276
2.1	Annahmen für die Modellanlagen .....	278
2.2	Leistungs-Kostenrechnung .....	284
2.3	Sensitivitätsanalyse .....	297
2.4	Biomassebereitstellungs- und Gärrestausbringungskosten .....	299
2.5	Auswirkung von Mechanisierung, Schlaggrößen und Wegstrecken auf die Feldflächenleistung und die Kosten der Substraternte und der Gärrestausbringung .....	300

<b>IX</b>	<b>ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG DER BIOGASERZEUGUNG</b>	<b>304</b>
1	Energieaufwand und Energieertrag beim Energiepflanzenanbau	304
2	Treibhausgasbilanzen	305
2.1	Quellen für Treibhausgase bei der Biogaserzeugung	305
2.2	Treibhausgasemissionen und -bilanzen landwirtschaftlicher Biogasanlagen	306
2.2.1	Treibhausgasbilanzen und -vermeidungskosten von Modellanlagen mit Vor-Ort-Verstromung	307
2.2.2	Treibhausgasemissionen der Modellanlagen mit Biogasaufbereitung zu Biomethan	310
2.3	Einflussfaktoren auf die Treibhausgasbilanz von Biogasanlagen	310
2.3.1	Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen als Substrat	311
2.3.2	Auskoppelung von Wärme	313
2.3.3	Abdeckung des Gärrestlagers	314
2.3.4	Indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC)	315
3	Ökologische Bilanzierung der Biogaserzeugung	316
4	Zusammenfassung der Emissionsquellen und der ökologischen Effekte	318
<b>X</b>	<b>BIOGAS IN KÜRZE</b>	<b>322</b>
<b>XI</b>	<b>ANHANG</b>	<b>341</b>
	Abkürzungen	341
	SI-Präfixe	347
	Elemente und Verbindungen	348
	Stichworte	350
	Personenverzeichnis	355
	KTBL-Veröffentlichungen	356
	aid Veröffentlichungen	360