

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung und Hinweise zur Benutzung</b> .....	1
1.1 Einführung .....	1
1.2 Ziele und Inhalt .....	3
1.3 Hinweise zur Benutzung .....	4
1.4 Verwendung von Einheiten und Synonymen in der Biogastechnologie in Abfallwirtschaft, Abwasserbehandlung und Landwirtschaft .....	5
<b>2 Allgemeine Grundlagen</b> .....	9
2.1 Einführung .....	9
2.2 Stoffwerte für die Prozessanalyse .....	10
2.2.1 Basisdaten relevanter Atome und Moleküle .....	11
2.2.2 Die Löslichkeit von Prozessgasen in wässrigen Medien .....	11
2.2.3 Dissoziation in wässrigen Medien .....	14
2.2.4 Salzgehalt und Leitfähigkeit in wässrigen Medien .....	22
2.2.5 Feuchte Gase .....	24
2.2.6 Die rheologischen Eigenschaften von Gärsubstraten, Fermenterinhalt und Gärresten. ....	34
2.2.6.1 Grundlagen zur Definition und Bedeutung rheologischer Medieneigenschaften .....	34
2.2.6.2 Die Rheologie bio-organischer Suspensionen .....	39
2.2.6.3 Die Bedeutung der Viskosität für Prozessmodellierung sowie Dimensionierung biotechnologischer Prozesse .....	42
2.2.6.4 Blasenauftstieg und Gas-hold-up .....	45
2.2.6.5 Wechselwirkung von Viskosität und Diffusion sowie Stoffübergang .....	49
2.2.6.6 Auswirkungen der Viskosität auf Stoff- und Wärmetransport. ....	51
2.2.6.7 Sedimentation in viskosen Gärmedien .....	52

2.2.6.8	Die Druckverluste der Rohrströmung viskoser Medien . . . . .	54
2.2.6.9	Viskositätseinfluss auf die Auswahl der Rührsysteme und ihre Leistungsaufnahme . . . . .	56
2.3	Hinweise zu Verfahrenstechnik und Bilanzierung des Wärmehaushalts von Vergärungsanlagen. . . . .	61
2.3.1	Bakterieller Stoffwechsel und biochemische Wärmetönung . . . . .	61
2.3.2	Bilanzierung und Berechnung des erforderlichen Wärmeeintrags für die Substraterwärmung auf Prozesstemperatur . . . . .	62
2.3.3	Wärmeverluste . . . . .	66
2.3.3.1	Konvektive Reaktorwärmeverluste . . . . .	66
2.3.3.2	Wärmeaustrag durch das Biogas. . . . .	71
2.3.4	Hygienisierung, Sterilisation und Trocknung/Verdampfung sowie Abkühlung . . . . .	74
2.4	Prozessbiologische Grundlagen . . . . .	76
2.4.1	Synergistische und antagonistische Reaktionen innerhalb der anaeroben Stoffwechselkette . . . . .	76
2.4.2	Der Einfluss von Substrat und Milieubedingungen auf die anaerobe Prozessdynamik . . . . .	78
2.4.2.1	Stoffwechselkette und Abbaupfade. . . . .	79
2.4.2.2	Besonderheiten von Hydrolyse und Versäuerung . . . . .	80
2.4.2.3	Abbau der Stoffwechselprodukte aus der Hydrolyse . . . . .	83
2.4.3	Thermodynamik des biologischen Prozesses. . . . .	83
2.4.4	Experimentelle Arbeiten zur Bestimmung von Bakterienwachstum und Biomasseerträgen . . . . .	86
<b>3</b>	<b>Der anaerobe Stoffwechsel und Methoden seiner mathematischen Beschreibung . . . . .</b>	<b>99</b>
3.1	Einführung . . . . .	99
3.2	Die stöchiometrische Erfassung des anaeroben Stoffwechsels . . . . .	100
3.2.1	Die Bilanzierung der Biogasbildung ohne Berücksichtigung des Substratabbaus . . . . .	100
3.2.1.1	Substratspezifische Gasertragswerte aus Gärtesten . . . . .	100
3.2.1.2	Die Massenbilanzgleichungen des stationären Gasbildungsprozesses auf der Basis von Gärtestergebnissen . . . . .	104
3.2.1.3	Methanäquivalentbestimmung aus dem CSB-Umsatz des metabolisierten Substratanteils. . . . .	105
3.2.1.4	Die Massenbilanzgleichungen des stationären Gasbildungsprozesses unter Verwendung des Methanäquivalents für den umgesetzten CSB . . . . .	106

3.2.2	Die modellmäßige Abbildung des anaeroben Stoffumsatzes. . . . .	109
3.2.2.1	Die BUSWELL-Stöchiometrie auf Basis der substratspezifischen Bruttosummenformeln . . . . .	109
3.2.2.2	Die CSB-Bestimmung für Gärsubstrate . . . . .	122
3.2.2.3	Zusammenführung von CSB- und BUSWELL- Stöchiometrie zu einem statistisch auswertbaren Modellansatz. . . . .	131
3.2.2.4	Hydrolysezwischenprodukte und Gesamt-Biogas . . . . .	134
3.3	Alternative Methoden der Gasertragsbestimmung . . . . .	156
3.3.1	Weender-Analyse . . . . .	157
3.3.2	Weißbach-Formel . . . . .	167
3.3.3	Sonstige Bilanzierungsansätze. . . . .	169
<b>4</b>	<b>Beschreibung des Stoffverhaltens im Fermenter . . . . .</b>	<b>177</b>
4.1	Die Bilanzierung von Prozessparametern . . . . .	177
4.1.1	Nährstoffgehalte der Gärsubstrate . . . . .	177
4.1.2	Der Nährstoffbedarf der anaeroben Biozönose . . . . .	186
4.1.3	Abschätzung des Gärrest-Düngewertes . . . . .	194
4.1.4	Stickstoff und Schwefel im anaeroben Prozess . . . . .	198
4.1.4.1	Stickstoff im anaeroben Prozess . . . . .	199
4.1.4.1.1	Analytischer Nachweis . . . . .	199
4.1.4.1.2	Alkalinität und pH-Wert im Gärmedium in Abhängigkeit der Ammoniumkonzentration . . . . .	200
4.1.4.1.3	Ammoniaktoxizität . . . . .	213
4.1.4.1.4	Stickstoffkomponenten im Gärrest . . . . .	216
4.1.4.1.5	Die Qualität des emittierten Biogases unter Berücksichtigung der chemischen und physikalischen Einflüsse des anorganischen Anteils am Substratstickstoff auf die Fixierung von Kohlenstoffdioxid im Gärmedium . . . . .	221
4.1.4.2	Einfluss des Substratschwefels auf den Gärprozess und die Nutzung des Biogases . . . . .	225
4.1.4.2.1	Die Schwefelwasserstofftoxizität . . . . .	225
4.1.4.2.2	Wirkungen auf das bakterielle Mikrohabitat und auf die Biogasqualität. . . . .	228
4.1.5	Stoffwechselbedingter biochemischer Wasserverbrauch . . . . .	233
4.1.6	Biomasseertragswerte in Abhängigkeit der substrat- und prozessspezifisch angepassten bakteriellen Zusammensetzung der anaeroben Biozönose. . . . .	238

4.1.6.1	Methodik zur Bilanzierung der Biomasseertragswerte sowie Problemdiskussion . . . . .	238
4.1.6.2	Modellierungsansätze zum anaeroben Katabolismus und Anabolismus. . . . .	241
4.1.6.3	Näherungen zur Abschätzung des Biomassebildungspotenzials auf Basis der Energiegehalte der Gärsubstrate . . . . .	264
4.1.7	Energiegehalte des Substrats und Selbsterwärmungspotenzial aus dem Stoffwechsel der anaeroben Biozönose . . . . .	273
4.1.7.1	Grundlagen des Energiestoffwechsels . . . . .	273
4.1.7.2	Abschätzung der bio-energetischen Wärmetönung aus Parametern der chemischen Thermodynamik. . . . .	278
4.1.7.3	Die Auswirkung der biogenen Eigenerwärmung auf die Fermenterheizung . . . . .	289
4.2	Massen- und Wärmebilanz unter Berücksichtigung der stoffwechsel- und physikalisch bedingten Masseverluste über die Gasphase . . . . .	293
<b>5</b>	<b>Hydraulische Verweilzeit sowie organische Raum- und Schlammbelastung . . . . .</b>	<b>297</b>
<b>6</b>	<b>Prozessstörungen und Synergien . . . . .</b>	<b>305</b>
6.1	Prozessstörungen (Hemmungen und Toxizität) . . . . .	305
6.1.1	Wichtige Hemmtypen in der Biochemie . . . . .	306
6.1.2	Beispiele für die Substratabhängigkeit des Bakterienwachstums und Substratumsatzes. . . . .	311
6.1.3	Einfluss der Hemmung auf die Substratauslaufkonzentration bei stationärem kontinuierlichem Betrieb . . . . .	315
6.1.4	Hemmungen und Toxizität im Anlagenbetrieb . . . . .	316
6.2	Synergien durch Co-Vergärung . . . . .	320
<b>7</b>	<b>Verzeichnisse und Register. . . . .</b>	<b>325</b>
7.1	Tabellierte Substratparameter . . . . .	325
7.2	Biogasbildungspotenzial der nach Branchen sortierten Gärsubstrate in Übersichtsgrafiken. . . . .	424
	<b>Literatur. . . . .</b>	<b>431</b>
	<b>Stichwortverzeichnis. . . . .</b>	<b>453</b>