
Inhaltsverzeichnis

1	Daten für die Praxisanwendung – Erfassung, Bewertung, Einflussgrößen	1
1.1	Fehler und Unschärfen bei der verfahrenstechnischen Bearbeitung von Vergärungsprojekten	1
1.2	Messwerte in Forschung und Anlagenbetrieb	42
1.2.1	Verwendung von Anlagenmesswerten	42
1.2.2	Probenahme, Probenlagerung und –vorbehandlung	43
1.2.3	Zuverlässigkeit und Verallgemeinerungsfähigkeit von Labordaten und Online-Messungen für die praktische Anwendung	45
1.2.4	Verwendung von Literaturdaten	52
1.2.4.1	Unspezifische Datenquellen	53
1.2.4.2	Veröffentlichungen zu Labor- und Pilotversuchen sowie Betriebsmessungen	72
1.2.4.3	Theoretisch modellierte Prozess- und Substratparameter	78
1.2.5	Wesentliche Parameter in Biogasanlagen	81
1.2.5.1	Tabellen zu Erfassung/Bestimmungsmethodik, Bewertung, Einflussgrößen	81
1.2.5.2	Hinweise zur Anlagensicherheit	88
1.2.5.3	Zuordnungsmatrix der Nutzer von Messwerterfassung und Laboranalytik	96
1.2.6	Verfügbare Systeme für Gärversuche	96
1.2.6.1	Diskontinuierliche Gärteste	98
1.2.6.2	Kontinuierliche Gärteste	109
1.2.7	Thesen zur biologischen Diversität anaerober Prozesse und deren Auswirkung auf den Anlagenbetrieb	116
1.3	Aufheizung und Abkühlung von Reaktorinhalten unter verschiedenen Betriebsbedingungen	119
1.3.1	Thermodynamik des Wärmehaushalts anaerober Reaktoren	119

1.3.2	Die stoffliche Prozessbilanz als Basis für die Wärmebilanz um den Gärreaktor.	124
1.3.3	Aufheizen des Reaktorinhaltes bei Inbetriebnahme einer neuen Anlage bzw. bei Reaktorreaktivierung aus einer Ruhephase	127
1.3.4	Die Einflüsse unterschiedlicher Betriebszustände auf den zeitlichen Verlauf der Reaktorauskühlung.	134
1.3.5	Geregelte Änderungen der Prozesstemperatur zwischen mesophilem und thermophilem Reaktorbetrieb	138
1.3.6	Die benötigte Prozesswärmeleistung in Betriebsanlagen als Anteile der kalorischen Leistung des erzeugten Biomethans bzw. der Motorkühlwärmeleistung bei BHKW-Einsatz in der Vergärungsanlage.	145
2	Hinweise zu Bemessung, Bilanzierung und Gestaltung prozessrelevanter Hauptausrüstungen	151
2.1	Medienströme für die Bemessung	152
2.1.1	Stoffstrombilanzen.	152
2.1.2	Bilanzierung der Gärsubstratverdünnung mit Gärrestkonzentrationen oder Wasser aus externen Quellen	162
2.1.3	Definition der Medienströme als Voraussetzung für Material- und Ausrüstungsauswahl und Erfassung der Hauptausrüstungen und Energieverbräuche für die Angebotserstellung	178
2.2	Hauptausrüstungen von biotechnologischen Abfallbehandlungsanlagen.	198
2.2.1	Annahme, Lagerung, Entpackung.	198
2.2.2	Sortier- und Zerkleinerungsaggregate	200
2.2.2.1	Mühlen und Mazeratoren.	201
2.2.2.2	Sieben, Klassieren	204
2.2.2.3	Separierung metallischer Fremdstoffe	209
2.2.2.4	Sensorgestützte Einzelpartikelsortierung.	210
2.2.3	Thermische Substratkonditionierung.	211
2.2.3.1	Autoklavieren als thermische Vorbehandlung des Rohabfalls	211
2.2.3.2	Totalaufschluss von Abfällen mit dem Verfahren der Thermodruckhydrolyse (TDH)	215
2.2.3.3	„Steam explosion“ als Faser- und Zellaufschlussverfahren	218
2.2.3.4	Extrudieren mit Selbsterhitzung durch Reibungswärme	219

2.2.4	Fördertechnik.	220
2.2.4.1	Schüttgutförderung.	220
2.2.4.2	Flüssigkeits- und Suspensionsförderung	221
2.2.4.3	Gasförderung	227
2.2.5	Rühr- und Mischtechnik	230
2.2.5.1	Mechanische Rührer.	230
2.2.5.2	Pumpen- und Strahlmischer.	231
2.2.5.3	Mischen durch Gaseinpressen	234
2.2.6	Wärmeübertragung	236
2.2.6.1	Prozessrelevante Wärmebilanzen.	236
2.2.6.2	Wärmeübertragerbauformen	238
2.2.6.3	Technologische Varianten der Reaktorheizung	240
2.2.6.4	Einbau- und Betriebsbedingungen.	242
2.2.6.5	Sterilisation	242
2.2.7	Fest-Flüssig-Trennung.	243
2.2.7.1	Zielstellungen und Bilanzierung	243
2.2.7.2	Technologien und Ausrüstungen	248
2.2.8	Biogas und Abluft	252
2.2.9	Rohrleitungen und Armaturen.	256
2.2.10	Prozess- und maschinentechnische Bauanforderungen.	258
2.2.10.1	Bautechnologische Erfordernisse.	259
2.2.10.2	Chemisch-physikalische Bedingungen	261
2.3	Verfahren und Technologien der Abfallbehandlung	266
2.3.1	Aerobe Alternativen der Abfall- und Abwasserbehandlung und bei ihrer Anwendung bestehende Probleme	266
2.3.1.1	Aerobe Behandlung von Abwässern und pumpfähigen organischen Schlämmen niedriger Trockenmassekonzentration.	270
2.3.1.2	Aerobe Stabilisierung schüttbarer organischer Feststoffe mittels Kompostierung	291
2.3.2	Verfahrens- und Technologievarianten der Vergärung.	306
2.3.3	Konventionelle Reaktoren der Nassvergärungstechnologie	310
2.3.4	Trockenvergärungsreaktoren	343
2.3.5	Intensivvergärungstechnologien und wesentliche Reaktorvarianten	350
2.4	Biogasaufbereitung und Biogasverwertung.	387
2.4.1	Biogasspeicherung und (Notfall-/Überschuss)–verwertung	388
2.4.1.1	Gasspeicher	389
2.4.1.2	Fackelsysteme zur Gasüberschussentsorgung und als Havarie-Notfackel.	394
2.4.1.3	Sonstige gasnetzrelevante Ausrüstungen für Wasserabscheidung und Grobreinigung.	400

2.4.2	Aufbereitung des Biogases zu Biomethan mit erdgasäquivalenter Qualität	403
2.4.2.1	Absorptions- und Adsorptionsverfahren	405
2.4.2.2	Druckwechseladsorption	409
2.4.2.3	Membrantrennverfahren	410
2.4.2.4	Kryogene Gasgemischtrennung	412
2.4.3	Energetische Verwertung des Methans aus Biogasen	415
2.4.3.1	Verbrennung im Biogaskessel	416
2.4.3.2	Verbrennung im Gasmotor eines BHKW	420
2.4.3.3	Kältemaschinen zur Abwärmenutzung	427
2.4.4	Nutzung des Biomethans	428
2.4.4.1	Einspeisung in das Erdgasnetz	429
2.4.4.2	Direkte Übergabe von Biomethan und Wasserstoff an einer Tankstelle	438
2.4.4.3	Brennstoffzellen und Gaswärmepumpen	442
3	Zusammenhänge von Stoffstrommanagement, Substratvorbehandlung und Gärrestaufbereitung bezüglich Verfahrenseffizienz und Produktqualitäten	445
3.1	Zusammenfassung des Stoffstrommanagements von der Vergärungsanlage in die Umwelt	445
3.2	Substratvorbehandlung	454
3.2.1	Zielstellungen, Technologien und Risikofaktoren	454
3.2.2	Einfluss von Substratkonditionierung und -aufschluss auf die Prozessbilanz	462
3.3	Gärreste – Zusammensetzung, Aufbereitung und Verwertung	471
3.3.1	Der Einfluss von Gärsubstrat und Gärprozess auf die analytisch bestimmbare stoffliche Qualität des Fermenterablaufs	472
3.3.2	Mechanische Trennung des Fermentergärrestes in Flüssigfraktion und Feststoffkuchen als bevorzugte Vorstufe für weitere Aufbereitungsmaßnahmen für die Gärrestverwertung	473
3.3.3	Weitere Verfahren der Gärresttrennung in Feststoff- und Flüssigfraktion	482
3.3.4	Einfluss von Gärrestaufbereitungsmaßnahmen auf die Prozessbilanz	510
3.3.5	Analytische Bewertung von Gärresten vor und nach der mechanischen Trennung in Feststoff- und Prozesswasserfraktionen	534

3.4	Modellierung der Nährstoffbilanzen als Voraussetzung für die Beurteilung von Verwertungs-/Entsorgungsmöglichkeiten der Gärrestfraktionen in Abhängigkeit von ihrer stofflichen Qualität bei Einhaltung der bestehenden gesetzlichen Vorschriften	558
4	Strategien und Maßnahmen zur Prozessoptimierung sowie Anlagenertüchtigung	569
4.1	Die Bedeutung von Prozesshilfsstoffen für Betriebsstabilität und Anlagenoptimierung	569
4.1.1	Erkannte Zielbereiche für den Einsatz	569
4.1.2	Analyse der Problemgruppen für den Anlagenbetrieb	571
4.1.3	Maßnahmen zur verfahrenstechnisch-biochemischen Ertüchtigung des Anlagenbetriebes durch Einsatz marktüblicher Prozesshilfsstoffe	578
4.1.3.1	Durch Hilfsmiteileinsatz erreichbare Prozessbeeinflussungen als Bewertungsbasis für die zu erwartenden Wirkungen angebotener Produkte	579
4.1.3.2	Die Schlüsselrolle der Spurenelemente für die Entwicklung der anaeroben Biozönose	604
4.2	Maßnahmen der Betriebsüberwachung	633
4.2.1	Aufwand und Nutzen	633
4.2.2	Schwefelwasserstoff als Beispiel einer Leitkomponente für Modellierung, Bilanzierung und Überwachung	637
4.2.2.1	Die Abschätzung der Schwefelwasserstoffkonzentration als Bestandteil der Bilanzierung des Biogasertrages bei anaeroben Prozessen	637
4.2.2.2	Parameter für die Schwefelwasserstoffkonzentration im Biogas	642
5	Zukunftsoptionen für Biogasanlagen als Teil von Energiesystem- und Bioraffineriekonzepten in der Praxis	647
5.1	Integration in industrielle und biotechnologische Prozesse	647
5.2	Dynamische Prozessführung zur bedarfsgerechten Energiebereitstellung	650
5.3	Anaerobe Wasserstoffgewinnung aus organischen Gärsubstraten	656
5.4	Wasserstoffgewinnung aus Biogas	657
5.5	Methangewinnung aus Biogas-CO ₂ durch biologische Methanisierung	661
5.6	Weitergehende Nutzung von CO ₂ aus Biogas	668

6 Verzeichnisse und Register	671
Literatur	733
Stichwortverzeichnis	781