

Inhaltsverzeichnis

1	<u>MIKROBIOLOGISCHE GRUNDLAGEN</u>	1
1.1	Allgemeine Grundkenntnisse	2
1.1.1	Unterteilung der Mikroorganismen	3
1.1.1.1	Die prokaryotische Zelle (Procyte)	4
1.1.1.2	Die eukaryotische Zelle (Eucyte)	5
1.1.2	Nährstoffe und enzymatische Steuerung des mikrobiellen Stoffwechsels	8
1.1.3	Enzymatische Steuerung des mikrobiellen Stoffwechsels	12
1.1.4	Physiologie des Wachstums	23
1.1.4.1	Bakterienwachstum in einer statischen Kultur	25
1.1.4.2	Bakterienwachstum in einer kontinuierlichen Kultur	27
1.1.4.3	Bakterienwachstum in einer kontinuierlichen Kultur mit Biomassenanreicherung	31
1.2	Anaerobe Mikroorganismen	40
1.2.1	Systematische Stellung und Charakterisierung der am Faulprozeß beteiligten Mikroorganismen	40
1.3	Stoffwechselprozesse des anaeroben Abbaus	46
1.3.1	Abfolge des anaeroben Stoffumsatzes bis zum Biogas (CH_4/CO_2)	46
1.3.1.1	Stoffwechselschritte der hydrolisierenden und versäuernden Bakterien	48
1.3.1.2	Stoffwechselschritte der acetogenen und methanogenen Bakterien	51
1.3.2	Vergleich der aeroben und anaeroben Stoffwechselprozesse	55
	Literaturverzeichnis	59

2	<u>EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ANAEROBEN BIOLOGISCHEN ABBAUVORGÄNGE</u>	62
2.1	Einfluß der Temperatur	62
2.2	Einfluß des pH-Wertes	65
2.3	Einfluß der Durchmischung	68
2.4	Einfluß der Substratzusammensetzung	70
2.4.1	Feststoffgehalt	73
2.4.2	Verhältnis von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor	75
2.4.3	Einfluß hemmender und toxischer Stoffe	77
2.4.3.1	Sauerstoff	78
2.4.3.2	Schwefelverbindung	79
2.4.3.3	organische Säuren	84
2.4.3.4	Nitrat- und Amoniumstickstoff	87
2.4.3.5	Schwermetalle	89
2.4.3.6	Sonstige Hemmstoffe	91
2.5	Spurenelemente	92
	Literaturverzeichnis	93
3	<u>ÜBERSICHT ÜBER ANAEROBE VERFAHRENS- TECHNIKEN</u>	96
3.1	Reaktortypen	96
3.1.1	Historische Entwicklung der Anaerob-Reaktoren	96
3.1.2	Übersicht der modernen Reaktortypen	102
3.2	Reaktordurchmischung	110
3.3	Feststoffabscheidung	113

3.3.1	Definitionen und Übersicht	113
3.3.2	Externe Systeme	117
3.3.2.1	Unterstützungsmaßnahmen	118
3.3.2.2	Systeme zur Abscheidung	119
3.3.3	Interne Systeme	120
3.3.3.1	Abtrennung durch Sedimentation	120
3.3.3.2	Immobilisierung auf Trägermaterialien	122
3.3.4	Vor- und Nachteile externer und interner Systeme	126
	Literaturverzeichnis	132
4	<u>VERFAHRENSTECHNIKEN ZUR BEHANDLUNG VON KLÄRSCHLÄMMEN</u>	135
4.1	Verfahrenstechniken ohne Biomassenanreicherung	140
4.1.1	Volldurchmischer Faulbehälter	140
4.1.2	Volldurchmischer Faulbehälter im Kaskadenbetrieb anaerob-anaerob	143
4.1.3	Zweistufige Verfahren	146
4.2	Verfahrenstechniken mit Biomassenanreicherung	149
4.2.1	Einstufige Verfahren mit internem Biomasserückhalt durch Aufwuchsflächen (Festbettreaktor/Fixed Film Reactor)	152
4.2.2	Zweistufige Verfahren mit internem Biomasserückhalt durch Aufwuchsflächen (Festbettreaktor/Fixed Film Reactor)	157
4.2.3	Einstufige Verfahren mit externem Biomasserückhalt (Anaerobes Belebungsverfahren/Anaerobic Contact Process)	159
4.2.4	Zweistufige Verfahren mit externem Biomasserückhalt (Zweistufiges anaerobes Belebungsverfahren)	166

4.3	Weitere Behandlungsverfahren	168
4.3.1	Thermische Vorbehandlung	168
4.3.1.1	Verfahrenstechnische Grundlagen	168
4.3.1.2	Auswirkungen einer Vorerhitzung auf den Gasertrag	170
4.3.1.3	Auswirkungen einer Vorerhitzung auf die Feststoffreduktion	176
4.3.1.4	Einfluß der Faulraumtemperatur	178
4.3.1.5	Einfluß der Vorstabilisierung	178
4.3.1.6	Einfluß der Vorbehandlung auf die Entwässerbarkeit	179
4.3.1.7	Einfluß der thermischen Vorbehandlung auf die Energiebilanz einer Kläranlage	179
4.3.2	Aerob-thermophile Klärschlammstabilisierung	181
4.3.3	Kombinationen aus aeroben und anaeroben Verfahren	186
4.3.3.1	Aerob-Anaerob-Verfahren	186
4.3.3.2	Anaerob-Aerob-Verfahren	190
4.4	Verfahrenstechniken zur Feststoffabtrennung	192
4.4.1	Eindicker	193
4.4.2	Absetzbecken	200
4.4.3	Flotation	203
4.4.4	Maßnahmen zur Verbesserung der Absetzeigenschaften von Klärschlämmen	204
4.4.4.1	Rührwerke	205
4.4.4.2	Kühlung	206
4.4.4.3	Zugabe von inerten Trägermaterialien	210
4.5	Entseuchung von Klärschlamm	211
4.5.1	Mechanismen für eine Entseuchung von Klärschlämmen	214
4.5.2	Verfahren zur Entseuchung von Klärschlämmen	216
	Literaturverzeichnis	220

5	<u>BEHANDLUNG VON SCHLÄMMEN</u>	227
5.1	Menge, Zusammensetzung und Beschaffenheit kommunaler Klärschlämme	227
5.1.1	Rohschlamm	232
5.1.1.1	Primärschlamm	232
5.1.1.2	Sekundärschlamm	233
5.1.1.3	Tertiärschlamm	234
5.1.2	Faulschlamm	234
5.2	Schlamminhaltsstoffe	236
5.3	Stabilisierungskriterien	247
5.4	Behandlung kommunaler Schlämme	252
5.4.1	Einstufige anaerobe Schlammstabilisierung	253
5.4.1.1	Reaktordurchmischung	255
5.4.1.2	Reaktorheizung	259
5.4.1.3	Reaktorbeschickung	262
5.4.1.4	Einfahrphase	264
5.4.1.5	Reaktorbemessung	268
5.4.1.6	Faulgasanfall	288
5.4.1.7	Faulbehälterbetrieb mit hohem Feststoffgehalt	291
5.4.1.8	Zusammenfassung	293
5.4.2	Faulbehälter im Kaskadenbetrieb (anaerob-anaerob)	294
5.4.3	Zweistufige Verfahren	295
5.4.4	Weitere Behandlungsverfahren	300
5.4.4.1	Aerob thermophile Klärschlammstabilisierung	300
5.4.4.2	Kombination aus aeroben und anaeroben Verfahrenstechniken	312
5.4.4.3	Kombination aus anaeroben und aeroben Verfahrenstechniken	321
	Literaturverzeichnis	328

6	<u>VERFAHRENSTECHNIKEN ZUR BEHANDLUNG VON ABWÄSSERN</u>	335
6.1	Übersicht	335
6.1.1	Einstufige Verfahren	339
6.1.2	Zweistufige Verfahren	340
6.1.3	Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile ein- und zweistufiger Anlagen	341
6.2	Verfahrenstechniken ohne Biomassenanreicherung	343
6.3	Verfahren mit externer Biomassenanreicherung	344
6.3.1	Anaerobes Belebungsverfahren	344
6.3.1.1	Reaktor	346
6.3.1.2	Reaktordurchmischung, Betriebsweise und Bemessung	347
6.3.1.3	Feststoffaustrag aus den Reaktoren	354
6.3.1.4	Unterstützende Maßnahmen zum externen Biomassen- rückhalt	355
6.3.1.5	Verfahrenstechniken zum externen Biomassenrückhalt	365
6.3.1.6	Einarbeitung / Einfahrbetrieb	379
6.3.1.7	Leistungsdaten bestehender Anlagen	380
6.3.1.8	Sonderbauformen	380
6.4	Verfahren mit interner Biomassenanreicherung	384
6.4.1	Schlammbedreaktoren	384
6.4.1.1	Pellet-Granules-Bildung	386
6.4.1.2	Einarbeitung / Einfahrbetrieb	388
6.4.1.3	Reaktorkonstruktion und Bemessungsdaten	392
6.4.1.4	Feststoffaustrag aus Schlammbedreaktoren	396
6.4.1.5	Leistungsdaten bestehender Anlagen	398
6.4.1.6	Sonderbauformen	398
6.4.2	Festbettreaktoren	401
6.4.2.1	Festbettmaterialien	403
6.4.2.2	Aufwuchsmechanismen, Diffusion und Durchströmung	404
6.4.2.3	Filmdicke und Feststoffaustrag	407
6.4.2.4	Reaktordurchmischung, Betriebsweise und Bemessung	409
6.4.2.5	Einarbeitung / Einfahrbetrieb	411

6.4.2.6	Leistungsdaten großtechnischer Festbettreaktoren	412
6.4.2.7	Vor- und Nachteile von Festbettreaktoren	413
6.4.2.8	Sonderbauformen	414
6.4.3	Wirbelbett- und Schwebebettreaktoren	421
6.4.3.1	Wirbelbettreaktoren	423
6.4.3.2	Schwebebettreaktor (AAFEb-Reaktor)	434
6.5.	Zusammenfassung	436
	Literaturverzeichnis	444
7	<u>BEHANDLUNG VON ABWÄSSERN</u>	467
7.1	Abwässer aus der Lebensmittelindustrie	467
7.1.1	Milchverarbeitungsbetriebe	467
7.1.1.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	468
7.1.1.2	Behandlungsverfahren	469
7.1.2	Fruchtsaftindustrie	474
7.1.2.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	475
7.1.2.2	Behandlungsverfahren	477
7.1.3	Mineralbrunnen- und Erfrischungsgetränkeindustrie	479
7.1.3.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	479
7.1.3.2	Behandlungsverfahren	481
7.1.4	Brauereibetriebe	483
7.1.4.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	483
7.1.4.2	Behandlungsverfahren	486
7.1.5	Margarine-, Speisefett- und Ölfabriken	490
7.1.5.1	Anfall und Zusammensetzung von Abwasser aus Speisefettraffinerien und Speiseölfabrikationen	491
7.1.5.2	Behandlungsverfahren	494
7.1.6	Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe	500
7.1.6.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	504
7.1.6.2	Behandlungsverfahren	506
7.1.6.3	Abfallanfall und -zusammensetzung	510

7.1.6.4	Behandlungsverfahren von Abfällen	511
7.1.7	Fischfabriken	514
7.1.7.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	514
7.1.7.2	Behandlungsverfahren	516
7.1.8	Obst- und Gemüsekonservenfabriken	519
7.1.8.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	521
7.1.8.2	Behandlungsverfahren	525
7.1.9	Stärkeherstellung	536
7.1.9.1	Weizenstärkefabriken	541
7.1.9.2	Maisstärkefabriken	552
7.1.9.3	Kartoffelstärkeindustrie	556
7.1.10	Kartoffelveredelungsindustrie	562
7.1.10.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	562
7.1.10.2	Behandlungsverfahren	566
7.1.11	Betriebe der Weinbereitung	571
7.1.11.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	572
7.1.11.2	Behandlungsverfahren	574
7.1.12	Pektinfabriken	575
7.1.12.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	576
7.1.12.2	Behandlungsverfahren	576
7.1.13	Zuckerindustrie	580
7.1.13.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	581
7.1.13.2	Behandlungsverfahren	583
7.1.14	Brennereien	594
7.1.14.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	596
7.1.14.2	Behandlungsverfahren	600
7.2	Abwässer aus Tierkörperbeseitigungsanlagen	609
7.2.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	609
7.2.2	Behandlungsverfahren	611
7.3.	Abwässer der Holzverarbeitungs-, Zellstoff-, Papier- und Pappefabriken	616
7.3.1	Zellstofffabriken	616

7.3.1.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	617
7.3.1.2	Behandlungsverfahren	620
7.3.2	Papier-, Karton- und Pappefabriken	626
7.3.2.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	627
7.3.2.2	Behandlungsverfahren	630
7.3.3	Holzfaserverleimungsindustrie	640
7.3.3.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	640
7.3.3.2	Behandlungsverfahren	642
7.4	Sonstige gewerbliche und industrielle Abwässer	647
7.4.1	Pharmazeutische Industrie	647
7.4.1.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	648
7.4.1.2	Behandlungsverfahren	650
7.4.2	Abwässer aus Wollwäschereien und Wollkammereien	657
7.4.2.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	657
7.4.2.2	Behandlungsverfahren	659
7.4.3	Lederherstellende Betriebe	665
7.4.3.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	665
7.4.3.2	Behandlungsverfahren	667
7.5.	Deponiesickerwasser	670
7.5.1	Sickerwasseranfall und -zusammensetzung	671
7.5.2	Anaerobe Sickerwasserbehandlung	674
7.5.2.1	Externe Sickerwasserbehandlung	674
7.5.2.2	Sickerwasserkreislaufführung	677
7.5.2.3	Vorbehandlung im integrierten anaeroben System	681
7.5.3	Schlußfolgerungen	681
7.6	Landwirtschaftliche Abfälle	682
7.6.1	Abfallanfall und -zusammensetzung	683
7.6.2	Behandlungsverfahren	686
	Literaturverzeichnis	696

8	<u>EINRICHTUNGEN ZUR ENERGIE NUTZUNG</u>	729
8.1	Menge und Zusammensetzung des Klärgases	729
8.2	Speicherung des Klärgases	730
8.2.1	Bemessung von Gasspeichern	731
8.2.2	Bauweisen der Gasbehälter	732
8.3	Einrichtungen zur Klärgasnutzung	734
8.3.1	Faulbehälterheizung	734
8.3.1.1	Wärmebedarf (siehe auch Kap. 5.4.1.2)	734
8.3.1.2	Heizungssysteme (siehe auch Kap. 5.4.1.2)	736
8.3.2	Klärgas-Krafterzeugung	736
8.3.2.1	Strombedarf von Kläranlagen	737
8.3.2.2	Art und Einsatz von Gasmaschinen	738
8.3.3	Abwärmeverwertung und Wärmeübertragung	744
8.3.3.1	Wärmetauscher	744
8.3.3.2	Wärmepumpen	745
8.4	Sonstige Einrichtungen	746
8.4.1	Übergabe ins Netz	746
8.4.2	Bauliche Hinweise	746
8.5	Beispielrechnung	748
	Literaturverzeichnis	754
9	<u>SICHERHEITSEINRICHTUNGEN</u>	757
9.1	Meß- und Kontrolleinrichtungen	758
9.2	Explosionsschutz-Maßnahmen und -Einrichtungen	759
	Literaturverzeichnis	760

10	<u>KOSTEN VON ANLAGEN ZUR ANAEROBEN ABWASSER- UND SCHLAMMBEHANDLUNG</u>	761
10.1	Einleitung	761
10.2	Verfahren der Wirtschaftlichkeitsberechnung	761
10.2.1	Auswahl des Berechnungsverfahrens	761
10.2.2	Vorschlagswerte für Berechnungsvariablen bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen in der Abwassertechnik	763
10.2.3	Berechnung mit der Annuitätenmethode	764
10.2.4	Rahmenbedingungen für die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen	766
10.3	Literaturangaben zu Kosten von Anlagen zur anaeroben Abwasser- und Schlammbehandlung	766
10.4	Investitionen für Reaktoren zur anaeroben Abwasser- und Schlammbehandlung	769
10.5	Investitionen für Anlagenteile	775
10.6	Ansätze für die Berechnung von Betriebskosten	778
10.6.1	Personal	778
10.6.2	Elektrische Energie	779
10.6.3	Verbrauchsmaterial	781
10.7	Investitionen und Jahreskosten für komplette Anlagen	782
	Literaturverzeichnis	800
11	<u>VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE</u>	801

12	<u>ZUSAMMENSTELLUNG VON FORSCHUNGSVORHABEN</u>	807
	<u>AUF DEM ANAEROBSEKTOR</u>	

13	<u>SACHWORTVERZEICHNIS</u>	823
-----------	-----------------------------------	------------