

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><u>MIKROBIOLOGISCHE GRUNDLAGEN</u></b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Allgemeine Grundkenntnisse</b>	<b>2</b>
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
<b>1.2</b>	<b>Anaerobe Mikroorganismen</b>	<b>40</b>
1.2.1	Systematische Stellung und Charakterisierung der am Faulprozeß beteiligten Mikroorganismen	40
<b>1.3</b>	<b>Stoffwechselprozesse des anaeroben Abbaus</b>	<b>46</b>
1.3.1	Abfolge des anaeroben Stoffumsatzes bis zum Biogas ( $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ )	46
1.3.1.1	Stoffwechselschritte der hydrolysierenden und ver-säuernden Bakterien	48
1.3.1.2	Stoffwechselschritte der acetogenen und methano-genen Bakterien	51
1.3.2	Vergleich der aeroben und anaeroben Stoffwechselprozesse	55
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>

<b>2</b>	<b><u>EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ANAEROBEN BIOLOGISCHEN ABBAUVORGÄNGE</u></b>	<b>62</b>
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 Ammoniumstickstoff	87
2.4.3.5	Schwermetalle	89
2.4.3.6	Sonstige Hemmstoffe	91
2.5	Spurenelemente	92
	Literaturverzeichnis	93
<b>3</b>	<b><u>ÜBERSICHT ÜBER ANAEROBE VERFAHRENS-TECHNIKEN</u></b>	<b>96</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>132</b>

<b>4</b>	<b><u>VERFAHRENSTECHNIKEN ZUR BEHANDLUNG VON KLÄRSCHLÄMMEN</u></b>	<b>135</b>
<b>4.1</b>	<b>Verfahrenstechniken ohne Biomassenanreicherung</b>	<b>140</b>
4.1.1	Volldurchmischter Faulbehälter	140
4.1.2	Volldurchmischter Faulbehälter im Kaskadenbetrieb anaerob-anaerob	143
4.1.3	Zweistufige Verfahren	146
<b>4.2</b>	<b>Verfahrenstechniken mit Biomassenanreicherung</b>	<b>149</b>
4.2.1	Einstufige Verfahren mit internem Biomasserrückhalt durch Aufwuchsflächen (Festbettreaktor/Fixed Film Reactor)	152
4.2.2	Zweistufige Verfahren mit internem Biomasserrückhalt durch Aufwuchsflächen (Festbettreaktor/Fixed Film Reactor)	157
4.2.3	Einstufige Verfahren mit externem Biomasserrückhalt (Anaerobes Belebungsverfahren/Anaerobic Contact Process)	159
4.2.4	Zweistufige Verfahren mit externem Biomasserrückhalt (Zweistufiges anaerobes Belebungsverfahren)	166

<b>4.3</b>	<b>Weitere Behandlungsverfahren</b>	<b>168</b>
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
<b>4.4</b>	<b>Verfahrenstechniken zur Feststoffabtrennung</b>	<b>192</b>
4.4.1	Eindicker	193
4.4.2	Absetzbecken	200
4.4.3	Flotation	203
4.4.4	Maßnahmen zur Verbesserung der Absetzeigenschaften von Klärschlamm	204
4.4.4.1	Rührwerke	205
4.4.4.2	Kühlung	206
4.4.4.3	Zugabe von inerten Trägermaterialien	210
<b>4.5</b>	<b>Entseuchung von Klärschlamm</b>	<b>211</b>
4.5.1	Mechanismen für eine Entseuchung von Klärschlamm	214
4.5.2	Verfahren zur Entseuchung von Klärschlamm	216
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>220</b>

<b>5</b>	<b><u>BEHANDLUNG VON SCHLÄMMEN</u></b>	<b>227</b>
<b>5.1</b>	<b>Menge, Zusammensetzung und Beschaffenheit kommunaler Klärschlämme</b>	<b>227</b>
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
<b>5.2</b>	<b>Schlammhaltsstoffe</b>	<b>236</b>
<b>5.3</b>	<b>Stabilisierungskriterien</b>	<b>247</b>
<b>5.4</b>	<b>Behandlung kommunaler Schlämme</b>	<b>252</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>328</b>

<b>6</b>	<b><u>VERFAHRENSTECHNIKEN ZUR BEHANDLUNG VON ABWÄSSERN</u></b>	<b>335</b>
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	<b>Verfahrenstechniken ohne Biomassenanreicherung</b>	<b>343</b>
6.3	<b>Verfahren mit externer Biomassenanreicherung</b>	<b>344</b>
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 Biomassenrückhalt	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	<b>Verfahren mit interner Biomassenanreicherung</b>	<b>384</b>
6.4.1	Schlammbettreaktoren	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 Schlammbettreaktoren	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

<b>6.4.2.6</b>	<b>Leistungsdaten großtechnischer Festbettreaktoren</b>	<b>412</b>
<b>6.4.2.7</b>	<b>Vor- und Nachteile von Festbettreaktoren</b>	<b>413</b>
<b>6.4.2.8</b>	<b>Sonderbauformen</b>	<b>414</b>
<b>6.4.3</b>	<b>Wirbelbett- und Schwebebettreaktoren</b>	<b>421</b>
<b>6.4.3.1</b>	<b>Wirbelbettreaktoren</b>	<b>423</b>
<b>6.4.3.2</b>	<b>Schwebebettreaktor (AAFEB-Reaktor)</b>	<b>434</b>
<b>6.5.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>436</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>444</b>

<b>7</b>	<b><u>BEHANDLUNG VON ABWÄSSERN</u></b>	<b>467</b>
<b>7.1</b>	<b>Abwässer aus der Lebensmittelindustrie</b>	<b>467</b>
<b>7.1.1</b>	Milchverarbeitungsbetriebe	467
<b>7.1.1.1</b>	Abwasseranfall und -zusammensetzung	468
<b>7.1.1.2</b>	Behandlungsverfahren	469
<b>7.1.2</b>	Fruchtsaftindustrie	474
<b>7.1.2.1</b>	Abwasseranfall und -zusammensetzung	475
<b>7.1.2.2</b>	Behandlungsverfahren	477
<b>7.1.3</b>	Mineralbrunnen- und Erfrischungsgetränkeindustrie	479
<b>7.1.3.1</b>	Abwasseranfall und -zusammensetzung	479
<b>7.1.3.2</b>	Behandlungsverfahren	481
<b>7.1.4</b>	Brauereibetriebe	483
<b>7.1.4.1</b>	Abwasseranfall und -zusammensetzung	483
<b>7.1.4.2</b>	Behandlungsverfahren	486
<b>7.1.5</b>	Margarine-, Speisefett- und Ölfabriken	490
<b>7.1.5.1</b>	Anfall und Zusammensetzung von Abwasser aus Speisefettfabrinerien und Speiseölfabrikationen	491
<b>7.1.5.2</b>	Behandlungsverfahren	494
<b>7.1.6</b>	Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe	500
<b>7.1.6.1</b>	Abwasseranfall und -zusammensetzung	504
<b>7.1.6.2</b>	Behandlungsverfahren	506
<b>7.1.6.3</b>	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
<b>7.2</b>	<b>Abwässer aus Tierkörperbeseitigungsanlagen</b>	<b>609</b>
7.2.1	Abwasseranfall und -zusammensetzung	609
7.2.2	Behandlungsverfahren	611
<b>7.3.</b>	<b>Abwässer der Holzverarbeitungs-, Zellstoff-, Papier- und Pappefabriken</b>	<b>616</b>
7.3.1	Zellstofffabriken	616

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

<b>8</b>	<b><u>EINRICHTUNGEN ZUR ENERGIENUTZUNG</u></b>	<b>729</b>
<b>8.1</b>	<b>Menge und Zusammensetzung des Klärgases</b>	<b>729</b>
<b>8.2</b>	<b>Speicherung des Klärgases</b>	<b>730</b>
8.2.1	Bemessung von Gasspeichern	731
8.2.2	Bauweisen der Gasbehälter	732
<b>8.3</b>	<b>Einrichtungen zur Klärgasnutzung</b>	<b>734</b>
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
<b>8.4</b>	<b>Sonstige Einrichtungen</b>	<b>746</b>
8.4.1	Übergabe ins Netz	746
8.4.2	Bauliche Hinweise	746
<b>8.5</b>	<b>Beispielrechnung</b>	<b>748</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>754</b>
<b>9</b>	<b><u>SICHERHEITSEINRICHTUNGEN</u></b>	<b>757</b>
<b>9.1</b>	<b>Meß- und Kontrolleinrichtungen</b>	<b>758</b>
<b>9.2</b>	<b>Explosionsschutz-Maßnahmen und -Einrichtungen</b>	<b>759</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>760</b>

<b>10</b>	<b>KOSTEN VON ANLAGEN ZUR ANAEROBEN ABWASSER- UND SCHLAMMBEHANDLUNG</b>	<b>761</b>
<b>10.1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>761</b>
<b>10.2</b>	<b>Verfahren der Wirtschaftlichkeitsberechnung</b>	<b>761</b>
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
<b>10.3</b>	<b>Literaturangaben zu Kosten von Anlagen zur anaeroben Abwasser- und Schlammbehandlung</b>	<b>766</b>
<b>10.4</b>	<b>Investitionen für Reaktoren zur anaeroben Abwasser- und Schlammbehandlung</b>	<b>769</b>
<b>10.5</b>	<b>Investitionen für Anlagenteile</b>	<b>775</b>
<b>10.6</b>	<b>Ansätze für die Berechnung von Betriebskosten</b>	<b>778</b>
10.6.1	Personal	778
10.6.2	Elektrische Energie	779
10.6.3	Verbrauchsmaterial	781
<b>10.7</b>	<b>Investitionen und Jahreskosten für komplett Anlagen</b>	<b>782</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>800</b>
<b>11</b>	<b>VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE</b>	<b>801</b>

**12**

**ZUSAMMENSTELLUNG VON FORSCHUNGSVORHABEN  
AUF DEM ANAEROBSEKTOR**

**807**

**13**

**SACHWORTVERZEICHNIS**

**823**