

# **Stoffströme der Co-Vergärung in der Abwasserwirtschaft**

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akadem. Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Wirtsch.-Ing. Carola Zeig**  
aus Bensheim

Darmstadt, September 2013

D17

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>IX</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHER HINTERGRUND UND STAND DER FORSCHUNG</b> .....	<b>3</b>
2.1 ANAEROBE ABBAUPROZESSE.....	3
2.1.1 Mikrobiologische Grundlagen .....	4
2.1.2 Einflussfaktoren auf anaerobe Abbauprozesse .....	5
2.1.2.1 Temperatur.....	6
2.1.2.2 Faulzeit .....	7
2.1.2.3 Substratzusammensetzung .....	7
2.1.2.4 pH-Wert.....	8
2.1.2.5 Hemmstoffe .....	9
2.1.3 Parameter zur Definition des anaeroben Abbaus .....	11
2.2 KLÄRSCHLAMMFAULUNG .....	17
2.2.1 Betriebseinstellungen von Faulbehältern .....	17
2.2.2 Bemessung von Faulbehältern .....	18
2.2.3 Beurteilung von Faulungsprozessen .....	21
2.2.4 Bilanzierung von Faulungsprozessen.....	23
2.2.4.1 Maximal realisierbare Biogasausbeute nach Buswell.....	23
2.2.4.2 Kohlenstoffbilanzierung .....	26
2.2.5 Auswirkungen der Klärschlammfäulung .....	30
2.2.5.1 Gasbehandlung .....	30
2.2.5.2 Entwässerung.....	31
2.2.5.3 Rückbelastung .....	33
2.3 KOMBINIERTE BEHANDLUNG VON KLÄRSCHLAMM UND CO-SUBSTRATEN .....	34
2.3.1 Freie Faulraumkapazitäten .....	36
2.3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	37
2.3.3 Anforderungen im Rahmen der Co-Vergärung.....	38
2.3.3.1 Anforderungen an die Eigenschaften von Co-Substraten .....	39
2.3.3.2 Hygieneanforderungen .....	40
2.3.3.3 Technische Anforderungen an die Substratvorbehandlung .....	41
2.3.4 Definition und Charakterisierung von Substraten .....	42
<b>3 ZIELSETZUNG</b> .....	<b>47</b>

<b>4 MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>49</b>
4.1 HERKUNFT UND CHARAKTERISIERUNG DER VERWENDETEN SUBSTRATE .....	49
4.2 VERSUCHE IM HALBTECHNISCHEN MAßSTAB .....	52
4.2.1 Aufbau und Betrieb der halbtechnischen Versuchsanlage .....	52
4.2.2 Versuchsprogramm - halbtechnischer Maßstab .....	54
4.2.3 Analyseprogramm und Datenauswertung – halbtechnischer Maßstab .....	57
4.2.3.1 Analysemethoden.....	58
4.2.3.2 Auswertung der Mess- und Analysedaten .....	61
4.2.4 Untersuchungen zur CSB-Bestimmungsmethode .....	61
4.3 LABORVERSUCHE .....	62
4.3.1 Aufbau und Betrieb der Laborversuche .....	63
4.3.2 Versuchsprogramm - labortechnischer Maßstab .....	64
4.3.3 Analyseprogramm - labortechnischer Maßstab.....	67
<b>5 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>69</b>
5.1 BESTIMMUNG DES CHEMISCHEN SAUERSTOFFBEDARFS.....	69
5.2 BEMESSUNGS- UND BETRIEBSPARAMETER .....	73
5.2.1 Charakterisierung der organischen Zusammensetzung der Substrate.....	73
5.2.2 Theoretische Beurteilung der Substratzusammensetzung .....	77
5.2.3 Stabilität der untersuchten Faulungsprozesse .....	81
5.2.3.1 Stabilität der Laborversuche .....	81
5.2.3.2 Stabilität der halbtechnischen Versuchsphasen .....	84
5.2.4 Zwischenfazit .....	91
5.3 OPTIMIERUNG VON CO-VERGÄRUNGSPROZESSEN.....	94
5.3.1 Substrat- und Temperatureinflüsse auf den Abbaugrad .....	94
5.3.1.1 Abbaugrad.....	94
5.3.1.2 Raumumsatzleistung .....	97
5.3.1.3 Korrelation des Abbaugrads .....	99
5.3.2 Substrat- und Temperatureinflüsse auf die Gas- und Methanausbeute .....	102
5.3.2.1 Spezifische Gasausbeute .....	102
5.3.2.2 Methananteil im Faulgas.....	108
5.3.2.3 Spezifische Methanausbeute .....	110
5.3.2.4 Korrelation der spezifischen Gas- und Methanausbeute.....	113
5.3.3 Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb.....	117
5.3.3.1 Gasbehandlung.....	117
5.3.3.2 Entwässerung .....	121
5.3.3.3 Rückbelastung.....	123

<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN.....</b>	<b>127</b>
6.1	BEMESSUNGSANSATZ DER CO-VERGÄRUNG .....	127
6.2	PLANUNGS- UND OPTIMIERUNGSPROZESS DER CO-VERGÄRUNG.....	130
6.2.1	Ausgangssituation .....	130
6.2.2	Substratcharakterisierung.....	131
6.2.3	Stoffstrombemessung.....	132
6.2.4	Stoffstromauswirkungen .....	135
6.2.5	Wirtschaftliche Bewertung .....	137
6.3	WEITERER FORSCHUNGSBEDARF UND AUSBLICK .....	139
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>141</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>145</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>157</b>
9.1	MODELLE ZUR BESCHREIBUNG VON BIOGASBILDUNGSPROZESSEN.....	158
9.2	EINZELAUFSTELLUNG AUSGEWÄHLTER ENERGIETRÄGER.....	159
9.3	AUFSTELLUNG GÄNGIGER CO-SUBSTRATE.....	160
9.4	ANALYSENPLAN DER HALBTECHNISCHEN UNTERSUCHUNGEN .....	162
9.5	ORGANISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER IN DEN HALBTECHNISCHEN VERSUCHSPHASEN VERWENDETEN SUBSTRATE UND SUBSTRATMISCHUNGEN.....	163
9.6	VERHÄLTNISSE AUS OTR, CSB UND TOC DER VERSUCHSREIHEN.....	165
9.7	ANSÄTZE DER LABORVERSUCHSREIHEN.....	166
9.8	STABILITÄTSNACHWEIS DER HALBTECHNISCHEN VERSUCHSPHASEN.....	168
9.9	RAUMBELASTUNG DER STABILEN HALBTECHNISCHEN VERSUCHSPHASEN.....	170
9.10	ABBAUGRADE DER HALBTECHNISCHEN VERSUCHSPHASEN.....	171
9.11	ABBAUGRADE DER LABORTECHNISCHEN VERSUCHSREIHEN .....	172
9.12	RAUMUMSATZLEISTUNG DER HALBTECHNISCHEN VERSUCHSPHASEN .....	173
9.13	SPEZIFISCHE GASAUSBEUTE DER HALBTECHNISCHEN VERSUCHSPHASEN.....	174
9.14	BERECHNUNGEN ZUR SPEZIFISCHEN GASAUSBEUTE (BEZOGEN AUF CSB).....	176
9.15	BERECHNUNGEN ZUR SPEZIFISCHEN GASAUSBEUTE (BEZOGEN AUF OTR).....	177
9.16	BERECHNUNGEN ZUR SPEZIFISCHEN METHAN AUSBEUTE (BEZOGEN AUF CSB) .....	178
9.17	KAPILLARE FLIEßZEIT DER FAULSCHLÄMME DER HALBTECHNISCHEN VERSUCHSPHASEN .....	179
9.18	GELÖSTE STOFFE IM SCHLAMMWASSER DER HALBTECHNISCHEN VERSUCHSPHASEN .....	180