

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG, VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG.....	1
1.1	Thematische Einleitung.....	1
1.2	Hintergrund dieser Arbeit	3
1.3	Zielsetzungen.....	7
1.4	Übertragbarkeit de Ergebnisse	8
2	OPTIMIERUNGSPOTENTIAL DURCH SCHLAMMFAULUNG	10
2.1	Energieverbrauch	10
2.2	Stabilität des Klärschlammes	14
2.3	Schlammanfall.....	15
2.4	Entwässerbarkeit und Schlammentsorgung	17
2.4.1	Allgemeines.....	17
2.4.2	Empirische Auswertung zur Entwässerbarkeit von Klärschlämmen.....	17
2.5	Kapazitätsreserven der biologischen Stufe von Kläranlagen	22
2.6	Faulgasproduktion.....	23
3	GRUNDLAGEN FÜR DIE BEMESSUNG EINER FAULUNG.....	24
3.1	Volumen eines einstufigen Reaktors zur mesophilen Schlammfäulung.....	24
3.2	Ermittlung des Schlammalters	25
	Grundlagen des anaeroben Abbaus.....	25
	Hydrolyse	27
	Versäuerung, Acetogenese und Methanogenese.....	28
	Berechnung des Schlammalters über die Wachstumsgeschwindigkeit	30
	Empfehlungen für die Wahl des Schlammalters aus der Literatur.....	32
	Schlussfolgerungen	33
3.3	Höhere Trockensubstanz – Auswirkungen und Hemmung.....	33
3.3.1	Stickstoffverbindungen.....	33
3.3.2	Organische Säuren.....	38
3.3.3	Schwefelverbindungen	40
3.3.4	Phosphor	42
3.3.5	Zusammenfassung	43
4	RHEOLOGIE.....	44
4.1	Rheologische Grundparameter	44
4.2	Fließverhalten	47
4.2.1	Newtonsche Fließkurven	47
4.2.2	Nicht-Newtonsche Fließkurven.....	47
4.3	Anpassungsmodelle.....	50
4.4	Rohrhydraulik.....	54
4.4.1	Rohrströmung.....	55

4.4.2	Newton'sche Flüssigkeiten	55
	Hydraulischer Widerstandsbeiwert: Laminare Strömung, Newton'sche Flüssigkeit.....	56
	Hydraulischer Widerstandsbeiwert: Turbulente Strömung, Newton'sche Flüssigkeit.....	57
4.4.3	Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten	57
	Hydraulischer Widerstandsbeiwert: Laminare Strömung, nicht-Newton'sche Flüssigkeit.....	58
	Hydraulischer Widerstandsbeiwert: Turbulente Strömung, nicht-Newton'sche Flüssigkeit.....	59
4.4.4	Berechnung der hydraulischen Verlusthöhe	60
5	METHODIK.....	62
5.1	Versuchsanlage zur Schlammfäulung – Pilotmaßstab	62
5.1.1	Beschreibung der Pilotanlage	63
5.1.2	Komponenten der Pilotanlage	67
	Pumpen und Rührwerke	67
	MÜSE (Maschinelle Überschussschlammeindickung).....	67
	Vorlagebehälter.....	69
	Schlammemischung und Heizsystem.....	69
	Faulbehälter.....	70
	BHKW (Blockheizkraftwerk).....	72
5.1.3	Prozessleitsystem und Datenbank	73
5.1.4	Analysedaten der Pilotanlage	74
5.2	Rheologische Versuche.....	74
5.2.1	Laborversuche	75
5.2.2	Feldversuche: Messgerät und Messsystem.....	77
5.3	Auswertungsmethoden	78
5.3.1	Massebilanzen	78
5.3.2	Rechenwert: Schlammalter.....	84
6	AUSWERTUNGEN: VERSUCHE ZUR SCHLAMMFAULUNG	86
6.1	Auswahl geeigneter Bilanzzeiträume mittels CUSUM-Methode	87
	Angestrebte Ziele der bilanzierten Versuchsphasen.....	89
	Charakteristika der bilanzierten Versuchsphasen	89
	Versuchsphase 1: „Standardbetrieb“	89
	Versuchsphase 4: „Maximale Belastung“.....	89
	Versuchsphase 7: „Sehr hohe Belastung“	90
6.2	Überprüfung der ausgewählten Bilanzzeiträume.....	90
	Versuchsphase 1: „Standardbetrieb“	90
	Versuchsphase 4: „Maximale Belastung“.....	93
	Versuchsphase 7: „Sehr hohe Belastung“	95
	Verifikation des Messfehlers bei der Gasmessung.....	98
6.3	CSB, TS, oTS: Auswertungen, Bilanzen und Abbau	102
6.3.1	Verhältnis: CSB/oTS	102
6.3.2	Auswertungsergebnisse der Versuchsphasen 1, 4 und 7	108
	Interpretation der Auswertungsergebnisse.....	109
	Auswertungsergebnisse auf Basis von Einwohnerwerten	110
	Interpretation der ermittelten einwohnerspezifischen Gaserträge	112

6.4	Grenzen der Anaerobie	113
6.4.1	Organische Säuren.....	115
	Versuchsphase 8.1: „Grenzen der Anaerobie: Belastung“	117
6.4.2	Temperatur.....	120
	Versuchsphase 8.2: „Grenzen der Anaerobie: Temperatur“	120
6.5	Schwefelwasserstoff im Gas	121
6.6	Stickstoff: Bilanzierung und dynamische Betrachtung.....	122
6.6.1	Statische Betrachtung	122
6.6.2	Dynamische Betrachtung.....	125
	Dynamische Betrachtung von Stickstoff-Kennzahlen	125
	Ergebnisse und Interpretation der dynamischen Auswertung.....	128
6.7	Phosphor: Bilanzierung.....	129
7	MASCHINELLE SCHLAMMEINDICKUNG: BETRIEBSERGEBNISSE	131
7.1.1	Quantifizierung des Abscheidegrades einer maschinellen Schlammeindickung .	132
7.1.2	Praxisnahe Ermittlung des eingesetzten Polymers	134
7.1.3	Erreichbare TS.....	136
8	AUSWERTUNGEN: RHEOLOGIE	138
8.1	Versuchsergebnisse.....	138
8.1.1	TS-Gehalt vs. Schubspannung bei ÜS und Rohschlamm.....	138
8.1.2	TS-Gehalt vs. Schubspannung bei Faulschlamm	139
8.1.3	Hydraulische Verlusthöhen	140
8.2	Berechnung der hydraulischen Verlusthöhe.....	142
8.2.1	Zusammenstellung hydraulischer Kennwerte	142
8.2.2	Beispielhafte Berechnung der hydraulischen Verluste.....	143
8.3	Optimierungspotential der hydraulischen Verluste.....	146
9	DURCHMISCHUNG	152
9.1	Allgemeines zur Durchmischung.....	152
9.2	Umwälzung durch entstehendes Gas	153
9.2.1	Eingebrachte mechanische Energie durch entstehendes Gas	153
9.2.2	Ermittlung der erforderlichen Energiedichte zur vollständigen Durchmischung.....	156
9.3	Im Faulschlamm enthaltenes Gas	164
9.3.1	Gelöstes Gas	164
9.3.2	Austreibfähiges Gas.....	164
9.3.3	Versuch zur Bestimmung der Übersättigung.....	169
9.4	Sandakkumulation.....	172
10	ZUSAMMENFASSUNG	176
	Vorteile der Schlammfäulung.....	176
	Nachteile der Schlammfäulung	176
	Schlammfäulung mit erhöhter Trockensubstanz.....	177
	Inhalt der Arbeit.....	177
	Schlussworte und Ausblick.....	180
	LITERATURVERZEICHNIS	182

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Luftbild der Hauptkläranlage-Wien, nach der Inbetriebnahme 1980.....	4
Abbildung 2:	Layout der Hauptkläranlage-Wien nach dem Ausbau 2005 (ebswien, 2013a).....	4
Abbildung 3:	Verfahrensschema der Hauptkläranlage-Wien; oben: Bypassverfahren, unten: Hybridverfahren (ebswien, 2013b).....	5
Abbildung 4:	Projektiertes Verfahrensschema der Hauptkläranlage-Wien nach Umbau (BDL, 2010).....	6
Abbildung 5:	Spezifischer Energieverbrauch österreichischer Kläranlagen (Lindtner und Haslinger, 2012). Datenbasis: 76 Kläranlagen aus der Benchmarkingperiode 2003 bis 2010 (Mittelwerte bei Anlagen, die mehrfach teilgenommen haben; Basis: 110 g CSB/EW/d).....	12
Abbildung 6:	Energieverbrauch österreichischer Kläranlagen in Abhängigkeit der Ausbaugröße und der Art der Stabilisierung (Lindtner, 2012).....	13
Abbildung 7:	Spezifischer Energieverbrauch der mechanisch-biologischen Abwasserreinigung aerob und anaerob stabilisierender Kläranlagen (Füreder et al., 2012).....	14
Abbildung 8:	CSB-Bilanz in Abhängigkeit des Schlammalters (bei 15 °C), (CSB _{ÜS} + OVC = η -CSB); Quelle: Svardal, 2012.....	15
Abbildung 9:	Vergleich des spezifischen Schlammanfalls von aerob und anaerob stabilisierenden Kläranlagen als organische Trockensubstanz (oTS) (Füreder et al., 2012).....	16
Abbildung 10:	Mittelwerte der erreichten Trockensubstanzgehalte (TS); „Umfrage zur Klärschlammmentwässerung in Österreich“ (Svardal und Valkova, 2012).....	19
Abbildung 11:	Mittelwerte des erreichten Glühverlustes (GV); „Umfrage zur Klärschlammmentwässerung in Österreich“ (Svardal und Valkova, 2012).....	19
Abbildung 12:	Grafische Darstellung der statistischen Auswertung der Gegenüberstellung von erreichter TS und gemessenem GV; „Umfrage zur Klärschlammmentwässerung in Österreich“ (Svardal und Valkova, 2012).....	20
Abbildung 13:	Entwässerungsergebnis nach Größengruppen (ohne Anlagen mit Mischkanalisation und ohne Kammerfilterpressen mit Kalk als Konditionierungsmittel); „Umfrage zur Klärschlammmentwässerung in Österreich“ (Svardal und Valkova, 2012).....	21
Abbildung 14:	Reduktion der Schlammmenge aufgrund verbesserter Entwässerbarkeit durch Fäulung; Annahmen: 40 % TS-Reduktion durch Fäulung; Steigerung der Entwässerbarkeit +1,8 % durch Fäulung.....	22
Abbildung 15:	Kapazitätssteigerung der biologischen Stufe einer Kläranlage bei Reduktion des Schlammalters t_{TS} durch Umstellung der Verfahrensweise von aerober simultaner Schlammstabilisierung auf anaerobe Schlammstabilisierung; Randbedingungen: Anlage > 100.000 EW, 10 °C, $V_D/V_{BB} = 0,5$, Berechnung nach ATV-DVWK-A 131 (2010).....	23
Abbildung 16:	Schema des mehrstufigen anaeroben Abbaus (Gujer, 1983).....	26

Abbildung 17:	Wachstumskinetik acetatverarbeitender Methanbakterien; Quelle: Bischofsberger et al., 2005 nach Gujer, 1983.....	30
Abbildung 18:	Änderung von CSB, N und P bei der Schlammfäulung	34
Abbildung 19:	Abhängigkeit des pH-Wertes im Faulbehälter von der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration bei unterschiedlichem CO_2 -Gehalt des Faulgases (Svardal, 2002)	36
Abbildung 20:	Dissoziationsgleichgewicht $\text{NH}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ nach Gleichung (3-15); links: x- und y-Achse linear; rechts: logarithmische Darstellung der y-Achse	36
Abbildung 21:	Zulässige $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration in Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur (Kroiss, 1985)	37
Abbildung 22:	oTS -Abbau in Abhängigkeit von der Ammonium-Konzentration (Baumgartner und Jahn, 2014)	38
Abbildung 23:	Prozentualer Anteil der undissoziierten Säuren an den Gesamtsäuren in Abhängigkeit vom pH-Wert (Kroiss, 1985).....	39
Abbildung 24:	Hemmung der Methanbildung in Abhängigkeit vom pH-Wert und der Essigsäurekonzentration (Kroiss, 1985).....	39
Abbildung 25:	Anteil von HS^- und H_2S am Gesamtsulfid in Abhängigkeit vom pH-Wert (Kroiss, 1985).....	41
Abbildung 26:	Verteilung der Sulfidfraktionen auf Gas und Wasser (Kroiss, 1985).....	42
Abbildung 27:	Parallelplattenversuch, 2D-Darstellung, nach Moshage (2004)	44
Abbildung 28:	Parallelplattenversuch (3D Darstellung)	46
Abbildung 29:	Fließ- und Viskositätskurve einer Newtonschen Flüssigkeit.....	47
Abbildung 30:	Fließverhalten nicht-Newtonscher Fluide; nach Klinksieg (2010).....	48
Abbildung 31:	Fließ- und Viskositätskurve einer nicht-Newtonschen, strukturviskosen Flüssigkeit	48
Abbildung 32:	Fließ- und Viskositätskurve einer Nicht-Newtonschen, dilatanten Flüssigkeit	49
Abbildung 33:	Fließkurve einer strukturviskosen und thixotropen Flüssigkeit (links) und Änderung der Viskosität bei anhaltender Scherbeanspruchung (rechts).....	49
Abbildung 34:	Fließkurve einer dilatanten und rheopexen Flüssigkeit (links) und Änderung der Viskosität bei anhaltender Scherbeanspruchung (rechts)	50
Abbildung 35:	Fließ- und Viskositätskurve einer strukturviskosen Flüssigkeit mit Fließgrenze	50
Abbildung 36:	Anpassungsmodell nach Bingham.....	51
Abbildung 37:	Anpassungsmodell nach Ostwald-de Waele.....	52
Abbildung 38:	Anpassungsmodell nach Herschel und Bulkley	53
Abbildung 39:	Anpassungsmodell nach Windhab.....	53
Abbildung 40:	Stromfäden eines bewegten Fluids in einem Rohr – laminare (links) und turbulente (rechts) Rohrströmung.....	55
Abbildung 41:	Schematische Darstellung der Geschwindigkeits- und Schubspannungs-Verteilung bei laminarer Rohrströmung nach Moshage (Moshage, 2004)	58

Abbildung 42:	Organigramm zur Berechnung der hydraulischen Verlusthöhe in Rohrleitungen von Newtonschen und nicht-Newtonschen Flüssigkeiten.....	61
Abbildung 43:	Vereinfachtes Schema der Pilotanlage	63
Abbildung 44:	Schlammumpfen im Keller beim Mischbauwerk; links: Pumpen; rechts: Verrohrung (Aufnahmedatum: 11.03.2014)	63
Abbildung 45:	Vorlagebehälter 1 und 2 (Speicherbehälter für Rohschlamm) (Aufnahmedatum: 11.03.2014)	64
Abbildung 46:	Dosierpumpe des Substrats zum Faulbehälter; Zu-/Ableitungen des Vorlagebehälters 1 und 2 (Aufnahmedatum: 11.03.2014)	64
Abbildung 47:	Wärmetauscher in Faulschlamm-Umwälzleitung (Aufnahmedatum: 11.03.2014).....	65
Abbildung 48:	Versuchsanlage, Außenansicht (Aufnahmedatum: 17.04.2013)	66
Abbildung 49:	Versuchsanlage, Außenansicht: Faulbehälter und BHKW (Aufnahmedatum: 17.04.2013).....	66
Abbildung 50:	MÜSE (Maschinelle Überschussschlammeindickung); links: Außenansicht des Containers; rechts: Innenansicht Sehtisch und Schaltschrank)	67
Abbildung 51:	Polymeraufbereitungsanlage der MÜSE; links: Blick vom Seihband zur Container-Doppeltüre; rechts: Blick von außen in den Container.....	67
Abbildung 52:	Schema der Polymeraufbereitungsanlage.....	68
Abbildung 53:	Eingabe- und Status-Display der MÜSE.....	69
Abbildung 54:	Allgemeine Begriffsdefinitionen einer Regelstrecke (ÖWAV-Messtechnikkurs, 2014).....	70
Abbildung 55:	Faulbehälter; links: Entnahme und Überlaufkasten; rechts: Zulauf, Gasleitung (Aufnahmedatum: 11.03.2014)	71
Abbildung 56:	Faulbehälter; links: rückwärtige Ansicht mit Abluftschlauch der Stützluft; rechts: Über-/Unterdrucksicherung und Stützluftgebläse (Aufnahmedatum: 11.03.2014)	71
Abbildung 57:	Blockheizkraftwerk (BHKW) der Versuchsanlage; Blick vom Faulbehälter (Aufnahmedatum: 11.03.2014).....	72
Abbildung 58:	BHKW: Innenansicht; links: Blick in den Container; rechts: Blick aus dem Container (Aufnahmedatum: 11.03.2014).....	73
Abbildung 59:	Screenshot der Visualisierung der Bedienstation des Prozessleitsystems; Hauptbildschirm Schlammbehandlung.....	73
Abbildung 60:	Koaxiales Zylindermesssystem; 1: Boden Außenzylinder, 2: Außenzylinder, 3: Innenzylinder, 4: Füllhöhe der Messprobe; Abbildung übernommen aus DIN 53019-1 (2008).....	75
Abbildung 61:	Versuchsaufbau Rotationsrheometer; Innerer- und äußerer Zylinder des koaxialen Zylindermesssystems CC39, Flüssigkeitstemperiereinrichtung und Umlaufthermostat (Füreder, 2014).....	76
Abbildung 62:	Fließkurve Faulschlamm Pilotanlage HKA-Wien – TS = 3,9 %; T = 38 °C; Messprogramm: 500-180/300/180; Anpassungsfunktion Ostwald-de Wale an Aufwärts- und Abwärtsrampe (Füreder, 2014).....	77
Abbildung 63:	Schema der rheologischen Versuchsstrecke.....	78

Abbildung 64:	Rheologische Versuchsstrecke (Schlauch: TORONTO HED; $D = 50$ mm; l in Abbildung = 20 m; 2 Drucksensoren, IDM 50 mm; Exzentrerschneckenpumpe, Speicherbehälter 5 m ³) (Füreder, 2014).....	78
Abbildung 65:	Schema für die Bilanzierung einer Faulung	79
Abbildung 66:	Analyse des Bilanzfehlers CSB der Pilotanlage mittels CUSUM-Methode; links: Input, Output, Differenz; rechts: CUSUM-Kontrollkarte des Fehlervektors; x-Achse: 1 = 25.02.2013.....	88
Abbildung 67:	Analysewerte der TS-Konzentrationen (VLB1, VLB2 und FS) mit Überlagerung der CUSUM-Auswertung; Versuchsphase 1	91
Abbildung 68:	CSB-Bilanz der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung) mit Überlagerung der CUSUM-Auswertung; Versuchsphase 1	92
Abbildung 69:	Gegenüberstellung Schlammalter, Raumbelastung, Summe an organischen Säuren und pH-Wert der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung) mit Überlagerung der CUSUM-Auswertung; Versuchsphase 1	92
Abbildung 70:	Analysewerte der TS-Konzentrationen (VLB1, VLB2 und FS) mit Überlagerung der CUSUM-Auswertung; Versuchsphase 4	94
Abbildung 71:	CSB-Bilanz der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung) mit Überlagerung der CUSUM-Auswertung; Versuchsphase 4	94
Abbildung 72:	Gegenüberstellung Schlammalter, Raumbelastung, Summe an organischen Säuren und pH-Wert der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung) mit Überlagerung der CUSUM-Auswertung; Versuchsphase 4	95
Abbildung 73:	Analysewerte der TS-Konzentrationen (VLB1, VLB2 und FS) mit Überlagerung der CUSUM-Auswertung; Versuchsphase 7	96
Abbildung 74:	CSB-Bilanz der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung) mit Überlagerung der CUSUM-Auswertung; Versuchsphase 7	97
Abbildung 75:	Gegenüberstellung Schlammalter, Raumbelastung, Summe an organischen Säuren und pH-Wert der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung) mit Überlagerung der CUSUM-Auswertung; Versuchsphase 7	97
Abbildung 76:	Produktbild der auf der Pilotanlage eingebauten Gasmessung, Fa. E+H, Prosonic Flow B 200 (“Endress+Hauser, Gasmessung,” 2014)	98
Abbildung 77:	Gegenüberstellung spezifische Stromproduktion und Methangehalt des Faulgases	99
Abbildung 78:	spezifische Gasproduktion in Bezug zur zugeführten oTS (mitlaufende Bilanzierung)	100
Abbildung 79:	spezifische Gasproduktion in Bezug zum zugeführten CSB (mitlaufende Bilanzierung).....	101
Abbildung 80:	Jahresganglinie, genutzte Betriebskubikmeter/Normkubikmeter Faulgas mittels BHKW; Daten: gleitende Wochenmittel auf Tagesbasis)	101
Abbildung 81:	Gasqualität (CH ₄) bei der Pilotanlage, Gegenüberstellung stationäres Messsystem und Handmessgerät	102
Abbildung 82:	Anteil von Methan im ablaufenden Faulschlamm in Bezug zum abgezogenen Gas und sich einstellender Methangehalt bei verschiedenen TS _{FS} -Konzentrationen.....	104

Abbildung 83:	Anteil der Inhaltsstoffe eines Substrats in Abhängigkeit von der Gasausbeute; $\text{CH}_4 = 64 \%$	105
Abbildung 84:	CSB/oTS-Verhältnis des Rohschlammes der Pilotanlage im Jahresverlauf.....	106
Abbildung 85:	CSB/oTS-Verhältnis des Faulschlammes der Pilotanlage im Jahresverlauf.....	107
Abbildung 86:	Stoffflussdiagramm der CSB-Fracht im Ist-Zustand (Spindler, 2013).....	111
Abbildung 87:	Stoffflussdiagramm der CSB-Fracht im Ausbau-Zustand mit Trübwassernitritation und 45 % Bypass (LF3) (Spindler, 2013)	112
Abbildung 88:	Analysewerte der TS-Konzentrationen (VLB1, VLB2 und FS) Versuchsphasen 8.1 und 8.2	114
Abbildung 89:	CSB-Bilanz der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung); Versuchsphasen 8.1 und 8.2	114
Abbildung 90:	Gegenüberstellung Schlammalter, Raumbelastung, Summe an organischen Säuren und pH-Wert der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung); Versuchsphasen 8.1 und 8.2	115
Abbildung 91:	Gegenüberstellung Schlammalter, Raumbelastung, Summe an organischen Säuren und pH-Wert der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung); alle Versuchsphasen	116
Abbildung 92:	Gegenüberstellung Schlammalter, Raumbelastung, Summe an organischen Säuren und pH-Wert der EOS-Pilotanlage (mitlaufende Bilanzierung); Versuchsphasen 8.1 und 8.2	117
Abbildung 93:	Gegenüberstellung Schlammalter, Raumbelastung, Summe an organischen Säuren und pH-Wert der EOS-Pilotanlage; Versuchsphasen 8.1 und 8.2	118
Abbildung 94:	Gegenüberstellung spezifische Gasproduktion (Basis: Tages- und gleitende Wochenmittel) und Summe an organischen Säuren der EOS-Pilotanlage; Versuchsphase 8.1	119
Abbildung 95:	Relative Aktivität der mesophilen Methanbakterien in Abhängigkeit von der Temperatur, bezogen auf die Aktivität bei $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (= 100 %) (Henze und Harremoës, 1983).....	120
Abbildung 96:	Gegenüberstellung spezifische Gasproduktion (Basis: Tages- und gleitende Wochenmittel) und Temperatur im Faulbehälter (oben, unten) der EOS-Pilotanlage; Versuchsphase 8.2	121
Abbildung 97:	gemessener Schwefelwasserstoff-Anteil im Faulgas der Pilotanlage.....	122
Abbildung 98:	Vereinfachte, schematische Darstellung der Rücklösung von N und P bei der Fäulung	123
Abbildung 99:	N-Bilanz auf Basis TS, oTS und CSB der Versuchsanlage.....	124
Abbildung 100:	Ammonium-Konzentration im Faulschlamm, abhängig von TS im Faulbehälter; Datenbasis: Mittelwerte $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TS}_{\text{FB}}$ und zugehörige Werte TS_{RohS} , Annahme: TS-Reduktion = 41 %	124
Abbildung 101:	Vergleich von TS_{FS} und $\text{NH}_4\text{-N}$ in der Fäulung	125
Abbildung 102:	Vorgehensweise bei der Ermittlung des Stickstoffgehalts im Feststoff des Faulschlammes ($\text{N}_{\text{TS,FS}}$).....	126
Abbildung 103:	Ganglinien Verhältniszahlen Stickstoff, Basis oTS.....	128
Abbildung 104:	Ganglinien Verhältniszahlen Stickstoff, Basis CSB.....	129

Abbildung 105:	P-Bilanz auf Basis TS und oTS der Versuchsanlage.....	130
Abbildung 106:	Stoffströme einer maschinellen Schlammeindickung; gemessene Messgrößen sind unterstrichen.....	133
Abbildung 107:	Ermittlung der Menge an Polymer-Wirksamkeit in Bezug auf die Feststoff-fracht des Rohschlammes; $c_{Polymer} = 0,15$ % WS, Erwartungsbereich grau hinterlegt.....	135
Abbildung 108:	Erreichte TS mittels Seihband, in Abhängigkeit vom eingesetzten Polymer (RohS: PS+ÜS; Polymer: Flocstar L214, Fa. ACAT); TS_{Input} : „analytisch bestimmt“ oder „Bestimmung mit Sonde“, TS_{Output} : immer analytisch bestimmt.....	137
Abbildung 109:	Schubspannung vs. TS: ÜS- und RohS der HKA-Wien im Vergleich mit Literaturdaten – Schubsp. von Abwärtsrampe des Messprogramms 500-180/300/180 bei $\dot{\gamma} = 500s^{-1}$; Anpassungen mit Exponentialfunkt.; Polymerkonz.-RohS: 3,93 kg WS/t TS (Füreder, 2014).....	138
Abbildung 110:	Schubspannung vs. TS-Gehalt: Faulschlamm der HKA-Wien im Vergleich mit Literaturdaten – Schubspannungen entstammen Aufwärtsrampe des Messprogramms 500-180/300/180 bei $\dot{\gamma} = 500s^{-1}$ (Füreder, 2014).....	140
Abbildung 111:	Verlusthöhen Rohschlamm der HKA-Wien in Abhängigkeit von v ; $D = 50$ mm; $l = 10$ m; Poly = Polymerkonzentration [kg WS/t TS] (Anm.: „Mess.“ = Messung, „Rech.“=Rechnung) (Füreder, 2014).....	141
Abbildung 112:	Verlusthöhen Faulschlamm der HKA-Wien in Abhängigkeit der Geschwindigkeit; $D = 50$ mm; $l = 10$ m.....	142
Abbildung 113:	Verlusthöhe h_r in einer Rohrleitung ($D = 0,2$ m, $l = 100$ m) unterschiedlicher Medien (Wasser, Faulschlamm, maschinell eingedickter Rohschlamm) in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit, rechnerisch ermittelt nach Abbildung 42.....	144
Abbildung 114:	Verlusthöhe h_r in einer Rohrleitung ($D = 0,2$ m, $l = 100$ m) unterschiedlicher Medien (Wasser, Faulschlamm) in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit, rechnerisch ermittelt nach Abbildung 42.....	145
Abbildung 115:	Verlusthöhe in Abhängigkeit der TS (Wasser, Faulschlamm, maschinell eingedickter Rohschlamm), rechnerisch ermittelt: $D = 0,2$ m, $l = 100$ m, $v = 1$ m/s, Werte aus Tabelle 33 und Tabelle 32.....	145
Abbildung 116:	Möglichkeiten der Dosierung von Substrat in den Faulbehälter.....	147
Abbildung 117:	Verhältnis der Trockensubstanzkonzentrationen von Mischschlamm ($TS_{RohS+FS}$) zu Faulschlamm (TS_{FS}) in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses (Q_{FS}/Q_{RohS}); Annahme: TS-Reduktion in der Faulung = 40 %).....	148
Abbildung 118:	Zusammenhang zwischen spezifischer Energiedichte und Höhe des Faulbehälters, in Abhängigkeit der spezifischen Gasproduktion; Annahmen: $T_{FB} = 38$ °C, $et_{FB,0} = 0,5$	155
Abbildung 119:	Temperaturdifferenz im Faulbehälter der Pilotanlage in Abhängigkeit von der spezifischen Gasproduktion.....	160
Abbildung 120:	Erforderliche Energiedichte für vollständige Durchmischung eines Faulbehälters in Abhängigkeit der Gasentstehungshöhe ($1 =$ unten, $0 =$ oben); $T = 38$ °C, Annahmen: $0,15$ Nm ³ Gas/(m ³ FB · h) ausreichend bei $h_{FB} = 4,6$ m.....	160

Abbildung 121:	Zusammenhang zwischen spezifischer Gasproduktion und erforderlicher Höhe des Faulbehälters in Abhängigkeit der erforderlichen Energiedichte für vollständige Durchmischung; Annahmen: $T_{FB} = 38 \text{ °C}$, $et_{FB,0} = 0,5$	161
Abbildung 122:	Gelöste und übersättigte Gaskonzentration im Faulschlamm über die Höhe eines Faulbehälters; schraffiert: maximal austreibbares Gas	166
Abbildung 123:	Maximal austreibbares Gas einer Flüssigkeit am Beispiel Faulschlamm über die Höhe eines Faulbehälters; schraffiert: maximal austreibbares Gas.....	168
Abbildung 124:	Versuch zum Potential der Schaumbildung und Gasübersättigung (23.01.2014)	169
Abbildung 125:	Austreibfähiges Gas im Faulschlamm: ohne bzw. mit 40 % Übersättigung; Temp. 38 °C , Überdruck = 0 mbar	171
Abbildung 126:	Faulbehälter nach Entleerung; links: Innenaufnahme des Faulbehälters; Mitte: Boden des Faulbehälters; rechts: Probe des sedimentierten Materials (Aufnahmedatum: 11.06.2014).....	173
Abbildung 127:	Akkumulation von Sand in der Pilotanlage (mittlere $TS_{FS} = 38 \text{ g/L}$).....	174