



Aktenzeichen IV-7-042 600 003 I

Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen - Phase II

ABSCHLUSSBERICHT

Im Auftrag von:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Projektleitung:



Projektpartner:



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V. · www.fiw.rwth-aachen.de
Kackertstraße 15 – 17 · 52056 Aachen · Fon 0241 80 2 68 25 · Fax 0241 80 2 28 25 · fiw@fiw.rwth-aachen.de

Bietergemeinschaft

Bietergemeinschaft FiW/ RWTH/ Pöyry

Bevollmächtigter Vertreter



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW) e.V. an der RWTH Aachen
Dr.-Ing. F.-W. Bolle
Kackertstr. 15-17
52056 Aachen
Tel.: 0241 / 80 26825
Fax: 0241 / 80 22825
Email: fiw@fiw.rwth-aachen.de
www.fiw.rwth-aachen.de

Bearbeiter

Dipl.-Ing. S. Gredigk-Hoffmann
gredigk@fiw.rwth-aachen.de
Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bolle
bolle@fiw.rwth-aachen.de

Projektleitung



Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen
Tel.: 0241 80 25207
Fax: 0241 80 22285
Email: isa@isa.rwth-aachen.de
www.isa.rwth-aachen.de

Bearbeiter

Dipl.-Ing. D. Bastian
bastian@isa.rwth-aachen.de
Dr.-Ing. L. Palmowski
palmowski@isa.rwth-aachen.de
Dr.-Ing. J. Werning
werning@isa.rwth-aachen.de
Dr.-Ing. K. Krebber

Projektpartner



Pöyry Deutschland GmbH
Lazarettstr. 15
45127 Essen
Tel.: 0201 82054 - 36
Fax: 0201 82054 - 22

Bearbeiter

Dipl.-Ing. C. Simsheuser
caroline.simsheuser@poyry.com
Dr. M. Krüger
matthias.krueger@poyry.com
Dipl.-Ing. S. Eckers
sabrina.eckers@poyry.com

Zitiervorschlag:

PINNEKAMP, J.; BASTIAN, D.; SIMSHEUSER, C.; PALMOWSKI, L.; KRÜGER, M.; GREDIGK-HOFFMANN, S., BOLLE, F.-W. (2015): Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen – Phase 2. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Bilder	V
Verzeichnis der Tabellen	X
Verzeichnis der Abkürzungen.....	XIV
1 Veranlassung und Zielsetzung	1
2 Kenntnisstand.....	3
2.1 Ergebnisse aus Projektphase 1	3
2.2 Empfehlungen zur Bemessung und einem energieeffizienten Betrieb von Membranbioreaktoren	4
3 Material und Methoden.....	6
3.1 Versuchsaufbau.....	6
3.1.1 Auslegung der Vorklärung.....	7
3.1.2 Dimensionierung der Belebung	9
3.1.3 Schlammfäulung	12
3.2 Untersuchungsprogramm	13
3.3 Durchgeführte Analytik	14
3.3.1 Untersuchungen zur Reinigungsleistung und der Betriebssicherheit	14
3.3.2 Messung des Gasvolumenstromes und der Gasqualität.....	15
3.3.3 Schlammcharakteristika	16
3.3.3.1 Kapillare Fließzeit (CST)	16
3.3.3.2 Schlammfiltrationsindex (SFI).....	18
3.3.3.3 Schlammvolumenindex (ISV)	19
3.3.3.4 Extrazelluläre polymere Substanzen (EPS).....	19
3.4 Einfahrbetrieb vor Versuchsreihe 1 und neues Einfahren zwischen Versuchsreihe 2 und 3.....	21
3.5 Reinigung der Membranstufe.....	22
4 Ergebnisse	23
4.1 Darstellung der Ergebnisse.....	23
4.2 Übergreifende Ergebnisse über alle Versuchsreihen	24

4.2.1	Laufzeit der Versuchsreihen.....	24
4.2.2	Veränderung der organischen Frachten im Zulauf bei konstantem Abwasservolumenstrom	24
4.2.3	Leistungsfähigkeit der Vorklärung	25
4.2.4	Rechnerische Bestimmung des PS/ ÜSS-Verhältnisses im Input der Faulung der Versuchsstraße in den Versuchsreihen 3 und 4	28
4.2.5	Unregelmäßigkeiten in der Gasqualitätsmessung	29
4.3	Versuchsreihe 1	30
4.3.1	Reinigungsleistung im MBR	30
4.3.2	Filtrationsleistung der MBR	33
4.3.2.1	Hydraulische Leistungsfähigkeit	33
4.3.2.2	Filtrationseigenschaften des belebten Schlammes	35
4.3.3	Gasertrag und Methangehalt in der Faulung	36
4.3.4	Entwässerungs- und Absetzeigenschaften im MBR, sowie vor und nach anaerober Stabilisierung.....	39
4.4	Versuchsreihe 2.....	41
4.4.1	Reinigungsleistung im MBR	41
4.4.2	Filtrationsleistung im MBR.....	46
4.4.2.1	Hydraulische Leistungsfähigkeit	46
4.4.2.2	Filtrationseigenschaften des belebten Schlammes	47
4.4.3	Gasertrag und Methangehalt in der Faulung	48
4.4.4	Entwässerungs- und Absetzeigenschaften im MBR, sowie vor und nach anaerober Stabilisierung.....	51
4.5	Versuchsreihe 3.....	53
4.5.1	Reinigungsleistung im MBR	53
4.5.2	Filtrationsleistung im MBR.....	57
4.5.2.1	Hydraulische Leistungsfähigkeit	57
4.5.2.2	Filtrationseigenschaften des belebten Schlammes	59
4.5.3	Gasertrag und Methangehalt in der Faulung	61

4.5.4	Entwässerungs- und Absetzeigenschaften im MBR, sowie vor und nach anaerober Stabilisierung	63
4.6	Versuchsreihe 4.....	65
4.6.1	Reinigungsleistung im MBR	65
4.6.2	Filtrationsleistung im MBR.....	70
4.6.2.1	Hydraulische Leistungsfähigkeit	70
4.6.2.2	Filtrationseigenschaften des belebten Schlammes.....	72
4.6.2.3	Extrazelluläre polymere Substanzen (EPS).....	73
4.6.3	Gasertrag und Methangehalt in der Faulung	76
4.6.4	Entwässerungs- und Absetzeigenschaften im MBR, sowie vor und nach anaerober Stabilisierung	80
5	Diskussion der Versuchsergebnisse	82
5.1	Reinigungsleistung im MBR.....	82
5.2	Filtrationsleistung im MBR	83
5.2.1	Diskussion der Versuchsergebnisse.....	83
5.2.2	Kompensationsmöglichkeiten.....	84
5.2.2.1	Anpassung der Betriebsweise auf Temperaturschwankungen im Jahresgang	84
5.2.2.2	Simultanfällung von Phosphaten	85
5.2.2.3	Dosierung von Pulveraktivkohle in das Belebungsbecken.....	85
5.3	Spezifischer Gasertrag und Vergleich der Methangehalte während der Versuchsreihen	87
5.3.1	Bestimmung der Faulgasproduktion bei kompletter Faulung des anfallenden Schlammes	87
5.3.1.1	Alleinige Faulung des Überschussschlammes	87
5.3.1.2	Anteil des Primärschlammes am Faulgasertrag bei gemeinsamer Faulung von Primär- und Überschussschlamm.....	88
5.3.1.3	Berechnung des täglichen und einwohnerspezifischen Gasertrags bei Faulung des insgesamt anfallenden Primär- und Überschussschlammes.....	89
5.3.2	Auswertung der Methangehalte und Bestimmung des mittleren Heizwertes.....	90
5.4	Vergleich zu großtechnischen MBR	91

6	Modellbetrachtung	92
6.1	Anpassung der Modellanlagen.....	92
6.2	Energiebilanz.....	95
6.3	CO ₂ -Bilanzen.....	99
6.4	Kostenschätzung und –vergleichsbetrachtungen.....	103
6.4.1	Investitionskosten.....	103
6.4.2	Betriebskosten.....	104
6.4.3	Zusammenfassung Jahreskosten.....	105
6.4.4	Einfluss der Gasausbeute auf die Wirtschaftlichkeit.....	107
6.4.5	Einfluss des Strompreises auf die Wirtschaftlichkeit der Modellanlage.....	110
6.4.6	Reduzierung der Investitionskosten der Faulung.....	112
7	Entscheidungsmatrix als Planungshilfe	114
8	Zusammenfassung und Fazit	116
	Literaturverzeichnis	119
	Anhang	A-1

Verzeichnis der Bilder

Bild 3.1:	Verfahrensprinzip der halbtechnischen MBR auf der HtK Neuss des LANUV (in hell grau ist die Vorklärung abgebildet, die nur in der Versuchsstraße eingesetzt wurde).....	6
Bild 3.2:	Volumenströme und Aufenthaltszeit in der Vorklärung (Versuchsreihen 1 und 2)	7
Bild 3.3:	Racks zur Einfassung der Membranmodule	10
Bild 3.4:	Blick in die Nitrifikation/ Membranfiltration.....	11
Bild 3.5:	Faulgasbehälter für die halbtechnischen Versuche.....	12
Bild 3.6:	Messkopf des CST-Gerätes [nach ATV, 1992] und Ansicht des verwendeten Messgerätes „Triton W.R.C Multipurpose Filtration Unit TW 166“	17
Bild 3.7:	Versuchsaufbau bei der Bestimmung des SFI (nach THIEMIG, 2011).....	18
Bild 4.1:	Beispiel Boxplot-Diagramm mit Beschriftung der Einzelelemente	23
Bild 4.2:	Zeiträume der Versuchsreihen (VR) und durchgeführte Analytik.....	24
Bild 4.3:	Zeitlicher Verlauf der BSB ₅ -Zulaufkonzentrationen	24
Bild 4.4:	Rückhalt organischer Summenparameter in der Vorklärung	26
Bild 4.5:	AFS-Konzentrationen in Zu- und Ablauf der Vorklärung	26
Bild 4.6:	Zulaufkonzentrationen von Gesamtstickstoff und Ammoniumstickstoff im Zulauf des MBR der Referenzstraße (links) und des MBR der Versuchsstraße (rechts, entspricht Ablauf VK) in allen Versuchsreihen (n = 111)	26
Bild 4.7:	Konzentrationen organischer Summenparameter im Zulauf zum Belebungsbecken für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 1	30
Bild 4.8:	Schlammbelastung im MBR der Referenz- und der Versuchsstraße sowie Auslegungswert (---) der Referenzstraße (siehe Kapitel 3.1.2) für Versuchsreihe 1.....	31
Bild 4.9:	Ablaufkonzentrationen und Eliminationen von CSB, BSB ₅ und TOC für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 1	31
Bild 4.10:	Entwicklung des Überschussschlammabzuges und des TR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 1	32

Bild 4.11:	Konzentrationen von Ammoniumstickstoff, Nitritstickstoff, Gesamtstickstoff und Nitratstickstoff im MBR-Ablauf für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 1 (n = 30)	33
Bild 4.12:	Fluss, Transmembrandruck und TR von Versuchs- und Referenzstraße in Versuchsreihe 1	34
Bild 4.13:	Auf den TR bezogener Schlammfiltrationsindex (SFI) des belebten Schlammes der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 1	35
Bild 4.14:	Gasvolumenstrom und -zusammensetzung für die Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 1	36
Bild 4.15:	Raumbelastung (B_R) in beiden Faulbehältern in Versuchsreihe 1	38
Bild 4.16:	Schlammvolumenindex (ISV) in der Belebung und Veränderung durch Eindickung (Input FB) und Faulung (Output FB) für die Referenz- und die Versuchsstraße in Versuchsreihe 1	40
Bild 4.17:	Auf den TR normierte Kapillare Fließzeit (CST/TR) der Schlämme für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 1	40
Bild 4.18:	Konzentrationen organischer Summenparameter im Zulauf zum Belebungsbecken für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 2	41
Bild 4.19:	Schlammbelastung im MBR der Referenz- und der Versuchsstraße sowie Auslegungswert (---) der Referenzstraße (siehe Kapitel 3.2.2) für Versuchsreihe 2	42
Bild 4.20:	Ablaufkonzentrationen und Eliminationen von CSB, BSB ₅ und TOC für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 2	42
Bild 4.21:	Entwicklung des Überschussschlammabzuges und des TR im MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 2	43
Bild 4.22:	Konzentrationen von Ammoniumstickstoff, Nitritstickstoff, Gesamtstickstoff und Nitratstickstoff im Ablauf des MBR für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 2 (n = 31)	45
Bild 4.23:	Fluss, Transmembrandruck und TR von Versuchs- und Referenzstraße in Versuchsreihe 2	46
Bild 4.24:	Auf den TR bezogener Schlammfiltrationsindex (SFI) des belebten Schlammes der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 2	47
Bild 4.25:	Zeitlicher Verlauf des TMP und SFI des belebten Schlammes in der Versuchsstraße für Versuchsreihe 2	48

Bild 4.26: Gasvolumenstrom und -zusammensetzung für die Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 2	49
Bild 4.27: Raumbelastung (B_R) in beiden Faulbehältern in Versuchsreihe 2	51
Bild 4.28: Schlammvolumenindex (ISV) in der Belebung und Veränderung durch Eindickung (Input FB) und Faulung (Output FB) für die Referenz- und die Versuchsstraße in Versuchsreihe 2	52
Bild 4.29: Auf den TR normierte Kapillare Fließzeit (CST/TR) der Schlämme für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 2.....	52
Bild 4.30: Konzentrationen organischer Summenparameter im Zulauf zum Belebungsbecken für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 3.....	53
Bild 4.31: Schlammbelastung im MBR der Referenz- und der Versuchsstraße sowie Auslegungswert (---) der Referenzstraße (siehe Kapitel 3.2.2) für Versuchsreihe 3.....	54
Bild 4.32: Ablaufkonzentrationen und Eliminationen von CSB, BSB ₅ und TOC für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 3	54
Bild 4.33: Entwicklung der Überschussschlammproduktion und des TR in der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 3.....	55
Bild 4.34: Konzentrationen von Ammoniumstickstoff, Nitritstickstoff, Gesamtstickstoff und Nitratstickstoff im Ablauf des MBR für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 3 (n = 21)	56
Bild 4.35: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffelimination im MBR der Referenz- (oben) und der Versuchsstraße (unten) für Versuchsreihe 3.....	57
Bild 4.36: Fluss, Transmembrandruck und TR von Versuchs- und Referenzstraße in Versuchsreihe 3.....	58
Bild 4.37: Auf den TR bezogener Schlammfiltrationsindex (SFI) des belebten Schlammes der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 3	59
Bild 4.38: Zeitlicher Verlauf des TMP und SFI im MBR der Referenz- und Versuchsstraße für Versuchsreihe 3.....	60
Bild 4.39: Gasvolumenstrom und -zusammensetzung für die Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 3	61
Bild 4.40: Raumbelastung in beiden Faulbehältern in Versuchsreihe 3	63
Bild 4.41: Schlammvolumenindex (ISV) in der Belebung und Veränderung durch Eindickung des ÜSS und Einmischen des PS für die Versuchsstraße (Input	

FB) und Faulung (Output FB) für die Referenz- und die Versuchsstraße in Versuchsreihe 3.....	64
Bild 4.42: Auf den TR normierte Kapillare Fließzeit (CST/TR) der Schlämme für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 3.....	64
Bild 4.43: Konzentrationen organischer Summenparameter im Zulauf zum Belebungsbecken für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 4.....	65
Bild 4.44: Schlammbelastung im MBR der Referenz- und der Versuchsstraße sowie Auslegungswert (---) der Referenzstraße (siehe Kapitel 3.2.2) für Versuchsreihe 4.....	66
Bild 4.45: Ablaufkonzentrationen und Eliminationen von CSB, BSB ₅ und TOC für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 4.....	66
Bild 4.46: Entwicklung der Überschussschlammproduktion und des TR sowie BSB ₅ -Fracht im Zulauf von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 4.....	67
Bild 4.47: Ablaufkonzentrationen von Ammoniumstickstoff, Nitritstickstoff, Gesamtstickstoff und Nitratstickstoff für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 4 (n = 24).....	68
Bild 4.48: Zeitlicher Verlauf der NH ₄ -N-, NO ₂ -N-Konzentration und der NH ₄ -N-Elimination in der Referenz- (oben) und der Versuchsstraße (unten) sowie Lufttemperatur und Temperatur des Abwassers im Zulauf für Versuchsreihe 4.....	69
Bild 4.49: Bruttovolumenstrom, Transmembrandruck und TR von Versuchs- und Referenzstraße (Reinigungen sind schwarz und rot markiert) in Versuchsreihe 4.....	71
Bild 4.50: Auf den TR bezogener Schlammfiltrationsindex (SFI) des belebten Schlammes der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 4.....	72
Bild 4.51: Zeitlicher Verlauf des TMP und SFI in der Referenz- und Versuchsstraße für Versuchsreihe 4.....	73
Bild 4.52: Gegenüberstellung des TMP zum EPS-Gehalt des belebten Schlammes in Versuchs- und Referenzstraße in Versuchsreihe 4.....	74
Bild 4.53: EPS-Massenstrom im Überschussschlammabzug.....	75
Bild 4.54: Verteilung der EPS an verschiedenen Stellen der Membranfläche.....	75
Bild 4.55: Zusammensetzung der EPS auf der Membranoberfläche für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts).....	76

Bild 4.56: Gasvolumenstrom und -zusammensetzung für die Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 4	77
Bild 4.57: Raumbelastung in beiden Faulbehältern in Versuchsreihe 4	79
Bild 4.58: Schlammvolumenindex (ISV) in der Belebung und Veränderung durch Eindickung des ÜSS und Einmischen des PS für die Versuchsstraße (Input FB) und Faulung (Output FB) für die Referenz- und die Versuchsstraße in Versuchsreihe 4.....	80
Bild 4.59: Zusammenhang zwischen ISV des frischen ÜSS und TR des eingedickten ÜSS der Versuchsstraße in Versuchsreihe 4.....	81
Bild 4.60: Auf den TR normierte Kapillare Fließzeit (CST/TR) der Schlämme für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 4.....	81
Bild 5.1: Verbesserung des Transmembrandrucks in einem MBR im Labormaßstab bei unterschiedlichen PAK-Dosierungen (vgl. NG ET AL., 2010).....	86
Bild 6.1: Gaserträge für alle Versuchsreihen beider Modellanlagen.....	96
Bild 6.2: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über den Gasertrag, 14.000 E.....	108
Bild 6.3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über die Faulgasmenge, 100.000 E	109
Bild 6.4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über spez. Strompreis, 14.000 E.....	111
Bild 6.5: Vergleich der Jahreskostendifferenz bei iterierten Investitionskosten der Faulung	112
Bild 6.6: Fermentersystem Fa. Lipp als Faulraum.....	113

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1: Empfehlungen zur Energieoptimierung bei der Planung von MBR (vgl. MALMS ET AL., 2014)	4
Tabelle 2.2: Empfehlungen zur Energieoptimierung beim Betrieb von MBR (vgl. MALMS ET AL., 2014)	5
Tabelle 3.1: Volumen der Vorklärung, Volumenströme und relevanter Anteil des Q_{PS}	9
Tabelle 3.2: Bemessung der Referenzstraße mit simultaner aerober Schlammstabilisierung	9
Tabelle 3.3: ÜSS-Abzug im Versuchsbetrieb	10
Tabelle 3.4: Zykluszeiten und resultierender Fluss	11
Tabelle 3.5: Übersicht über die Versuchsreihen (VR)	13
Tabelle 3.6: Durchgeführte Analytik (mit Küvettenschnelltests).....	15
Tabelle 3.7: Beurteilung der Entwässerbarkeit des Schlammes anhand des CST	18
Tabelle 3.8: Entnahme der Deckschicht-Proben zur EPS-Bestimmung aus Membranplatten der Versuchs- und Referenzstraße nach Versuchsreihe 4. Die angegebenen Koordinaten beziehen sich jeweils auf die Entfernung der oberen linken Ecke des Ausschnitts von der oberen linken Ecke der Membranplatte.....	20
Tabelle 3.9: Ablauf der Membranreinigung	22
Tabelle 4.1: Organische Belastung der MBR-Straßen ausgedrückt als BSB_5 -Frachten und Einwohnerwerte	25
Tabelle 4.2: Absoluter und einwohnerspezifischer Massenstrom des Primärschlammabzuges in der Versuchsstraße	27
Tabelle 4.3: Trockenrückstand und Glühverlust des Primärschlammes.....	28
Tabelle 4.4: oTR-Massen-Verhältnis von PS und ÜSS im Rohschlamm (insgesamt) und im Input des Faulbehälters	29
Tabelle 4.5: Gaschromatographiemessung	29
Tabelle 4.6: TR und GV des belebten Schlammes im MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 1.....	32
Tabelle 4.7: Tägliche und spezifische Gaserträge aus der Faulung der Überschussschlämme, sowie CH_4 und CO_2 -Anteile im Faulgas in Versuchsreihe 1	37

Tabelle 4.8: Mittelwerte zu TR und GV, sowie der zugehörigen Massenströme in beiden Straßen in Versuchsreihe 1	38
Tabelle 4.9: TR und GV des belebten Schlammes im MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 2.....	44
Tabelle 4.10: Tägliche und spezifische Gaserträge aus der Faulung der Überschuss-schlämme, sowie CH ₄ und CO ₂ -Anteile im Faulgas in Versuchsreihe 2	50
Tabelle 4.11: Mittelwerte zu TR und GV, sowie der zugehörigen Massenströme in beiden Straßen in Versuchsreihe 2	50
Tabelle 4.12: TR und GV des belebten Schlammes im MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 3.....	55
Tabelle 4.13: Nettovolumenströme des Permeatabzuges im MBR der Referenz- und Versuchsstraße für Versuchsreihe 3	59
Tabelle 4.14: Tägliche und spezifische Gaserträge aus der Faulung sowie CH ₄ und CO ₂ -Anteile im Faulgas in Versuchsreihe 3.....	62
Tabelle 4.15: Mittelwerte zu TR und GV, sowie der zugehörigen Massenströme in beiden Straßen in Versuchsreihe 3	62
Tabelle 4.16: TR und GV des belebten Schlammes der MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 4.....	68
Tabelle 4.17: Nettoflüsse der Versuchsstraße für Versuchsreihe 4.....	72
Tabelle 4.18: Tägliche und spezifische Gaserträge aus der Faulung sowie CH ₄ und CO ₂ -Anteile im Faulgas in Versuchsreihe 4.....	78
Tabelle 4.19: Mittelwerte zu TR und GV, sowie der zugehörigen Massenströme in beiden Straßen in Versuchsreihe 4	78
Tabelle 5.1: Zusammenstellung der Ablaufwerte (Mediane) und erreichten Eliminationen in allen Versuchsreihen für Referenz- und Versuchsstraße.....	83
Tabelle 5.2: Übersicht der spezifischen und täglichen Gasproduktion in Versuchsreihe 1 und 2.....	87
Tabelle 5.3: Massenspezifische Gasproduktion für ÜSS, PS und gemeinsame Faulung in den Versuchsreihen 1 bis 4	89
Tabelle 5.4: Einwohnerspezifische und tägliche Gasproduktion der Versuchsreihen mit Prognosewerten für die Reihen 1 und 2	89
Tabelle 5.5: Prozentuale Volumenanteile an CH ₄ und CO ₂ im Faulgas aller Versuchsreihen.....	90

Tabelle 5.6: Vergleich von TR und t_{TS} der Versuchsreihen mit den in EnReMem Phase 1 betrachteten großtechnischen MBR	91
Tabelle 6.1: Beispielhafte Berechnung des Gasertrags anhand der Versuchswerte für Modellanlage 100.000 E, 15 Tage Schlammalter im MBR (Versuchsreihe 4)	94
Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Energiebilanz	96
Tabelle 6.3: Gas und Energiewerte der Referenzstraße	98
Tabelle 6.4: Stromverbrauch und CO ₂ -Äquivalente bei aerober Stabilisierung.....	99
Tabelle 6.5: Stromverbrauch und CO ₂ -Äquivalente bei anaerober Stabilisierung (PS+ÜS) mit VK und t_{TS} = 25 Tage (entspricht VR3)	100
Tabelle 6.6: Stromverbrauch und CO ₂ -Äquivalente bei anaerober Stabilisierung (PS+ÜS) mit VK und t_{TS} = 15 Tage (entspricht VR4)	101
Tabelle 6.7: CO ₂ -Einsparung durch Eigenenergieerzeugung bei anaerober Stabilisierung	101
Tabelle 6.8: Direkte Methanemissionen aus der Schlammbehandlung bei anaerober Stabilisierung	102
Tabelle 6.9: CO ₂ -Einsparung bei anaerober Stabilisierung im Vergleich zur aeroben Stabilisierung	102
Tabelle 6.10: Investitionskosten beider Modellanlagen nach Versuchsreihen.....	103
Tabelle 6.11: Energiebedarf und –kosten (0,15 EUR/kWh).....	105
Tabelle 6.12: Kostenzusammenstellung alle Versuchsreihen beider Modellanalgen.....	106
Tabelle 7.1: Entscheidungsmatrix der Variantenuntersuchung am Beispiel der Modellanlage.....	114
Tabelle A.1: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage - Gasanfall.....	A-1
Tabelle A.2: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage - Stromerzeugung BHKW	A-2
Tabelle A.3: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage - gesamter Energiebedarf	A-2
Tabelle A.4: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage - Gasanfall.....	A-3
Tabelle A.5: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage – Stromerzeugung BHKW	A-4
Tabelle A.6: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage - gesamter Energiebedarf	A-4

Tabelle A.7: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage – Gasanfall	A-5
Tabelle A.8: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage – Stromerzeugung BHKW	A-6
Tabelle A.9: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage - gesamter Energiebedarf	A-6
Tabelle A.10:14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage – Gasanfall	A-7
Tabelle A.11:14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage – Stromerzeugung BHKW	A-8
Tabelle A.12:14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage - gesamter Energiebedarf	A-8
Tabelle A.13:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage – Gasanfall	A-9
Tabelle A.14:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage – Stromerzeugung BHKW	A-10
Tabelle A.15:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage - gesamter Energiebedarf	A-10
Tabelle A.16:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage – Gasanfall	A-11
Tabelle A.17:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage – Stromerzeugung BHKW	A-12
Tabelle A.18:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage - gesamter Energiebedarf	A-12
Tabelle A.19:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage – Gasanfall	A-13
Tabelle A.20:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage – Stromerzeugung BHKW	A-14
Tabelle A.21:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage - gesamter Energiebedarf	A-14
Tabelle A.22:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage – Gasanfall	A-15
Tabelle A.23:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage – Stromerzeugung BHKW	A-16
Tabelle A.24:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage - gesamter Energiebedarf	A-16
Tabelle B.1: Kosten 14.000 E Anlage nach Lawa	B-17
Tabelle B.2: Kosten 100.000 E Anlage nach Lawa	B-17

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	
ATV	abwassertechnische Vereinigung e.V.	
B	Fracht	[g/(E·d)] [kg/d]
BB	Belebungsbecken	
BHKW	Blockheizkraftwerk	
B _R	Raumbelastung im Faulbehälter	[g oTR/(l·d)] oder [kg oTR/(m ³ ·d)]
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf innerhalb von 5 Tagen	[mg/l]
B _{TR}	Schlammbelastung (auf TR bezogen)	[kg BSB ₅ /(kg TR·d)]
B _{TS}	Schlammbelastung (auf TS bezogen)	[kg BSB ₅ /(kg TS·d)]
C _{BSB 5,ZB}	Konzentration des BSB ₅ im Zulauf zum Belebungsbecken	[mg/l]
CH ₄	Methan	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg/l]
CST	Capillary Suction Time (Kapillare Fließzeit)	[s]
DN	Denitrifikation	
DOC	dissolved organic carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)	
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.	
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.	
E	Energiebedarf/ -verbrauch	kWh/m ³ kWh/(E·a)
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	
EPS	Extrazelluläre polymere Substanzen	
EW	Einwohnerwert in Einwohnern (E)	[E]
FB	Faulbehälter	
FHM	Flockungshilfsmittel	
g	Erdbeschleunigung: 9,81 m/s ²	[m/s ²]
GK	Größenklasse	
GR	Glührückstand	[%]

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
GV	Glühverlust	[%]
H ₂	Wasserstoff	
HRT	Hydraulische Aufenthaltszeit (engl.: Hydraulic retention time)	[h]; [min]
HSG	Hochschulgruppenansatz	
HtK	Halbtechnische Kläranlage hier: HtK Neuss des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)	
IBC (KTC)	Intermediate Bulk Container (Kubischer Tank-Container)	
ISV	Schlammvolumenindex	[ml/g]
KA	Kläranlage	
KW	Kalenderwoche	
MBR	Membranbioreaktor	
MID	Magnetisch-Induktive Durchflussmessung	
M _{TR}	Feststoffmassenstrom	[kg/d]; [g/d]
n	Anzahl Messwerte	[-]
N ₂ O	Distickstoffmonoxid/ Lachgas	
NaClO	Natriumhypochlorit	
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff	[mg/l]
NO ₂ -N	Nitritstickstoff	[mg/l]
NO ₃ -N	Nitratstickstoff	[mg/l]
O ₂	Sauerstoff	
oTR	Organischer Trockenrückstand	[g/l]
oTS	Organischer Trockensubstanzgehalt	[g/l]
p	Druck	[bar]
P	Phosphor	[mg/l]
P	Leistungsaufnahme	[kW]
PBS	Phosphat-gepufferte Salzlösung (engl.: phosphate buffered saline)	
ProM	„Prozessoptimierung von Membranbelebungsanlagen“ vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz gefördertes Forschungsvorhaben, das am ISA bearbeitet wurde	
PS	Primärschlamm	
Q	Volumenstrom	[m ³ /d]; [l/d]
q	Oberflächenbeschickung	[m/h]

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
$Q_{BB,Zu}$	Volumenstrom im Zulauf des Belebungsbeckens (entspricht Q_{Zu} für die Referenzstraße)	[m ³ /d]; [l/d]
Q_{PS}	Volumenstrom des Primärschlammabzuges	[m ³ /d]; [l/d]
$Q_{Überlauf}$	Volumenstrom im Überlauf der Vorklärung	[m ³ /d]; [l/d]
$Q_{ÜS}; Q_{ÜSS}$	Volumenstrom des Überschussschlammabzuges	[m ³ /d]; [l/d]
Q_{Zu}	Volumenstrom im Zulauf der Straßen (Zulauf Vorklärung der Versuchsstraße, Zulauf MBR der Referenzstraße)	[m ³ /d]; [l/d]
rpm	Umdrehungen pro minute (engl.: rounds per minute)	[min ⁻¹]
RRB	Regenrückhaltebecken	
RS	Rücklaufschlamm	
RW	Richtwert	
SFI	Schlammfiltrationsindex	[s/%-TR]
SMP	Soluble microbial products	
$S_{NO_3,D}$	Zu denitrifizierender Nitratstickstoff	[mg/l]
T	Temperatur	[°C] oder [K]
TM	Trockenmasse	[g]
TMP	Transmembrandruck (engl.: Transmembrane pressure)	[mbar]
TR	Trockenrückstand	[g/l]
%TR	Trockenrückstand in Massenprozent	[%]
TS	Trockensubstanzgehalt	[g/l]
t_{TS}	Schlammalter	[d]
t_{VK}	Aufenthaltszeit in der Vorklärung	[h]
$Ü_{d,C}$	Tägliche Schlammproduktion aus der Kohlenstoffelimination	[kg/d]
ÜSS; ÜS	Überschussschlamm	
ÜW	Überwachungswert	
v	Fluss	[L/(m ² ·h)]
V	Volumen	[m ³]
V_{BB}	Volumen des Belebungsbeckens	[m ³]; [l]
V_D	Für Denitrifikation genutztes Volumen des Belebungsbeckens	[m ³]; [l]
VK; VKB	Vorklärung; Vorklärbecken	
V_{VK}	Volumen der Vorklärung	[m ³]; [l]

1 Veranlassung und Zielsetzung

Membranbioreaktoren (MBR) bieten in der kommunalen Abwasserreinigung gegenüber dem konventionellen Belebtschlammverfahren Vorteile aufgrund besserer Ablaufwerte für gängige Abwasserparameter und des weitgehend keimfreien Ablaufs. Aufgrund der energieintensiven Cross-Flow-Belüftung zur Deckschichtkontrolle, welche aktuell 50 % des Energiebedarfs kommunaler MBR ausmacht, ist der Gesamtenergiebedarf von MBR im Vergleich zum konventionellen Belebtschlammverfahren deutlich erhöht und liegt in NRW zwischen 49 kWh/(E·a) und 208 kWh/(E·a). Dies entspricht 0,73 kWh/m³ bis 1,83 kWh/m³. Die Grundlage für diese Zahlen bilden dabei sieben von PINNEKAMP ET AL. (2011A) untersuchte MBR.

PINNEKAMP ET AL. (2011A) und KREBBER (2014) konnten zeigen, dass bei angepasster Betriebsführung und Durchführung gezielter Optimierungsmaßnahmen ein hohes Einsparpotential vorliegt. So ließen sich allein durch die Anpassung der Cross-Flow-Belüftung 0,18 kWh/m³ einsparen. Durch die Realisierung des Sauerstoffeintrags mit feinblasiger Belüftung konnte zusätzlich 0,12 kWh/m³ eingespart werden. Weitere Optimierungsmaßnahmen sind in den Quellen zu finden. Insgesamt berechnete KREBBER (2014) bei der Auslegung einer 12.000 E Modellanlagen unter Berücksichtigung der Energieeinsparpotentiale einen Energiebedarf von 0,64 kWh/m³ bzw. 40,7 kWh/(E·a) für Membrananlagen mit Plattenmodulen. Dies liegt im Bereich der Energieverbrauchswerte von konventionellen Kläranlagen der Größenklasse 3 mit 40 kWh/(E·a) und etwa 15 % oberhalb der 35 kWh/(E·a) für Größenklasse 4 (HABERKERN ET AL., 2008).

Der Fokus dieser Forschungsarbeit liegt auf der kosteneffizienten Bereitstellung der benötigten Energie durch die Nutzung des im Klärschlamm enthaltenen Energiepotentials. Die Umstellung des Membranbelebungsverfahrens auf eine anaerob stabilisierende Fahrweise mit Vorklärung wurde im Abschlussbericht zu „Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen - Phase 1“ (EnReMem) durch PINNEKAMP ET AL. (2011B) anhand zweier Modellanlagen mit 14.000 E und 100.000 E Anschlussgröße bereits theoretisch betrachtet. Die Berechnungen des Energieertrags stützen sich dabei auf Literaturwerte aus großtechnischen Faulbehältern an konventionellen Kläranlagen, da keine verwertbaren Ergebnisse für Schlämme aus MBR vorlagen.

Die wesentlichen Ziele der Untersuchungen in Phase 2 waren die Ermittlung von Gasausbeuten aus MBR-Schlämmen im Pilotmaßstab bei Variation der relevanten Betriebsparameter und Implementierung einer Vorklärung unter Berücksichtigung der Filtrationsleistung. Dazu wurden Versuche auf der Halbtechnischen Kläranlage (HtK) des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) durchgeführt. Die Ergebnisse der halbtechnischen Untersuchungen flossen in die in

Phase 1 aufgestellte Planungshilfe in Form einer Entscheidungsmatrix ein, die unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Gesichtspunkte bei der zukünftigen Planung kommunaler MBR Verwendung finden kann. Die Arbeiten gliederten sich in die folgenden Unterziele:

- Ermittlung der Gasausbeuten von Primär- und Überschussschlämmen (ÜSS) unter verschiedenen Betriebsbedingungen eines halbtechnischen MBR
- Überwachung der Schlammeigenschaften und der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Membranstufe des halbtechnischen MBR
- Überwachung der Reinigungsleistung des MBR, bzw. der Kombination MBR und Vorklärung
- Bestimmung der Entwässerungseigenschaften vor und nach anaerober Stabilisierung der Schlämme
- Fortführung der Energie- und Kostenbetrachtungen am Beispiel der Modellanlagen, welche anhand der Versuchsergebnisse und in Anlehnung an das Arbeitsblatt DWA-A 216 (2011) aktualisiert wurden
- Anpassung der CO₂-Bilanz aus Phase 1 anhand der halbtechnisch gewonnenen Daten
- Aktualisierung der Entscheidungsmatrix anhand der gewonnenen Daten.

Es wurde erwartet, dass sich mit sinkendem Schlammalter der Anteil an nicht stabilisierter organischer Trockenmasse erhöht, welche im ÜSS verbleibt und somit in der anaeroben Stabilisierungsstufe zu Biogas umgesetzt werden kann.

2 Kenntnisstand

2.1 Ergebnisse aus Projektphase 1

Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen in Phase 1 des Forschungsvorhabens wurden ausführlich in einem gesonderten Abschlussbericht dargelegt [PINNEKAMP ET AL, 2011B]. Diese umfassten eine Literaturrecherche, Versuche zur Bestimmung des Gasertrages und der Entwässerungseigenschaften von Schlämmen aus MBR-Anlagen und Referenzschlämmen im Labormaßstab sowie theoretische Betrachtungen zu Energie-, CO₂- und Kostenbilanzen anhand einer Modellanlage.

Zwischen den MBR-Schlämmen und Schlämmen konventioneller Anlagen mit hohem Schlammalter konnte kein Unterschied in der Höhe des Gasertrages oder des Methangehaltes festgestellt werden. Die absolute Höhe der Gaserträge konnte hierdurch noch nicht angegeben werden, da durch den kleinen Versuchsmaßstab und die Durchführung im Batch auch für die Referenzschlämme alle erzielten Werte hinter Literaturwerten zurückblieben. Insgesamt gab es keine Hinweise, dass MBR-Schlämme, vor allem in Verbindung mit Primärschlamm (PS), keinen wertvollen Beitrag zur Gasbildung in einer anaeroben Faulung leisten könnten.

Die Entwässerbarkeit wurde mittels der kapillaren Fließzeit (CST) untersucht. Auch hierbei ergaben sich im Labormaßstab keine Unterschiede zwischen den MBR-Schlämmen und den Schlämmen einer konventionellen Stufe mit hohem Schlammalter. Verbesserungen ergaben sich durch die Faulung.

Energiebilanzen wurden für Modellanlagen mit den Anschlussgrößen 100.000 E und 14.000 E jeweils mit und ohne den Komplex Vorklärung/Faulung erstellt. Hierbei ergaben sich energetische Vorteile für die Varianten mit anaerober Schlammstabilisierung. Wurde zusätzlich die Energieproduktion durch die Verstromung des anfallenden Faulgases berücksichtigt, wurde der Unterschied noch signifikanter.

Aufbauend auf den Modellanlagen wurden CO₂-Bilanzen hinsichtlich des Energieaufwandes für die Abwasser- und Klärschlammbehandlung unter Berücksichtigung von direkten Methanemissionen aus den anaeroben Prozessabschnitten aufgestellt. Hierbei ergaben sich auch aus ökologischer Sicht Vorteile für die Varianten mit Vorklärung/Faulung.

Eine Kostenabschätzung und –vergleichsbetrachtung ergab für die größere Modellanlage durch die Einführung von Vorklärung/Faulung einen wirtschaftlichen Vorteil. Bei der kleineren Modellanlage stiegen die Jahreskosten durch diese Maßnahmen leicht an.

Die Auswirkungen auf Schlammfiltrierbarkeit und Membranfouling, welche sich durch die Implementierung einer Vorklärung und durch Veränderung der Betriebseinstellungen zur

Erhöhung des in die Faulung eingetragenen organischen Materials ergeben, wurden bisher ausschließlich im Rahmen einer Literaturstudie untersucht. Tendenziell scheinen sich ein hohes Schlammalter und eine geringe Schlammbelastung günstig auszuwirken. Da die Einflussfaktoren jedoch komplex zusammenhängen, kann allein auf Grundlage der Literaturrecherche keine abschließende Beurteilung abgegeben werden.

2.2 Empfehlungen zur Bemessung und einem energieeffizienten Betrieb von Membranbioreaktoren

Im Rahmen der halbtechnischen Versuche konnten keine gesicherten Daten zur möglichen Energieeinsparung durch den optimierten Betrieb eines MBR gewonnen werden. Dort ist aber großes Potential zur Kosteneinsparung gegeben. Aus diesem Grund werden hier die Ergebnisse des Projektes „Prozessoptimierung bei Membranbelebungsanlagen“ (PINNEKAMP ET AL., 2011A), in dessen Verlauf mehrere großtechnische MBR auf ihr energetisches Optimierungspotential hin untersucht wurden, nach MALMS ET AL. (2014) kurz zusammengefasst (Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2).

Tabelle 2.1: Empfehlungen zur Energieoptimierung bei der Planung von MBR (vgl. MALMS ET AL., 2014)

Planung	Allgemeine Planung
	<ul style="list-style-type: none"> • Bei der Planung sollte die Möglichkeit vorgesehen werden, Prozessparameter flexibel einzustellen. Dies ermöglicht die Anpassung an sich ändernde Randbedingungen und vereinfacht die Berücksichtigung neuer Erkenntnisse. • Eine eindeutige Empfehlung für eine integrierte Anordnung der Membranen in den Nitrifikationsbereich der Belebungsbecken oder in separaten Membrankammern konnte nicht gegeben werden. Bei Umbau bestehender Anlagen und Nutzung vorhandener Becken sind oftmals separate Membrankammern die einzige realisierbare Lösung. Im Einzelfall muss entschieden werden, ob die betrieblichen Vorteile die energetischen Nachteile einer separaten Anordnung überwiegen. • Aufgrund der Auslegung der Membranen auf den maximalen Anlagenzufluss sollte dieser nach Möglichkeit reduziert werden. MBR bieten sich demnach vor allem im Trennsystem an. Im Rahmen eines wasserwirtschaftlichen Gesamtkonzeptes ist es u.U. sinnvoll, das Kanalnetz zu sanieren, um unnötige Fremdwasserzuflüsse zu reduzieren sowie eine gezielte Bewirtschaftung zur Aktivierung von Puffervolumen zu betreiben. • Der spezifische Stromverbrauch nimmt mit steigender hydraulischer Anlagenauslastung ab. Diese ist jedoch bei den untersuchten MBR mit im Mittel 14 % bis 35 % eher gering. Somit ist eine Betriebsführung, die die Menge des Anlagenzulaufs berücksichtigt, energetisch sinnvoll. Es sollte daher eine Anpassung des Filtrationsgeschehens an den Anlagenzufluss zum optimalen Einsatz energieintensiver Aggregate stattfinden. Korrelieren die Laufzeiten der Aggregate mit der hydraulischen Auslastung der Anlage, ist dies ein Hinweis auf energieorientierte Betriebsweise.

In der Planung (siehe Tabelle 2.1) sind demnach hauptsächlich Anpassungen im Anlagenzufluss (Trennsystem, Fremdwasserminimierung) vorteilhaft, um den Gesamtenergiebedarf zu senken. Dies hat den Hintergrund, dass die Membranfläche auf den maximalen Fluss ausgelegt wird und sich innerhalb des Projektes „ProM“ zeigte, dass ein Betrieb bei geringerer genutzter Membranfläche, aber höherem Fluss energetische

Vorteile bietet (siehe Tabelle 2.2). Zudem spiegelt sich die Auslegung auf einen geringeren Abwasserzufluss positiv in den Investitionskosten wieder.

Tabelle 2.2: Empfehlungen zur Energieoptimierung beim Betrieb von MBR
(vgl. MALMS ET AL., 2014)

Betrieb	Fluss
	<ul style="list-style-type: none"> • Der Betrieb eines MBR mit möglichst hohem Fluss (bis zum vom Modultyp abhängigen Bemessungsfluss) ist aus energetischer Sicht vorteilhaft, da die energieintensive Membranbelüftung optimal ausgenutzt wird. Die ermittelten mittleren Nettoflüsse liegen bei den untersuchten MBR zwischen 11,3 und 30,4 L/(m²·h), so dass auf einigen Anlagen eine Steigerung des Flusses möglich ist.
	Belüftung
	<ul style="list-style-type: none"> • Die grobblasige Membranbelüftung sollte in keinem Fall zum primären Zweck des Sauerstoffeintrags aktiviert werden, sondern ausschließlich zur Begrenzung der Deckschicht während der Filtration. • Die Begrenzung der Zwangsbelüftung auf das minimal erforderliche Maß wird empfohlen. Hierzu sollte(n) die aktive(n) Membrankammer(n) oft, möglichst nach jedem Filtrationsintervall, gewechselt werden. • Die Intensität der Membranbelüftung ist zu prüfen, um eine Überbelüftung zu verhindern und ggfs. durch Frequenzumformung den Erfordernissen anzupassen.
	Filtration
	<ul style="list-style-type: none"> • Die Anzahl der filtrierenden Module soll an den Zufluss angepasst werden. • Um den aus energetischer Sicht nicht sinnvollen Abbruch eines Filtrationszyklus zu vermeiden, sollte vor Filtrationsbeginn genügend Abwasser für einen vollständigen Filtrationszyklus gespeichert werden. • Wenn Gravity Flow von den topographischen Gegebenheiten her möglich ist, sollte dieser eingesetzt werden.
	Allgemeiner Betrieb
	<ul style="list-style-type: none"> • Der externe Rezirkulationsstrom sollte aus energetischer Sicht auf ein sinnvolles Maß begrenzt und möglichst an den Anlagenzufluss angepasst werden. • Bei der Betriebsteuerung ist zu berücksichtigen, dass meist der Vollastbetrieb eines Aggregates energetisch sinnvoller ist als ein Teillastbetrieb mehrerer. Wenn die Möglichkeit besteht, sollten FU-geregelte Aggregate hochgeschaltet werden, anstatt ein weiteres gedrosseltes Aggregat hinzuzuziehen. • Rührwerke sollten an den tatsächlichen Bedarf an Umwälzung und Durchmischung angepasst werden. • Energetisch sinnvoll ist es, den TS-Gehalt unter Rücksicht auf die Reinigungsleistung zu senken und eventuell an eine Jahresganglinie der Temperatur anzupassen. • Zur Senkung des Sauerstoffsbedarfs kann bei einigen Anlagen das Schlammalter (von z.T. über 100 d) gesenkt werden. Zur Wahl des Schlammalters sollten unter Berücksichtigung des Erhalts guter Filtrationsfähigkeit die Anforderungen an den Stabilisierungsgrad durch einzelfallspezifische Schlammensorgungskonzepte definiert werden. • Relaxationsphasen können unter Berücksichtigung der kompletten Reinigungsstrategie anstelle von Rückspülungen in das Konzept des Filtrationsbetriebs implementiert werden. • Wenn Temperatur und Schlammigenschaften günstige Bedingungen für die Filtration zulassen, sollte hierauf reagiert werden und höhere Flüsse, geringere Belüftung oder die Relaxation statt Rückspülung umgesetzt werden.

3 Material und Methoden

Gegenüber der zunächst geplanten Vergleichsbetrachtung einer MBR-Straße zu einer Referenzstraße mit konventioneller Belebungsstufe war ein zweistraßiger Betrieb mit einer MBR-Versuchsstraße und einer MBR-Referenzstraße möglich. In der MBR-Referenzstraße wurden übliche Betriebsparameter bezüglich Schlammalter, Schlammbelastung und TR eingestellt und über alle vier Versuchsreihen beibehalten. Änderungen in der Zusammensetzung des Zulaufs, der Temperatur u. ä. wirken gleichermaßen auf beiden Straßen, so dass der direkte Vergleich zwischen den beiden MBR-Straßen für Permeabilität, Schlammeigenschaften, Ablaufqualität und Gasertrag trotz der wechselnden Randbedingungen gezogen werden kann.

3.1 Versuchsaufbau

In Bild 3.1 ist das Fließbild einer der beiden MBR-Straßen abgebildet, die im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen eingesetzt wurden. Eine genaue Darstellung beider MBR Straßen befindet sich in Anhang D. Die Referenzstraße wurde über den kompletten Zeitraum mit den gleichen Betriebseinstellungen gefahren: Es wurde keine Vorklärung (VK) betrieben, ein hoher TS-Gehalt und ein hohes Schlammalter wurden eingestellt. Die andere MBR-Straße wurde für die Versuche herangezogen (Versuchsprogramm siehe Kapitel 3.2).

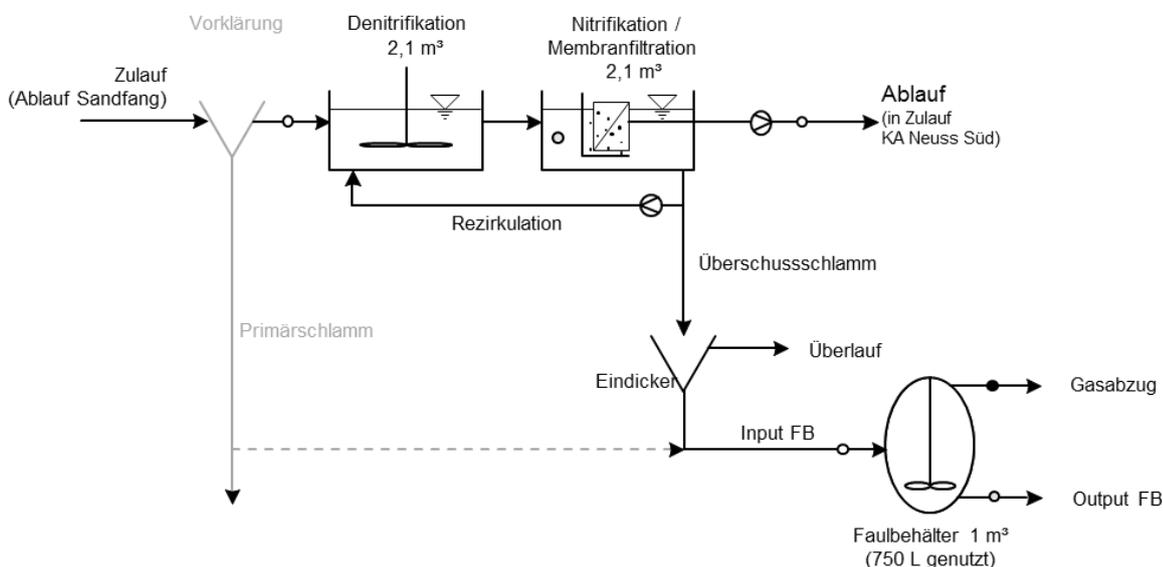


Bild 3.1: Verfahrensprinzip der halbtechnischen MBR auf der HtK Neuss des LANUV (in hell grau ist die Vorklärung abgebildet, die nur in der Versuchsstraße eingesetzt wurde)

Die Straßen wurden mit kommunalem Abwasser aus dem Ablauf des Sandfangs der Kläranlage Neuss-Süd beschickt. Der Referenzstraße war ein gerührter Pegelbehälter vorgeschaltet, so dass sich keine Abwasserinhaltsstoffe absetzen konnten. Bei der MBR-Versuchsstraße wurde der Pegelbehälter nicht gerührt und fungierte als Vorklärbecken

(VKB). Beide MBR-Straßen sind mit vorgeschalteter Denitrifikation ausgelegt. Die Membranmodule befinden sich in den Nitrifikationsbecken. Versuchs- und Referenzstraße wurden auf vorhandene Beckenvolumina hin bemessen (siehe Kapitel 3.1.2). Die Schlammfäulung (Kapitel 3.1.3) wurde mit einem Teilstrom des anfallenden Schlammes betrieben.

3.1.1 Auslegung der Vorklärung

Die Dimensionierung der Vorklärung nach den allgemein gültigen Bemessungsgrundlagen war aufgrund des halbtechnischen Versuchsmaßstabes nicht möglich. Nach DIN EN 12255-4 (2002) und DIN 19552 (2002) werden für vertikal durchströmte Rundbecken Mindestwassertiefen von 2 m bei Beckendurchmessern von 20 m angegeben.

Die halbtechnische Auslegung erfolgte nach Erfahrungswerten und wurde zusätzlich durch die durchgeführte Analytik überprüft. Zur Begrenzung der hydraulischen Aufenthaltszeit (HRT) im Behälter unter gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer ausreichenden, durchströmten Beckenhöhe war eine Überbeschickung der Vorklärung notwendig. Die tatsächliche hydraulische Aufenthaltszeit im Behälter war mit 5,3 h (in Versuchsreihe 1 bis 3) im Vergleich zu den Anhaltswerten nach ATV-DVWK-A 131 (2000) deutlich erhöht (siehe Bild 3.2). Das Ziel der Auslegung war eine Vergleichbarkeit der Reinigungsleistung in Bezug auf die organischen Summenparameter (CSB, BSB₅) mit einer großtechnischen Vorklärung mit einer Aufenthaltszeit von $t_{VK} = 0,5$ bis 1,0 h.

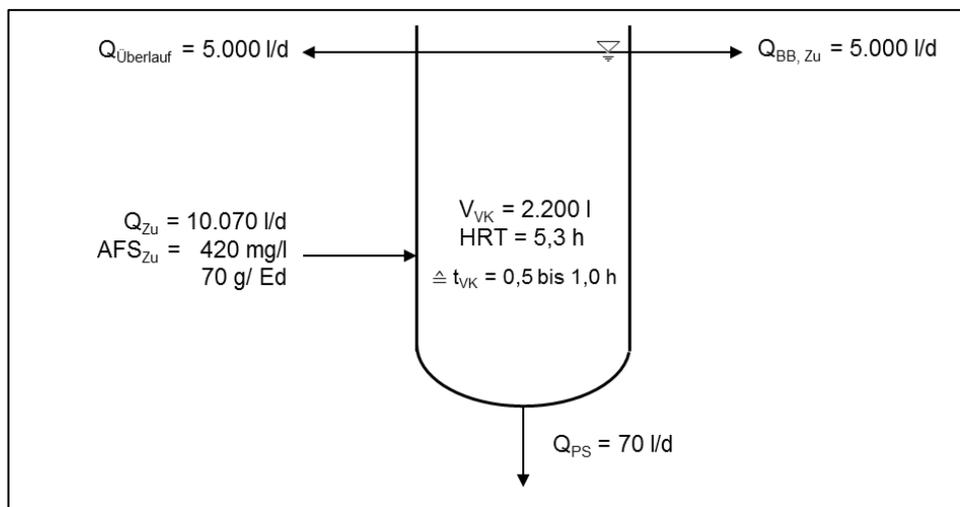


Bild 3.2: Volumenströme und Aufenthaltszeit in der Vorklärung (Versuchsreihen 1 und 2)

Für die Bestimmung des Primärschlammmanfalls im Vorklärbecken ist dementsprechend die tatsächliche Abwassermenge im Zulauf des MBR zu berücksichtigen. Der effektiv für die Versuchsstraße zu berücksichtigende Zulaufvolumenstrom zur Vorklärung ergibt sich zu $Q_{VK,Zu} = 5.035$ l/d nach folgender Volumenstrombetrachtung aus Bild 3.2 nach Gleichung 3-1.

$$Q_{VK,Zu} = Q_{Zu} - Q_{\text{Überlauf}} - (1 - x_{PS}) \cdot Q_{PS} = Q_{BB,Zu} + x_{PS} \cdot Q_{PS} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

$Q_{BB,Zu}$:	Zufluss zum Belebungsbecken
Q_{PS}	:	Mittlerer täglicher Primärschlammabzug
$Q_{\text{Überlauf}}$:	Abfluss des Vorklärbeckens über Überlauf
Q_{Zu}	:	Gesamtzufluss zum Vorklärbecken
$Q_{VK,Zu}$:	Effektiv für die Versuche zu berücksichtigender Anteil von Q_{Zu}
x_{PS}	:	Anteil Q_{PS} relevant (siehe Tabelle 3.1)

Der Primärschlammabzug erfolgte zunächst (Versuchsreihe 1 und 2) zweimal wöchentlich zu insgesamt 500 l/wo (\cong 70 l/d). Es wurde jedoch festgestellt, dass aufgrund der Bauform des verwendeten Behälters erhebliche Rückstände an dessen Seitenwänden vorhanden waren, welche schlussendlich bis zur Verblockung des Schlammabzuges hätten führen können. In Versuchsreihe 3 wurde daher der abgezogene Volumenstrom auf 1.500 l/wo (\cong 215 l/d) bei 300 l/Werktag erhöht, wobei weiterhin zweimal wöchentlich eine TR-Bestimmung stattfand. Der Abzug der Rückstände im Becken verbesserte sich hierdurch.

Aufgrund des schwankenden TR des Primärschlammes war die Ermittlung des insgesamt entnommenen Massenstromes bei täglicher Entnahme und zweimal wöchentlicher Bestimmung stark fehlerbehaftet. Zusätzlich sind die allgemeinen Schwierigkeiten der genauen Messung des TR aufgrund der stark heterogenen Eigenschaften des PS zu nennen. In Versuchsreihe 4 erfolgte einmal wöchentlich eine Homogenisierung und vollständige Entleerung des Vorklärbeckens (2.400 l/wo \cong 343 l/d) bei Unterbrechung des Filtrationsbetriebes. Somit konnte in Versuchsreihe 4 der gesamte Primärschlammfall innerhalb einer Woche mit einer TR-Messung bestimmt werden. Die sich durch die im Laufe des Versuchsbetriebs veränderte Betriebsweise eventuell ergebenden Veränderungen im Primärschlammstrom und in seinem organischen Anteil werden in Kapitel 4.2.2 erläutert. Die relevanten Volumenströme ergeben sich nach der oben aufgeführten Volumenstrombetrachtung und sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Für Versuchsreihe 4 war der Volumenstrom zum Belebungsbecken der Versuchsstraße aus in Kapitel 3.1.2 genannten Gründen erhöht.

Tabelle 3.1: Volumen der Vorklärung, Volumenströme und relevanter Anteil des Q_{PS}

Versuchsreihe	V_{VK}	Q_{Zu}	t_{VK}	$Q_{VK,Zu}$	$Q_{BB,Zu}$	$Q_{Überlauf}$	Q_{PS}	Anteil Q_{PS} relevant
	l	l/d	h	l/d	l/d	l/d	l/d	%
Reihe 1	2.200	10.070	5,2	5.035	5.000	5.000	70	50
Reihe 2	2.200	10.070	5,2	5.035	5.000	5.000	70	50
Reihe 3	2.200	9.960	5,3	4.853	4.745	5.000	215	50
Reihe 4	2.400	15.972	3,6	10.855	10.629	5.000	343	66

Als relevanter Anteil des Q_{PS} (x_{PS}) ist dabei der rechnerisch für die Versuchsstraße zu berücksichtigende Primärschlammfall zu verstehen (vergleiche Kapitel 4.2.2).

3.1.2 Dimensionierung der Belebung

Die Dimensionierung der MBR-Straßen erfolgte bei gegebenen Beckenvolumina ($V_D = V_N = 2.000 l$) und einer Bemessungstemperatur von $15^\circ C$ durch Berechnung des benötigten Volumenstroms. Hierzu wurde der BSB-Ansatz nach ATV-DVWK-A 131 unter Beachtung der besonderen Bemessungsgrundlagen für MBR verwendet (PINNEKAMP, 2006). Das Ziel war dabei eine rechnerische Bemessung auf einen Einwohnerwert von 30 E bezogen auf die BSB₅-Fracht im Zulauf.

Tabelle 3.2: Bemessung der Referenzstraße mit simultaner aerober Schlammstabilisierung

Bemessungsgrößen			Dimensionierung	
BSB ₅ im Zulauf BB	$C_{BSB\ 5,ZB}$	360 mg/l	$S_{NO_3,D}/C_{BSB,ZB}$	0,133
Volumenstrom im Zulauf BB	Q_{Zu}	5.000 l/d	$V_D/V_{BB, gewählt}$	0,5
Tägliche BSB ₅ Fracht	$B_{d,BSB5}$	1,80 kg/d	$t_{TS, gewählt}$	25 d
Einwohnerwerte	EW	30 E	$\ddot{U}_{S,d,C}$	1,74 kg TS/d
TS-Konzentration Zulauf BB	$X_{TS,ZB}$	420 mg/l	$V_{BB,konv,12g\ TS/l}$	3.620 l
Zu denitrifizierende Nitratfracht	$S_{NO_3,D}$	47,8 mg/l	$V_{BB, MBR}$	4.200 l
			$Q_{\ddot{U}S,d}$	170 l/d

Prüfkriterien		Raumbelastung	Schlammbelastung
$V_{MBR,ges} < 1,5 \cdot V_{BB,konv,12g\ TS/l}$	$t_{hydraulisch} > 6\ h$	kg BSB ₅ /(m ³ ·d)	kg BSB ₅ /(kg TS·d)
4.200 l < 1,5 · 3620 l	20,2 h	0,430	0,040

Die Beckengrößen der Denitrifikation und der Nitrifikation bzw. der Membranbelebung betragen je 2,1 m³. Das Schlammalter wurde in der Referenzstraße zu 25 d gewählt (siehe Kapitel 3.1). Das Rücklaufverhältnis in die Denitrifikation wurde zu $RV = 2$ eingestellt. Die Membranbelebung der Versuchsstraße wurde in den Versuchsreihen 1 bis 3 mit dem gleichen Volumenstrom wie die Referenzstraße unter Berücksichtigung des Primärschlammabzuges in der Vorklärung beschickt (siehe Tabelle 3.1). Der ÜSS-Abzug in beiden Straßen ist in Tabelle 3.3 für die jeweilige Versuchseinstellung aufgetragen.

Tabelle 3.3: ÜSS-Abzug im Versuchsbetrieb

MBR	ÜSS-Abzug (l/d)			
	Reihe 1	Reihe 2	Reihe 3	Reihe 4
Referenzstraße	160	160	160	160
Versuchsstraße	160	280	160	280

Es wurden Membranplatten vom Typ EK 400 der Firma Kubota mit einer mittleren Porengröße von 0,2 µm verwendet. Jeweils 12 Membranplatten mit einer Größe von 1,00 m Höhe und 0,50 m Breite waren in einem Rack (siehe Bild 3.3) mit einem Plattenabstand von 0,7 cm eingefasst. Im Aufströmkanal von 0,5 m Höhe waren die beiden Belüfterstränge mit ½ Zoll PE-Leitungen installiert. Diese wiesen Löcher von 5 mm im Abstand von 5 cm auf. Dieser Aufbau ist eng angelehnt an den Kubota-Modultyp H3-510.

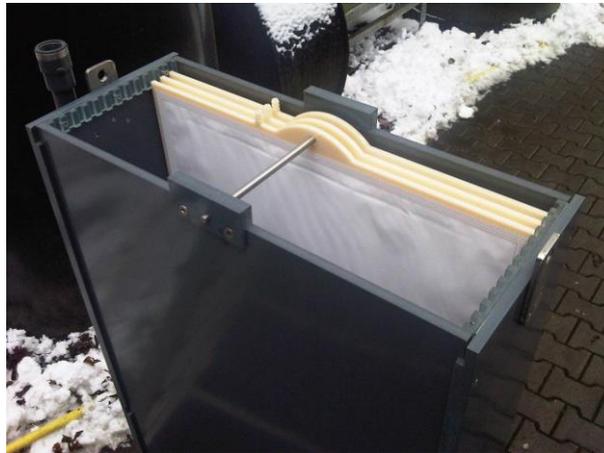
**Bild 3.3: Racks zur Einfassung der Membranmodule**

Bild 3.4 zeigt einen Blick in die Nitrifikation mit eingebautem Membranmodul. Vor dem Einsatz waren die Membranen bereits in einem vorherigen Forschungsprojekt verwendet und anschließend nach den Vorgaben von Kubota gereinigt und trocken gelagert worden. Die Aktivierung der Membranen erfolgte durch eine Behandlung mit Ethanol vor dem Einbau. Aufgrund der vorherigen Beanspruchung ist dennoch von z. T. irreversiblen Fouling bei diesen Membranen auszugehen. Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse ist dieser Umstand zu berücksichtigen.



Bild 3.4: Blick in die Nitrifikation/ Membranfiltration

Die MBR-Straßen wurden mit einem konstanten Fluss, also mit variablem Transmembrandruck (TMP) betrieben. Der Nettofluss errechnet sich aus dem eingestellten Filtrationszyklus zu $16,7 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Die Zykluszeiten, sowie der Brutto- und Nettofluss sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

Tabelle 3.4: Zykluszeiten und resultierender Fluss

	Versuchsreihe	
	1 – 3 (+ Referenzstraße bei allen Versuchsreihen)	4
Volumenstrom (brutto)	240 l/h	480 l/h
Membranoberfläche	$12 \cdot 1 \text{ m}^2$	$24 \cdot 1 \text{ m}^2$
Fluss (brutto)	$20 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	
Filtrieren	300 s	
Pause	60 s	
Zyklen	6 h^{-1}	
Fluss (netto)	$16,7 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	
Volumenstrom (netto)	200 l/h	400 l/h

In Versuchsreihe 4 wurde der Permeatvolumenstrom in der Versuchsstraße zugunsten eines gesteigerten TR-Gehalts im Belebungsbecken beim Betrieb mit $t_{\text{TS}} = 15 \text{ d}$ auf 400 l/h verdoppelt. Die dazu benötigte Erhöhung der Membranoberfläche von 12 auf 24 m^2 ist in Tabelle 3.4 dargestellt. Zur Beibehaltung des MBR-Volumens wurde der Füllstand im MBR – und somit auch in der Vorklärung (Tabelle 3.1) – erhöht.

Die Filtration erfolgte mit Hilfe einer Permeatpumpe in einen etwa 5 l fassenden Permeatbehälter, aus welchem die Probenahme realisiert wurde. Der Druck wurde mittels einer saugseitigen Unterdruckmessung überwacht.

3.1.3 Schlammfäulung

Der während der Versuche anfallenden ÜSS und der Primärschlamm wurden statisch eingedickt. Hierbei wurden zunächst Intermediate Bulk Container (IBC) mit 600 Liter Volumen verwendet. Bei den Versuchsreihen 3 und 4 standen für die Überschussschlämme Eindicker mit einem nutzbaren Volumen von jeweils 160 l zur Verfügung. In der Versuchsstraße werden Primärschlamm und ÜSS je nach Versuchseinstellung einzeln oder gemeinsam einer anaeroben Schlammfäulung zugeführt. In der Referenzstraße wird der anfallende ÜSS gefault; eine vorherige Abtrennung von Primärschlamm findet nicht statt. Bild 3.5 zeigt einen Faulbehälter, der in den halbtechnischen Versuchen Verwendung fand.



Bild 3.5: Faulgasbehälter für die halbtechnischen Versuche

Die Faulbehälter (FB) waren mit Rührwerken und einer zusätzlichen externen Umwälzung mit Wärmetauscher zur Schlammaufheizung auf 35 - 36 °C versehen. Die Faulbehälter mit einem jeweiligen Gesamtvolumen von 1.000 l wurden werktags einmal am Tag manuell mit jeweils 50 l Schlamm beschickt (= 250 l pro Woche). Dies entspricht einem Schlammalter von 21 d bei Nutzung von 750 l des Faulbehältervolumens. Der obere Teil der Faulbehälter stand als Gassammelraum zur Verfügung.

Aufgrund des Aufbaus der halbtechnischen Anlage musste die Entnahme von ausgefaultem Schlamm vor der Zugabe von Rohschlamm in die Faulbehälter geschehen, um das Ansaugen von Umgebungsluft durch die Gasleitung zu verhindern. Die Vorgehensweise einer Befüllung und Entnahme ist hier kurz erläutert. Während der werktäglichen Befüllung des Faulbehälters mit Rohschlamm wurde das verdrängte Gasvolumen mit Hilfe eines Gassacks aufgefangen. Der Abzug des gefaulten Schlammes erfolgte etwa 30 min nach Zugabe des Rohschlammes, um eine ausreichende Zeit zur Durchmischung mit Hilfe der internen Umwälzung zu gewährleisten. Dabei wurde das bei der Befüllung in den Gassack verdrängte Gas wieder dem Behälter zugegeben. Durch

diese Vorgehensweise konnte zudem eine Verfälschung der Gasvolumenstrom-Messung verhindert werden, da ansonsten ein Mehrbetrag von 50 l Gas je Werktag aufgetreten wäre.

In den Versuchseinstellungen mit gemeinsamer Faulung von Primärschlamm und ÜSS (vgl. Tabelle 3.5) wurde das Mischungsverhältnis von PS und ÜSS bezogen auf den TR vor Beginn der Versuchsreihen 3 und 4 anhand der vorangegangenen Versuchsreihen 1 und 2 abgeschätzt. Die Mischung erfolgte unter Annahme von mittleren TR-Werten für den ÜSS aufgrund der vorangegangenen Messreihen und unter Zugrundelegung des Messwertes der TR-Sonde der KA Neuss-Süd für den Primärschlamm (vgl. Kapitel 4.2.3). Dies liegt darin begründet, dass sowohl PS als auch ÜSS in möglichst frischem Zustand der Faulung zugegeben werden sollten. Die Bestimmung des tatsächlichen Mischungsverhältnisses erfolgte anschließend anhand der protokollierten Volumenströme und der gemessenen Trockenrückstände von ÜSS, PS und Mischschlamm.

3.2 Untersuchungsprogramm

Im Rahmen der vier Versuchsreihen wurde die MBR-Versuchsstraße unter verschiedenen Systemeinstellungen betrieben. Das Schlammalter t_{TS} im Belebungsbecken wurde in den einzelnen Versuchsreihen über die Entnahme von ÜSS variiert. Der TS-Gehalt sowie die Schlammbelastung B_{TS} ändern sich je nach Zulaufbelastung der MBR-Straßen, wobei diese mit in den jeweiligen Versuchsreihen konstanten Volumenströmen beschickt wurden. In Abhängigkeit des zufließenden Abwassers ergaben sich die endgültigen Betriebseinstellungen zur Erreichung der Zielgröße während des Versuchsbetriebs. In Tabelle 3.5 ist das Versuchsprogramm dargestellt.

Tabelle 3.5: Übersicht über die Versuchsreihen (VR)

VR	Dauer	Straße	Schlammalter [d]	Vorklärung	Faulung
1	4 Monate (08/13 – 12/13)	Versuch	25	ja	ÜSS
		Referenz	25	nein	ÜSS
2	4 Monate (01/14 – 05/14)	Versuch	15	ja	ÜSS
		Referenz	25	nein	ÜSS
3	4 Monate (06/14 – 09/14)	Versuch	25	ja	PS + ÜSS
		Referenz	25	nein	ÜSS
4	4 Monate (10/14 – 02/15)	Versuch ¹	15	ja	PS + ÜSS
		Referenz	25	nein	ÜSS

¹: Erhöhung des Permeatvolumenstroms in der Versuchsstraße (siehe Tabelle 3.4)

Das Ziel lag in einem Betrieb der Referenzstraße bei einem TR von 10-12 g/l bei unverändertem Schlammalter von 25 Tagen. Der TR im MBR der Versuchsstraße sollte, bedingt durch den stattfindenden Primärschlammabzug in der Vorklärung, niedriger als in der Referenzstraße liegen, sich aber bei 8 g/l einstellen. Durch das Absenken des Schlammalters in der zweiten und vierten Versuchseinstellung wurde für die Versuchsstraße ein nochmals abgesenkter TR erwartet.

In der ersten Versuchseinstellung (Versuchsreihe 1) ergab sich mit den beiden MBR nun der direkte Vergleich zwischen einem MBR mit und ohne Vorklärung bei einem Schlammalter von 25 Tagen. Ab der nächsten Versuchseinstellung (Versuchsreihe 2) wurde das Schlammalter im MBR der Versuchsstraße mit Vorklärung gesenkt. Hieraus sollte geschlossen werden, ob sich die Umstellung der Betriebseinstellungen im Gasertrag bemerkbar macht. Bei diesen beiden Versuchseinstellungen wurde der ÜSS gefault. Auf die Zugabe von PS in den Faulbehälter der Versuchsstraße wurde verzichtet, um die Effekte aus den Änderungen der Betriebseinstellungen im Gasertrag des ÜSS genauer beobachten zu können, ohne sie mit der starken Gasproduktion aus dem PS zu überdecken. Der Gasertrag aus dem PS wurde für die Versuchsstraße in den Versuchsreihen 1 und 2 bei der Versuchsauswertung rechnerisch addiert.

Als dritte Versuchseinstellung (Versuchsreihe 3) wurde dann auch der PS in der Straße mit Vorklärung der Faulung zugeführt, bei ansonsten unveränderten Betriebseinstellungen im Vergleich zu Versuchsreihe 1. Hierdurch sollten Fehler aus einer rein rechnerischen Berücksichtigung des PS ausgeschlossen werden, da sich zwischen dem PS und dem ÜSS bei gemeinsamer Faulung möglicherweise Wechselwirkungen ergeben.

In der vierten Versuchseinstellung (Versuchsreihe 4) wurde die Betriebsweise aus Versuchsreihe 2 ebenfalls um die Mitfaulung des PS erweitert. Zudem wurde der Zulaufvolumenstrom von der Versuchsstraße aufgrund der Auswirkungen der PS-Entnahme in der Vorklärung angepasst, um eine TR-Erhöhung im Belebungsbecken zu erreichen.

3.3 Durchgeführte Analytik

3.3.1 Untersuchungen zur Reinigungsleistung und der Betriebssicherheit

Es wurden die in Tabelle 3.6 aufgeführten Parameter anhand von 24-Stunden-Mischproben im Zulauf und im Ablauf beider MBR Straßen analysiert. Dabei wurde die HRT von 20 h in der biologischen Stufe berücksichtigt. Die Analytik wurde – mit Ausnahme des BSB₅ – vor Ort mit Küvettentests der Firma Hach Lange durchgeführt.

Tabelle 3.6: Durchgeführte Analytik (mit Küvettenschnelltests)

Parameter	Analysehäufigkeit [Tage/Woche]	Probenahme		Analysemethode/ genormtes Testverfahren
		Zulauf	Ablauf	
BSB ₅	2	X	X	Bestimmung im Instituts-Labor nach DIN 38409
CSB	2	X	X	DIN 38409 H1-H44
TOC	1 - 2	X	X	DIN 38409 H3
N _{ges}	2	X	X	DIN 38405 D10
NH ₄	2	X	X	DIN 38406 E5-1
NO ₂	2		X	EN ISO 26777
NO ₃	2		X	DIN 38405 D9-2
AFS	2	X		DIN 38409 H2

Es fand keine Simultanfällung für Phosphat statt. Somit wurde die Analyse der Phosphorelimination im MBR mit Hinblick auf die vermehrte Analyse aussagekräftigerer Parameter zunächst vernachlässigt und im weiteren Verlauf der Untersuchungen (Versuchsreihe 3) vereinzelt durchgeführt. Die Analyse auf Abfiltrierbare Stoffe (AFS) im Zulauf der MBR-Stufen erfolgte zur Charakterisierung der Reinigungsleistung in der Vorklärung.

Zur Bestimmung der Permeabilität der Membranen wurden kontinuierlich aufgezeichnete Daten des Flusses und des Transmembrandrucks (TMP) herangezogen. Somit konnten direkte Zusammenhänge zwischen den Schlammeigenschaften und der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Membranstufe überwacht werden.

Für die Messung des Transmembrandruckes wurden Drucksensoren der Firma Tematec GmbH verwendet. Die Messung des Volumenstromes erfolgte mit Magnetisch-Induktiver Durchflussmessung (MID) vom Typ SC 80 der Firma Krohne.

3.3.2 Messung des Gasvolumenstromes und der Gasqualität

Der Gasertrag wurde werktäglich morgens abgelesen. Zur Messung des Gasvolumenstromes wurden zunächst Balgengaszähler der Firma GMT GmbH verwendet. Diese setzten sich allerdings im Verlauf der ersten Versuchsreihe zu, so dass zunächst neue angeschafft wurden und diese dann zu Anfang der zweiten Versuchsreihe nach erneutem Ausfall gegen Trommelgaszähler der Firma Ritter Apparatebau GmbH ausgetauscht, welche ab diesem Zeitpunkt zur Verfügung standen.

Die Zusammensetzung des Faulgases und insbesondere der Methangehalt wurden ebenfalls werktäglich ermittelt. Somit können Zusammenhänge zwischen der Betriebsweise des MBR und dem Gasertrag bzw. dem Energierückgewinnungspotenzial aufgezeigt werden. Die Gaszusammensetzung hinsichtlich Methan- und Kohlenstoff-

dioxidgehalt wurde mit einem Messgerät des Typs SSM 6000 der Firma Pronova bestimmt, welches in regelmäßigen Abständen mit Prüfgas kalibriert wurde. Für beide Faulbehälter stand ein einzelnes Messgerät zur Verfügung, mit welchem täglich jeweils eine Messung durchgeführt wurde. Der Anteil an übrigen Gasen wurde durch Subtraktion der Methan- und Kohlenstoffdioxidgehalte bestimmt.

3.3.3 Schlammcharakteristika

Da erwartet wurde, dass die geplanten Betriebseinstellungen die Schlammigenschaften beeinflussen, wurde die Filtrierbarkeit anhand von verschiedenen Parametern überwacht. Es wurden neben dem Trockenrückstand und dem Glühverlust noch der Schlammfiltrationsindex (SFI), die kapillare Fließzeit (CST) und das Absetzverhalten (ISV) im Belebungsbecken ermittelt, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

Die Bestimmung der Schlammcharakteristika des ausgefaulten Schlammes aus dem Faulbehälter erfolgte dabei aus einer Probe von ca. 2 l, welche vor der Zugabe des Rohschlammes gezogen wurde, um den Mischungsfehler aufgrund der notwendigen Befüllungs- und Entnahmereihenfolge (siehe Kapitel 3.1.3) zu umgehen.

3.3.3.1 Kapillare Fließzeit (CST)

Die Entwässerbarkeit des Schlammes vor und nach der Faulung wird mittels der kapillaren Fließzeit (CST) bewertet. Die Messungen werden nach DIN EN 14701-1 (2006a): „Charakterisierung von Schlämmen - Filtrationseigenschaften - Teil 1: Bestimmung der kapillaren Fließzeit“ durchgeführt.

Mit einem CST-Gerät wird die Zeit gemessen, die eine Durchfeuchtungsfront aus einer Schlammprobe auf einem Filterpapier benötigt, um eine durch 2 Messpunkte definierte Strecke zurückzulegen. Das Filterpapier übt hierbei eine Kapillarwirkung auf den Schlamm aus. Je kürzer diese Zeit ist, also je kleiner der CST ist, desto besser ist der Schlamm entwässerbar.

Das Filterpapier wird zwischen zwei Plexiglasscheiben gelegt, dabei ist stets die gleiche Papierseite nach oben zu legen. Die obere Scheibe besitzt eine runde Öffnung, in die ein 5 cm hoher Metallzylinder mit einem Durchlass von 18 mm passt. Die zu untersuchende Schlammprobe wird zunächst gemischt, indem sie viermal von einem Becher in einen anderen gegossen wird und anschließend in diesen Metallzylinder gegeben, wobei das Wasser über das Filterpapier entweicht. In zwei Abständen zum Probenzylinder sind elektrische Kontakte angebracht. Erreicht das Wasser den ersten Kontakt im Abstand von 16 mm zur Probenmitte, wird automatisch eine Stoppuhr gestartet, die den Zeitraum misst, bis das Wasser den zweiten Kontakt in 22,5 mm Entfernung erreicht. Das Gerät ist in Bild 3.6 dargestellt.

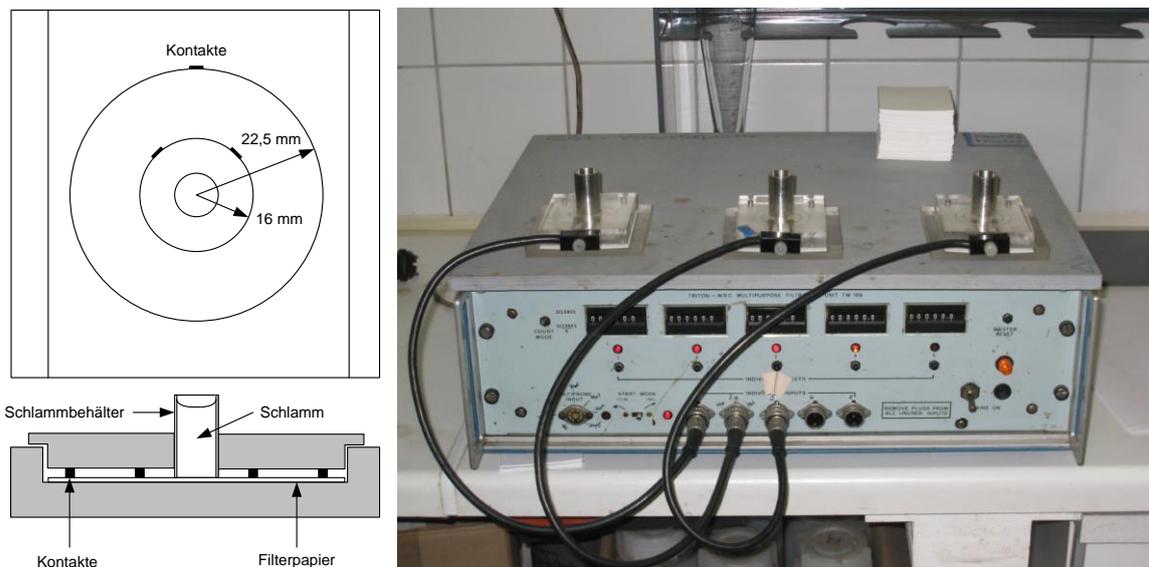


Bild 3.6: Messkopf des CST-Gerätes [nach ATV, 1992] und Ansicht des verwendeten Messgerätes „Triton W.R.C Multipurpose Filtration Unit TW 166“

Der CST-Wert wird aus dem arithmetischen Mittel von mindestens drei Werten berechnet. Weicht ein Wert um mehr als 20 % vom berechneten Mittelwert ab, so darf er nicht berücksichtigt werden.

Da die Messung durch viele Faktoren beeinflusst wird, wie beispielsweise die Eigenschaften des Papiers, die Oberflächenspannung, die Temperatur oder die Konzentration an suspendierten Feststoffen lassen sich nur Bewertungen qualitativer und vergleichender Art anstellen.

Als Filterpapier soll gemäß DIN EN 14701-1 (2006a) für die Chromatographie geeignetes Papier, stets vom selben Typ verwendet werden. Der Einfluss der Temperatur kann mit einer in DIN EN 14701-1 (2006a) gegebenen Formel bestimmt werden, jedoch kann dieser vernachlässigt werden, wenn die Raumtemperatur zwischen 12°C und 30°C liegt. Im Arbeitsbericht ATV (1992) wird jedoch die Temperierung der Schlammprobe auf 20°C empfohlen. Der Einfluss der Konzentration an suspendierten Feststoffen wird als wesentlich angesehen. Die Anwendungsgrenzen liegen bei einem TR von 1 %, da bei einem sehr dünnen Schlamm davon auszugehen ist, dass sich bei den geringen Probenmengen kein ausreichender Filterkuchen mehr bilden kann [ATV, 1992]. Da die Probe aber noch gut fließfähig sein muss, liegt die Obergrenze bei etwa 10 % TR je nach Schlamm. Die Angabe eines auf den Trockenrückstand der Probe (TR) bezogenen CST erscheint sinnvoll [DWA-M 383, 2008]. Zur Bewertung der CST-Werte finden sich in der Literatur die Richtwerte aus Tabelle 3.7.

Tabelle 3.7: Beurteilung der Entwässerbarkeit des Schlammes anhand des CST

Entwässerbarkeit	CST [ATV, 1992]	CST/%TR [DICHTL UND KOPP, 2001]
	[s]	[s]
Gut	< 80	< 30
Mittelmäßig	80 - 400	≈ 30 -150
Schlecht	> 400	≥ 150

Am ISA steht das Gerät „Triton W.R.C Multipurpose Filtration Unit TW 166“ zur Verfügung. Es wird das Papier Whatman No.17 benutzt.

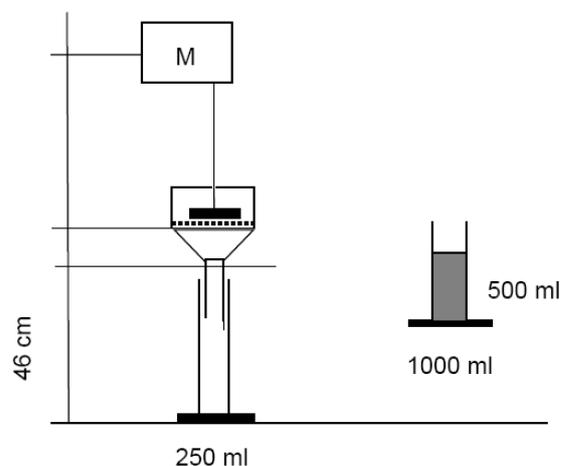
3.3.3.2 Schlammfiltrationsindex (SFI)

Der Schlammfiltrationsindex ist ein Instrument zur Bestimmung der Filtrierbarkeit belebter Schlämme. Er wurde am Institut für Siedlungswasserwirtschaft entwickelt und stellt ein kostengünstig und einfach zu bedienendes Instrument zur Beurteilung der Filtrierbarkeit von Schlämmen dar.

Zur Bestimmung des SFI wird eine Schlammprobe von 500 ml in einen mit Filterpapier bestückten Keramiktrichter gefüllt und in einen Messbecher filtriert. Während des Filtrationsvorgangs wird die Schlammprobe mittels eines Rührwerks kontinuierlich durchmischt und so eine übermäßige Deckschichtbildung auf dem Filterpapier verhindert. Gemessen wird die Zeit Δt zwischen Erreichen der 100 ml und der 150 ml Messmarke. Der eigentliche Kennwert wird dann auf den Trockenrückstand bezogen (siehe Gleichung 3-2).

$$SFI = \frac{\Delta t}{\%TR} \quad [s] \quad \text{Gleichung 3-2}$$

In Bild 3.7 ist der Versuchsaufbau bei der Bestimmung des SFI dargestellt.

**Bild 3.7: Versuchsaufbau bei der Bestimmung des SFI (nach THIEMIG, 2011)**

Durchführung:

- Filterpapier mit der glatten Seite nach oben in die Filternutsche einlegen
- Leeren 250 ml-Messzylinder unter den Trichter stellen
- Rührerflügel knapp (1 bis 3 mm) über dem Filterpapier feststellen, Antrieb mit einer Drehzahl von 40 min^{-1} einschalten
- Schlammprobe gut durchmischen und nach Möglichkeit auf 20°C temperieren
- 500 ml der Schlammprobe in Messzylinder abmessen
- Diese 500 ml-Probe zügig in die Filternutsche gießen
- Stoppuhr starten bei Erreichen der 100 ml Markierung
- Stoppuhr anhalten bei Erreichen der 150 ml Markierung

Zur Filtration wird nach THIEMIG (2011) Glasfaserpapier vom Typ MN 85/70 der Firma Macherey Nagel verwendet.

3.3.3.3 Schlammvolumenindex (ISV)

Der Schlammvolumenindex (ISV) ist ein Maß für die Absetzbarkeit/Eindickbarkeit des belebten Schlammes. Er gibt an, welches Volumen 1 g belebter Schlamm nach 30 Minuten Absetzdauer in einem 1 Liter Standzylinder einnimmt. Für Schlammvolumina größer 250 ml/l wird das Vergleichsschlammvolumen (VSV) bestimmt. Zur Berechnung des ISV wird das Schlammvolumen durch den TS dividiert (siehe Gleichung 3-3).

$$\text{ISV} = \frac{\text{SV}_{30}}{\text{TS}} \quad [\text{ml/g TS}] \quad \text{Gleichung 3-3}$$

mit: SV_{30} [ml/l]: Schlammvolumen nach 30 Minuten

Je geringer der Wert für ISV ist, umso besser ist die Absetzbarkeit des belebten Schlammes. Unter Normalbedingungen liegen die Werte bei kommunalen Abwässern zwischen 80 und 120 ml/g.

3.3.3.4 Extrazelluläre polymere Substanzen (EPS)

Extrazelluläre polymere Substanzen wurden sowohl aus Belebtschlammproben als auch aus Proben des auf den Membranplatten gebildeten Biofilms bestimmt. Die Belebtschlammproben wurden direkt vor dem Transport in das Umweltanalytische Labor des ISA in Aachen aus der Nitrifikation entnommen und in Kühlboxen gelagert. Die Probenvorbereitung erfolgte unmittelbar nach Ankunft der Proben im Labor. Dort wurden jeweils 100 ml über Membranfilter (Macherey und Nagel $0,45 \mu\text{m}$) filtriert und die in Falcon-Tubes verpackten Filter bei -80°C tiefgefroren.

Nach Beendigung der Versuchslaufzeit wurde beiden Nitrifikationsbecken eine Membranplatte aus der Mitte des Racks entnommen und jeweils drei Membranstücke

herausgetrennt. Diese wurden ohne Vorbehandlung bei $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiefgefroren und gemeinsam mit den Belebtschlammproben versandt. Die EPS im Biofilm wurden auf die Membranfläche bezogen. Dazu wurden die entfernten Flächen gemessen. Um die Proben nicht zu kontaminieren wurden die Flächen anhand der Löcher in den Membranen vermessen (siehe Tabelle 3.8). Die Membranplatte der Versuchsstraße wurde vor der Vermessung grob mit einem Hochdruckreiniger gereinigt. Der vorherige Zustand ist anhand des kleinen Bildausschnittes zu sehen.

Tabelle 3.8: Entnahme der Deckschicht-Proben zur EPS-Bestimmung aus Membranplatten der Versuchs- und Referenzstraße nach Versuchsreihe 4. Die angegebenen Koordinaten beziehen sich jeweils auf die Entfernung der oberen linken Ecke des Ausschnitts von der oberen linken Ecke der Membranplatte.

Ort	Versuchsstraße	Referenzstraße
Alle		
Oben	x = 165 mm, y = 750 mm, b = 125 mm, h = 145 mm, A = 18.125 mm ²	x = 205, y = 685 mm, b = 110 mm, h = 140 mm, A = 15.400 mm ²
Mitte	x = 170 mm, y = 440 mm, b = 115 mm, h = 130 mm, A = 14.950 mm ²	x = 165 mm, y = 400 mm, b = 110 mm, h = 130 mm, A = 14.300 mm ²
Unten	x = 155, y = 145 mm, b = 115 mm, h = 105 mm, A = 12.075 mm ²	x = 155 mm, y = 150 mm, b = 105 mm, h = 115 mm, A = 12.075 mm ²

Die EPS-Extraktion erfolgte im Labor der Aquatischen Biotechnologie der Universität Duisburg-Essen¹. Nach Beendigung der Versuchslaufzeit wurden alle Proben per Kurier in gefrorenem Zustand in Trockeneis über Nacht dorthin versendet. Die Filter mit den

¹ Fakultät für Chemie - Biofilm Centre, Universität Duisburg-Essen, Universitätsstr. 5, 45141 Essen

Belebtschlammproben wurden bei Raumtemperatur aufgetaut, zerschnitten, in 30 ml PBS gegeben und mit 30 ml Dowex Marathon C Kationenaustascher versetzt. Dies wurde in 100-ml Schottflaschen für 4 Stunden bei 4 °C und 200 rpm gerührt. Anschließend wurde die flüssige Phase mithilfe einer 50 ml-Spritze und einer Kanüle gewonnen. Zur Erhöhung der EPS Ausbeute wurde der zurückbleibende Feststoff und das Dowexmaterial erneut mit 30 ml PBS gespült. Die Flüssigkeit wurde für 15 min bei 7.500 g (g = Erdbeschleunigung) zentrifugiert und dann durch 45 µm-Polycarbonatmembranfilter filtriert. Anschließend wurde die Flüssigkeit für 48 h bei 4 °C gegen deionisiertes Wasser (Millipore) dialysiert. Dazu wurden die Proben jeweils aufgeteilt und in zwei separate Dialysemembranen mit einer Porenweite von 3,5 kD (Roth) gegeben. Dies ermöglicht zum einen eine effizientere Dialyse, da das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen grösser wird und hat zum anderen den Vorteil, dass bei einem eventuellen Verlust einer Probe, durch Bersten der Membran oder Ablösen einer Verschlussklemme nicht ein Totalverlust einer Probe resultieren würde. Pro 10 Dialyseschläuchen mit je ca. 30 ml Inhalt wurde ein 5 Liter Dialysegefäß verwendet und bei 120 rpm gerührt. So können kleine Moleküle und Salze von den hochpolymeren EPS-Bestandteilen getrennt werden. Das Wasser wurde währenddessen zweimal täglich gewechselt. Die dialysierten Proben wurden bei -20°C eingefroren und anschließend bei <0,1 mbar und 30 °C gefriergetrocknet. Zur Bestimmung der EPS Menge wurden die Zentrifugenröhrchen vor Befüllung und nach Gefrierdrying gewogen. Zusätzlich wurde die EPS Menge anhand der theoretisch maximal gewinnbaren EPS-Extraktmenge von 60 ml und der tatsächlich erhaltenen EPS-Extraktmenge berechnet. Ähnlich wurde mit den Membranproben verfahren.

Die EPS-Proben wurden z. T. auf freie und polysaccharidgebundene Zucker (DUBOIS ET AL., 1956), freie und polysaccharidgebundene Uronsäuren (BLUMENKRANTZ UND ASBOE-HANSEN, 1973), Proteine (BRADFORD ET AL., 1976), Lipide (CHABROL UND CHARONNET, 1937) sowie Nukleinsäuren mittels Life Technologies, Quant-iT™ PicoGreen® dsDNA Assay Kit untersucht.

3.4 Einfahrtbetrieb vor Versuchsreihe 1 und neues Einfahren zwischen Versuchsreihe 2 und 3

Im Vorfeld der Versuche wurde die Referenzstraße mit Schlamm aus der KA Neuss-Süd angeimpft und betrieben, bis ein ausreichend hoher TR vorhanden war. Danach erfolgte eine Aufteilung des Schlammes auf die Referenz- und die Versuchsstraße und ein Betrieb beider Straßen mit den vorgesehenen Versuchseinstellungen.

Zwischen Versuchsreihe 2 und 3 wurde der Schlamm aus der Versuchsstraße verworfen und diese erneut mit Schlamm aus der Referenzstraße angefahren. Dies wurde im Hinblick auf das in Versuchsreihe 2 verstärkt aufgetretene Membranfouling (siehe Kapitel

4.4.2) als notwendig erachtet, um die Aussagekraft der nachfolgenden Versuchsreihe 3 nicht zu mindern. Zur Sicherstellung eines stationären Betriebs wurde vor Versuchsreihe 3 ein erneuter Einfahrbetrieb von 1,5 Schlammaltern angesetzt (38 Tage). Zudem wurde Zeit für die Erhöhung des TR beider Straßen nach erfolgter Verdünnung mit Rohabwasser benötigt. In Summe lag eine Verzögerung von 45 Tagen zwischen den Versuchsreihen 2 und 3, in welcher außer TR-Messungen in der Belebung keine Analytik stattfand.

3.5 Reinigung der Membranstufe

Die Membranreinigung erfolgte in situ mittels eines ca. 30 cm oberhalb der Membranen gelagerten Behälters. Aus diesem wurden die Membranen unter Schwerkrafteinwirkung mit Natriumhypochlorit (NaClO) bzw. Zitronensäure gereinigt. Die Vorgehensweise der Membranreinigung unter Angabe der verwendeten Konzentrationen und Einwirkzeiten ist in Tabelle 3.9 beschrieben.

Tabelle 3.9: Ablauf der Membranreinigung

Schritt	Einwirkzeit	Konzentration	Volumen
Unterbrechen des Permeatflusses und Abschalten der Membranbelüftung			
Reinigung mit NaClO	45 Minuten	20x verdünnte 10-12%ige Lösung (pH-Wert = 10,5)	30 l (2,5 l x 12 Membranen)
Spülung mit Trinkwasser			60 l
Reinigung mit Zitronensäure	45 Minuten	20x verdünnte Lösung (pH-Wert = 2,5)	30 l (2,5 l x 12 Membranen)
Spülung mit Trinkwasser			60 l
Wiederaufnahme von Permeatabzug und Membranbelüftung			

4 Ergebnisse

4.1 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in tabellarischer Form und als Diagramme aufbereitet. Ist in einer Versuchsreihe ein zeitlicher Trend eines Parameters erkennbar, sind in den Diagrammen die Einzelwerte über die Dauer der Versuchsreihe dargestellt. Die weiteren Ergebnisse sind zur Verbesserung der Übersichtlichkeit in Form von Boxplot-Diagrammen aufbereitet. Die Anzahl (n) der Messwerte ist in den Boxplot-Diagrammen angegeben. Der Leseschlüssel der Boxplots ist in Bild 4.1 zu finden.

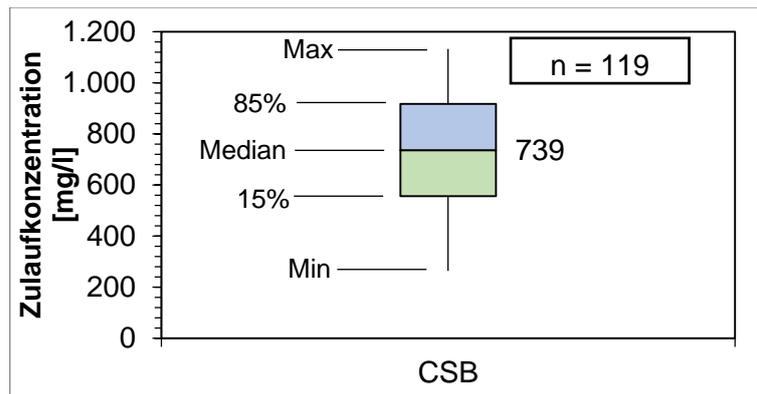


Bild 4.1: Beispiel Boxplot-Diagramm mit Beschriftung der Einzelemente

Es handelt sich bei den oberen und unteren Enden der vertikalen Linien um die gemessenen Maximal- bzw. Minimalwerte. Die untere Box (grün) stellt den Bereich zwischen Medianwert und 15 %-Perzentil und die obere Box (blau) den Bereich zwischen Medianwert und 85 %-Perzentil (relevant nach ATV A 198, 2003) dar, d.h. die Box gibt nicht – wie häufig verwendet – den mittleren Wertebereich wieder. Weiterhin ist in jedem Diagramm der Median als Zahlenwert angegeben. Im Fließtext und zum Teil in tabellarischer Form finden sich zusätzlich die jeweiligen Mittelwerte aus den Versuchsreihen.

4.2 Übergreifende Ergebnisse über alle Versuchsreihen

4.2.1 Laufzeit der Versuchsreihen

In Bild 4.2 sind die Zeiträume der einzelnen Versuchsreihen im Jahresverlauf und die jeweils durchgeführte Analytik – zusammengefasst als „Reinigung“ (Zu- und Ablaufwerte der MBR) und „Schlamm“ (Schlammcharakteristika) – dargestellt.

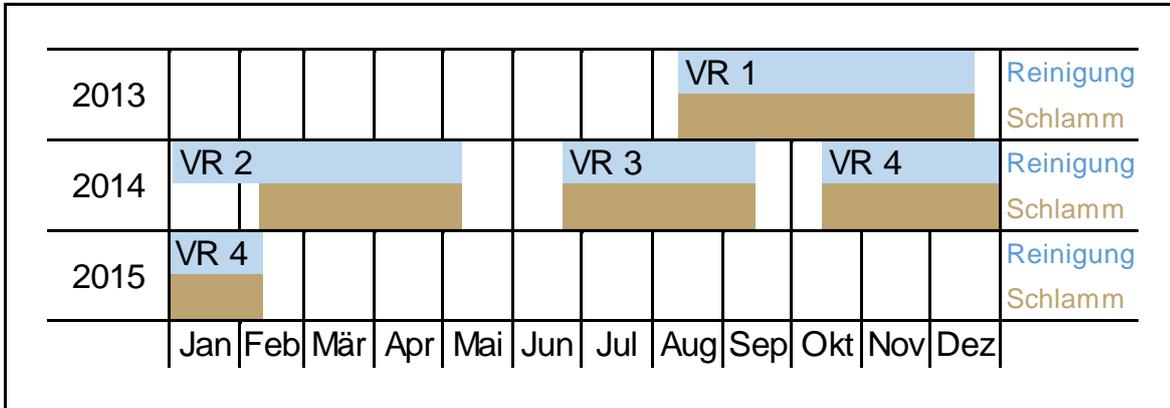


Bild 4.2: Zeiträume der Versuchsreihen (VR) und durchgeführte Analytik

Vor Versuchsreihe 3 und 4 wurde jeweils ein Einfahrzeitraum eingehalten, in welchem keine Laboranalytik mit Ausnahme von TR-Messungen stattfand. Die Einfahrzeiträume beginnen jeweils mit dem Ende der vorangegangenen Versuchsreihe.

4.2.2 Veränderung der organischen Frachten im Zulauf bei konstantem Abwasservolumenstrom

Während der Versuchsreihen konnten Schwankungen in den Konzentrationen der organischen Summenparameter im Zulauf beider MBR-Straßen beobachtet werden. Dies ist in Bild 4.3 beispielhaft anhand der zeitlichen Veränderung der BSB₅-Konzentration dargestellt.

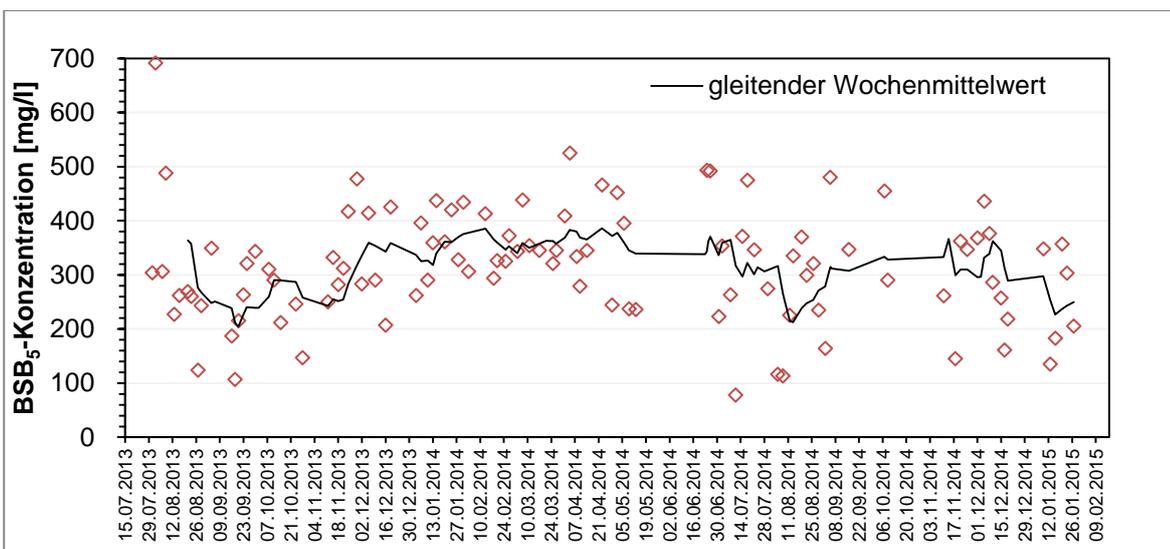


Bild 4.3: Zeitlicher Verlauf der BSB₅-Zulaufkonzentrationen

Die Versuchsanlage wurde in Kapitel 3.1 nach ATV-DVWK-A 131 auf das dort angegebene 85 %-Perzentil der BSB₅-Zulauf Fracht je Einwohnerwert und Tag von 60 g/(E·d) ausgelegt. Die Abweichungen der 85 %-Perzentile in den einzelnen Versuchsreihen vom genannten Auslegungswert für 30 E wurden in den nachfolgenden Ergebnisauswertungen zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse berücksichtigt. Es ergeben sich die in Tabelle 4.1 dargestellten Bemessungsfrachten und Einwohnerwerte im Zulauf beider MBR-Straßen in den einzelnen Versuchsreihen.

Tabelle 4.1: Organische Belastung der MBR-Straßen ausgedrückt als BSB₅-Frachten und Einwohnerwerte

Versuchsreihe	Referenzstraße		Versuchsstraße	
	BSB ₅ -Fracht (85-Perzentil)	Einwohnerwerte	BSB ₅ -Fracht (85-Perzentil)	Einwohnerwerte
	<i>kg BSB₅/d</i>	<i>E</i>	<i>kg BSB₅/d</i>	<i>E</i>
1	1.725	28,8	1.751	29,2
2	2.160	36,0	2.193	36,5
3	2.360	39,3	2.309	38,5
4	2.177	36,3	3.959	66,0

Die Belastung der Versuchsstraße in Versuchsreihe 1 bis 3 ist nahezu identisch zu der korrespondierenden Belastung der Referenzstraße. Leichte Änderungen ergeben sich aus den um den PS-Abzug angepassten Zulaufvolumenströmen zur Vorklärung in der Versuchsstraße (siehe Tabelle 3.1). Durch die deutliche Erhöhung des Zulaufvolumenstromes in Versuchsreihe 4 zur Anpassung an die verringerte TR-Fracht im Zulauf des MBR aufgrund der VK ergibt sich für die Versuchsstraße in etwa eine Verdopplung der organischen Frachten im Zulauf.

4.2.3 Leistungsfähigkeit der Vorklärung

Das Vorklärbecken der Versuchsstraße wurde im Hinblick auf die erreichte Frachtreduktion der organischen Summenparameter, auf die AFS-Reduktion und auf die Produktion von Primärschlamm hin untersucht. Zudem wurden die Zu- und Ablaufkonzentrationen für N_{ges} und NH₄-N gegenübergestellt. Die Konzentrationen von CSB, BSB₅ und TOC wurden im Median über die gesamte Versuchszeit zu jeweils ca. 25 bis 30 % reduziert (siehe Bild 4.4). Für den CSB ergibt sich somit nach ATV-DVWK-A 131 (2000) eine Frachtreduktion, welche mit einer Aufenthaltszeit von t_{VK} = 0,5 bis 1,0 h in einer großtechnischen Vorklärung vergleichbar ist. Eine Betrachtung der Reinigungsleistung für die Parameter CSB, BSB₅ und TOC ergab für Versuchsreihe 4, trotz gesenkter Aufenthaltszeit in der VK, keine signifikante Veränderung zu den vorangegangenen Versuchsreihen, so dass der Wirkungsgrad der Vorklärung für organische Summenparameter über alle Versuchsreihen ermittelt wurde.

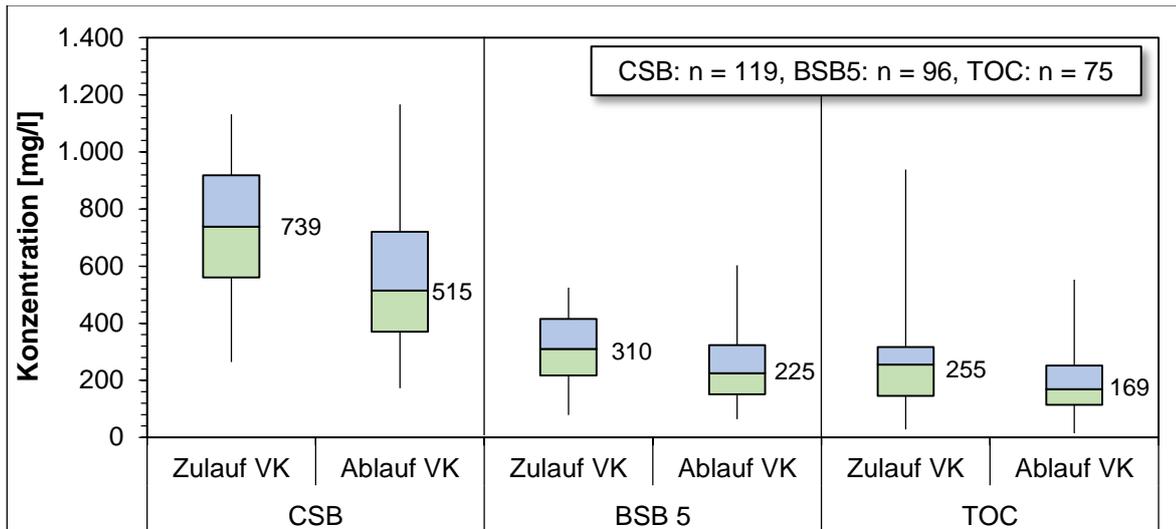


Bild 4.4: Rückhalt organischer Summenparameter in der Vorklärung

Wie aus Bild 4.5 zu entnehmen ist, wurde die Stickstoffkonzentration erwartungsgemäß durch Einsatz einer Vorklärung in der Versuchsstraße gegenüber der Referenzstraße ohne Vorklärung nahezu nicht verringert.

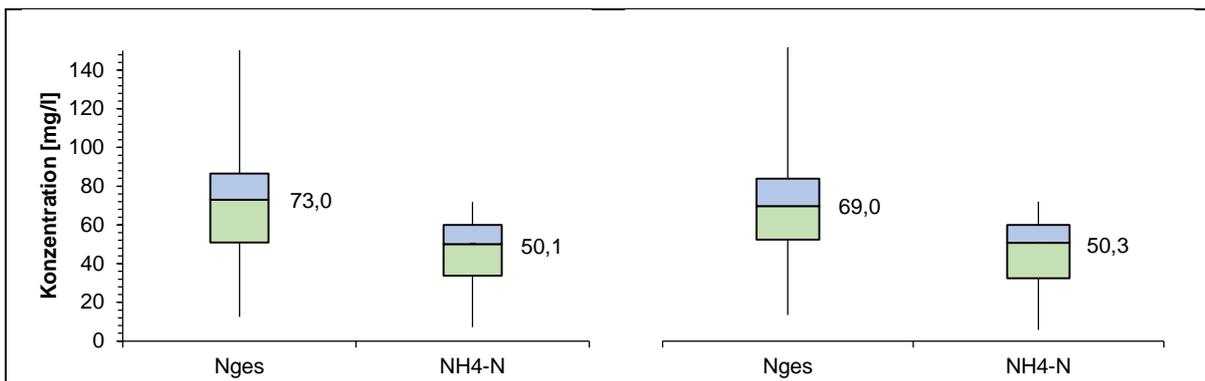


Bild 4.5: Zulaufkonzentrationen von Gesamtstickstoff und Ammoniumstickstoff im Zulauf des MBR der Referenzstraße (links) und des MBR der Versuchsstraße (rechts, entspricht Ablauf VK) in allen Versuchsreihen (n = 111)

Die Reduktion der AFS lag bei 55 % bezogen auf den Median der Zulaufkonzentration von 353 mg AFS/l (Bild 4.6).

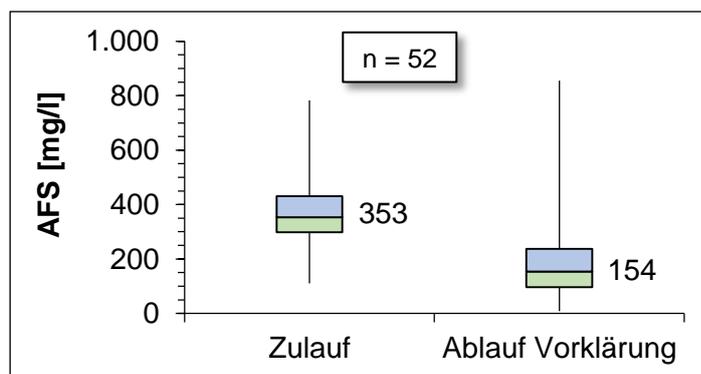


Bild 4.6: AFS-Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Vorklärung

Für die Berechnung des abgezogenen Primärschlammstromes wurde die Annahme getroffen, dass die Massenströme sich gemäß den Verhältnissen zwischen Zulauf zur Belebung und dem Überlauf der Vorklärung, der zur Regulierung der Aufenthaltszeit genutzt wurde, aufteilen (siehe Bild 3.2). Die anzurechnende Primärschlammproduktion des Vorklärbeckens liegt entsprechend dem effektiven Zulaufvolumenstromes zur Vorklärung (siehe Tabelle 3.1) bei 50 % (66 % in Versuchsreihe 4) des gemessenen realen Primärschlamm-Anfalls. Der Volumenstrom des abgezogenen Primärschlammes war im halbtechnischen Betrieb stark abhängig von den Abzugsintervallen (siehe Kapitel 3.1.1).

In Tabelle 4.2 sind die absoluten und einwohnerspezifischen Massenströme des Primärschlammes in den vier Versuchsreihen angegeben.

Tabelle 4.2: Absoluter und einwohnerspezifischer Massenstrom des Primärschlammabzuges in der Versuchsstraße

Versuchsreihe	Einwohnerwerte	n	Feststoffmassenstrom $M_{TR, PS}$					
			85-Perzentil		50-Perzentil (Median)		Mittelwert	
	E	-	g/d	g/(E·d)	g/d	g/(E·d)	g/d	g/(E·d)
Reihe 1	29,2	10	1.007	34,5	729	25,0	763	26,2
Reihe 2	36,5	12	1.678	45,9	1.093	29,9	1.103	30,2
Reihe 3	38,5	11	1.318	34,3	807	21,0	918	23,9
Reihe 4	65,4	14	1.817	27,8	1.417	21,7	1.484	22,7

Für Durchflusszeiten von $t_{VK} = 1,0$ h gibt das ATV-DVWK-A 131 (2000) für den einwohnerspezifischen Primärschlammfall einen 85-Perzentil-Wert von 35 g/(E·d) an. Aus dem Merkblatt DWA-M 368 (2014) lässt sich zudem ein errechneter Median (50-Perzentil) von 28 g/(E·d) entnehmen. Das 85-Perzentil konnte mit der halbtechnischen Vorklärung in den Versuchsreihe 1 und 3 gut eingehalten werden. In Versuchsreihe 2 lag der Primärschlammfall auf das 85-Perzentil dementsprechend zu hoch und in Versuchsreihe 4 zu niedrig. Die Medianwerte liegen hingegen für alle Versuchsreihen mit Ausnahme von Versuchsreihe 2 deutlich unterhalb des im DWA Merkblatt errechneten Wertes von 28 g/(E·d). Es ist zu beachten, dass innerhalb der Versuchsreihen lediglich eine geringe Datenbasis von 10 bis 14 Werten je Reihe geschaffen wurde. Ab Versuchsreihe 3 wurde eine leichte Verschlechterung der PS-Abtrennung bezogen auf den Median und den Mittelwert in der Vorklärung festgestellt. Neben möglichen Schwankungen im Zulauf könnte die geänderte Betriebsweise mit einer Anpassung des werktäglichen PS-Abzuges auf einmal wöchentlich dafür verantwortlich sein. Ab Versuchsreihe 4 kamen zudem der erhöhte Volumenstrom im Zulauf der Vorklärung und die damit geänderte Aufenthaltszeit als negativer Effekt hinzu.

Für den Trockenrückstand und den Glühverlust des Primärschlammes konnten die in Tabelle 4.3 angegebenen Werte ermittelt werden. Der Trockenrückstand des PS war aufgrund der in Kapitel 3.1.1 erläuterten Betriebsweise der Vorklärung niedriger als die im DWA-M 368 (2014) angegebenen 3 bis 6 % und daher nicht repräsentativ.

Tabelle 4.3: Trockenrückstand und Glühverlust des Primärschlammes

Versuchsreihe	Trockenrückstand (TR)		Glühverlust (GV)	
	Median	Mittelwert	Median	Mittelwert
	g/l	g/l	%	%
Reihe 1	20,4	22,8	76,1	76,6
Reihe 2	12,9	14,2	81,2	80,1
Reihe 3	12,0	13,7	75,2	75,4
Reihe 4	6,7	6,9	76,2	76,0

Insgesamt konnte die Vorklärung in der Halbtechnik ausreichend genau abgebildet werden, wie anhand des einwohnerspezifischen PS-Anfalls zu erkennen ist.

Für die in den Versuchsreihen 3 und 4 untersuchte gemeinsame Faulung von PS und ÜSS wurde dennoch Primärschlamm aus der Vorklärung der Kläranlage Neuss-Süd verwendet, da hier mehr Strukturmaterial vorhanden war und dieser somit repräsentativer war als der in der Halbtechnik anfallende Primärschlamm (Zulauf der halbtechnischen Anlage über Etabloc-Pumpen von KSB realisiert, welche große Wasserinhaltsstoffe zerkleinern). Weiterhin wurde im PS der großtechnischen Kläranlage ein gleichmäßigerer und höherer TR-Gehalt erwartet, was die Zugabe in den Faulbehälter erleichterte.

4.2.4 Rechnerische Bestimmung des PS/ ÜSS-Verhältnisses im Input der Faulung der Versuchsstraße in den Versuchsreihen 3 und 4

Wie in Kapitel 3.1.3 erläutert, musste die Mischung von PS und ÜSS für den Input des Faulbehälters in der Versuchsstraße zeitnah erfolgen, so dass es nicht möglich war zunächst den TR (Zeitaufwand ca. 1 Tag) der beiden Schlämme zu bestimmen und das Mischungsverhältnis gezielt einzustellen. Das Mischungsverhältnis wurde deshalb nachträglich anhand der protokollierten Schlammvolumenströme und der gemessenen TR-Gehalte im ÜSS, PS und Mischschlamm (Input FB) bestimmt. Die jeweiligen Ergebnisse der Mischungsrechnungen sind in den Kapiteln 4.5.3 und 4.6.3 zu finden. Tabelle 4.4 gibt einen Überblick über alle Versuchsreihen.

Tabelle 4.4: oTR-Massen-Verhältnis von PS und ÜSS im Rohschlamm (insgesamt) und im Input des Faulbehälters

TR-Fracht und prozentualer Anteil		Versuchsreihe 1		Versuchsreihe 2		Versuchsreihe 3		Versuchsreihe 4	
		<i>g oTR/d</i>	%	<i>g oTR/d</i>	%	<i>g oTR/d</i>	%	<i>g oTR/d</i>	%
Rohschlamm PS und ÜSS	$M_{oTR,PS}$	763	44	1.103	46	918	49	1.484	34
	$M_{oTR,ÜSS}$	756	56	899	54	802	51	2.234	66
Input Faulbehälter	$M_{oTR,PS,Input}$	nur ÜSS in Faulung				207	39	192	33
	$M_{oTR,ÜSS,Input}$					327	61	392	67

In Versuchsreihe 4 konnte das Verhältnis von PS/ÜSS innerhalb der Faulung gut abgebildet werden. Für Versuchsreihe 3 lag das Verhältnis zunächst aufgrund nicht vorhandener Daten zum mittleren TR des ÜS nach der Eindickung (Austausch der Eindicker ab Versuchsreihe 3 in Kapitel 3.1.3) zu niedrig. Um die Bedingungen in der Versuchsreihe möglichst konstant zu halten und belastbare Daten zu gewinnen, wurde das Verhältnis im weiteren Verlauf von Reihe 3 beibehalten. Eine Umstellung erfolgte dann in Versuchsreihe 4 anhand der gewonnenen Daten zur ÜS-Eindickung aus Versuchsreihe 3.

4.2.5 Unregelmäßigkeiten in der Gasqualitätsmessung

Im Laufe der Versuchsreihen wurden im Faulgas neben CH₄ und CO₂ relativ hohe Anteile an übrigen Gasen bestimmt, welche zunächst zu dem Schluss führten, dass ein Leck im Messsystem bestehen müsste. Dieses konnte allerdings nicht gefunden werden. Eine Überprüfung der Gasmessungen mittels Gaschromatographie an einem Versuchstag ergab die in Tabelle 4.5 dargestellten Werte.

Tabelle 4.5: Gaschromatographiemessung

Straße	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂
	%	%	%	%
Referenz	0,20	9,02	57,7	33,1
Versuch	0,21	2,05	59,8	38,0

Aufgrund des vorhandenen Stickstoffanteils in der Messung der Referenzstraße, bei gleichzeitigem geringem Sauerstoffanteil, wurde auf das Vorhandensein von Luft im Faulbehälter geschlossen. Diese könnte z. B. bei der Entnahme der ausgefaulten Schlammprobe über die Wassertasse des Faulbehälters in diesen eindringen. Das baulich und versuchstechnisch bedingte Vorgehen bei der Probenahme, der Befüllung und der Faulschlammmentnahme aus den halbtechnischen Faulbehältern konnte im Versuchsbetrieb nicht anders realisiert werden (siehe Kapitel 3.1.3). Der absolut erreichbare Methananteil in der Faulung wird dementsprechend oberhalb der gemessenen Werte liegen. In der Auswertung wurde der Restgasanteil zu maximal 10 %

angenommen und die jeweiligen CO₂ und CH₄-Anteile hochgerechnet. Der gemessene Volumenstrom wurde dementsprechend korrigiert, wobei der Fehler je nach Versuchsreihe zwischen 1-4 % (etwa 2 l) des täglichen Volumenstroms lag. Der Fehler in der Referenzstraße lag dabei zumeist höher als in der Versuchsstraße, was auf die insgesamt geringere tägliche Gasproduktion in den Versuchsreihen 3 und 4 zurückzuführen ist.

4.3 Versuchsreihe 1

Für die Versuchsstraße wurde ein Schlammalter von $t_{TS} = 25$ d eingestellt. Der im Versuchsbetrieb anfallende PS wurde verworfen. Der ÜSS ging nach einer Voreindickung in die Faulung.

4.3.1 Reinigungsleistung im MBR

In Bild 4.7 sind die Konzentrationen an organischen Summenparametern in den Zulaufen zum Belebungsbecken der Referenz- und in der Versuchsstraße dargestellt. Der Unterschied zwischen den Straßen bzgl. der Konzentration eines Parameters bilden den Einfluss der Vorklärung ab. Durch die Vorklärung ergeben sich deutlich niedrigere Zulaufkonzentrationen an Organik in der Versuchsstraße.

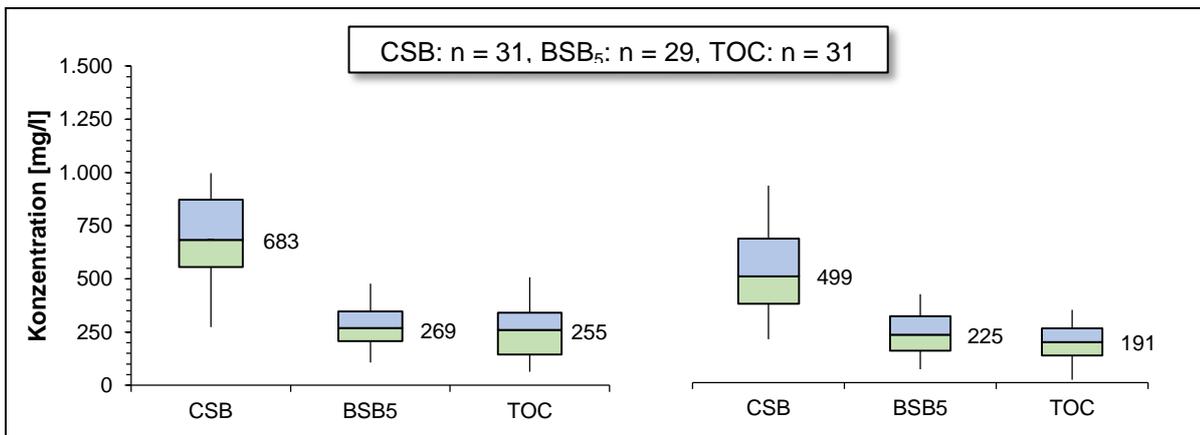


Bild 4.7: Konzentrationen organischer Summenparameter im Zulauf zum Belebungsbecken für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 1

Das CSB/BSB₅-Verhältnis des nicht vorgeklärten Abwassers liegt bei 2,67 und somit leicht oberhalb des im kommunalen Abwasser erwarteten Bereichs von 2,0 bis 2,5. Aufgrund von Erfahrungswerten sind Werte größer 2 als schlecht biologisch abbaubar einzustufen [IMHOFF ET AL., 2006; N. N., o. J.]. Durch die Vorklärung änderte sich das Verhältnis im Zulauf der Versuchsstraße leicht auf 2,37.

Der Vergleich der Schlammbelastungen beider MBR-Straßen (Bild 4.8) ergab nach zunächst höheren Werten für die Versuchsstraße schließlich ähnliche Belastungen für beide Straßen.

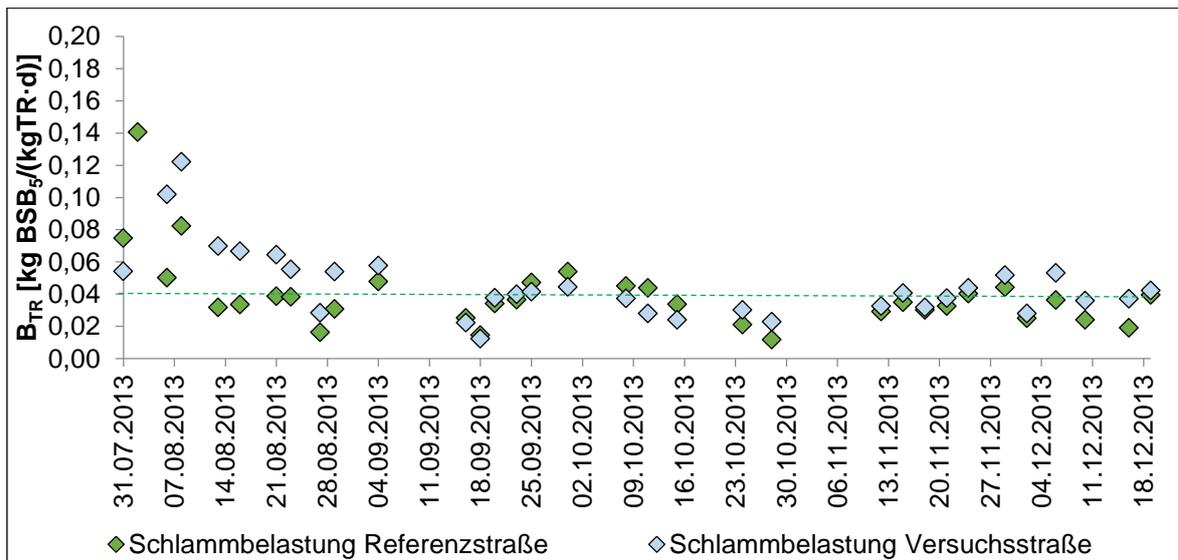


Bild 4.8: Schlammbelastung im MBR der Referenz- und der Versuchsstraße sowie Auslegungswert (---) der Referenzstraße (siehe Kapitel 3.1.2) für Versuchsreihe 1

Dabei konnte der sich aus der Auslegung nach ATV-DVWK-A 131 (2000) ergebende Zielwert von $B_{TR} = 0,04 \text{ kg BSB}_5/(\text{kg TS} \cdot \text{d})$ gut eingehalten werden. Die zunächst hohe Schlammbelastung der Versuchsstraße erklärt sich mit einem zu Anfang der Versuche sehr niedrigen TR-Gehalt in der Belebung, welcher sich im Laufe von Versuchsreihe 1 erhöhte. Die MBR-Ablaufkonzentrationen und die Eliminationen von CSB, BSB₅ und TOC sind in Bild 4.9 dargestellt. Dabei sind für die Versuchsstraße die Gesamteliminationen für Vorklärung und MBR angegeben.

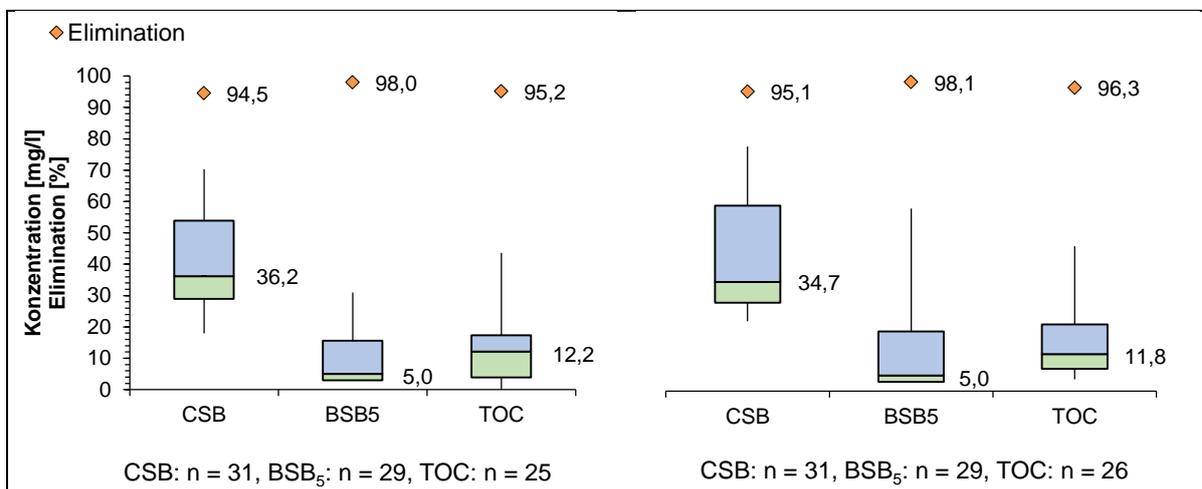


Bild 4.9: Ablaufkonzentrationen und Eliminationen von CSB, BSB₅ und TOC für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 1

Für beide Straßen konnten sehr ähnliche Ablaufwerte erreicht werden. Durch die verringerte absolute organische Belastung aufgrund der Primärschlammmentnahme im Zulauf des MBR der Versuchsstraße im Vergleich zur Referenzstraße war ein geringeres Schlammwachstum feststellbar. In Bild 4.10 sind die Überschussschlammproduktion und die TR-Gehalte beider MBR als Wochenmittelwerte dargestellt.

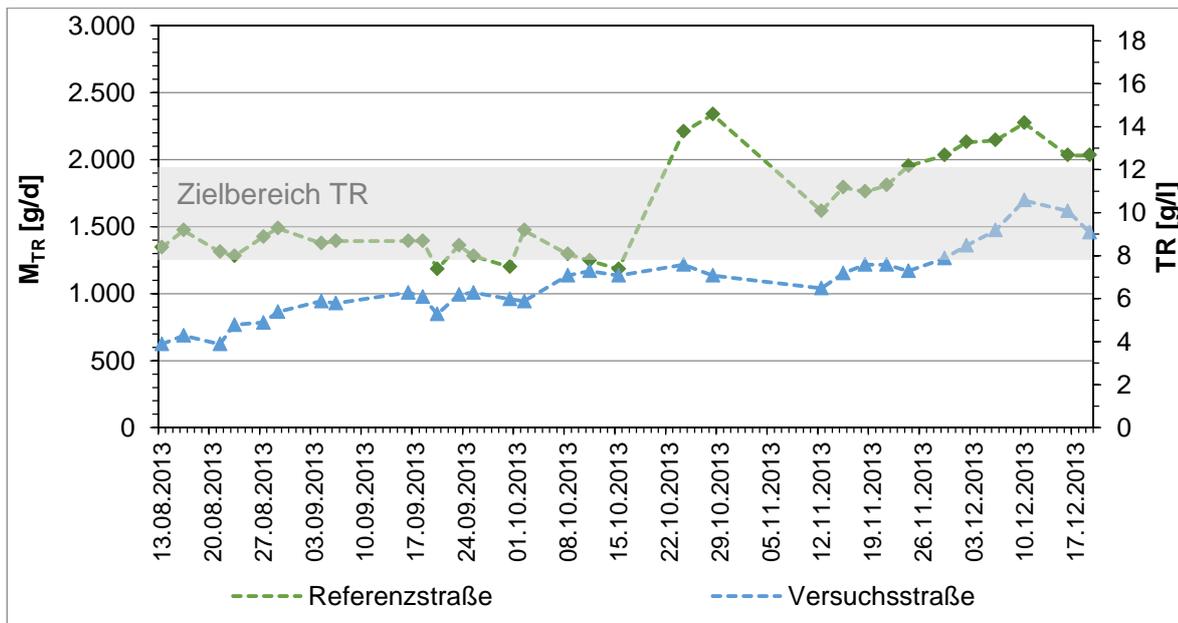


Bild 4.10: Entwicklung des Überschussschlammabzuges und des TR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 1

Beide MBR-Straßen lagen vor Beginn der Versuchsreihe unterhalb des gewünschten (grau hinterlegten) TR-Bereichs. Für die Referenzstraße konnte durch kurzfristiges Aussetzen des ÜSS-Abzuges für zwei Tage eine schnelle Anpassung vorgenommen werden, so dass ein TR > 8 g/l über den gesamten Versuchszeitraum eingehalten werden konnte. Für die Versuchsstraße stieg der TR von anfangs 4 g/l langsam auf 10 g/l zum Ende der Versuchsreihe. Der Fokus des Betriebs lag auf der Einhaltung des Schlammalters, d. h. die Versuchsreihe wurde mit einem möglichst konstanten ÜSS-Abzug in beiden MBR gefahren. Die TR-Anhebung konnte somit im Versuchsbetrieb nur sehr langsam stattfinden. Die Mediane und Mittelwerte für TR und GV in beiden MBR können Tabelle 4.6 entnommen werden.

Tabelle 4.6: TR und GV des belebten Schlammes im MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 1

	Referenzstraße		Versuchsstraße	
	TR	GV	TR	GV
	g/l	%	g/l	%
Median	9,2	70,8	6,5	69,0
Mittelwert	10,1	71,0	6,7	69,7

Aus Bild 4.11 können die Ablaufkonzentrationen der Stickstoffverbindungen beider MBR entnommen werden.

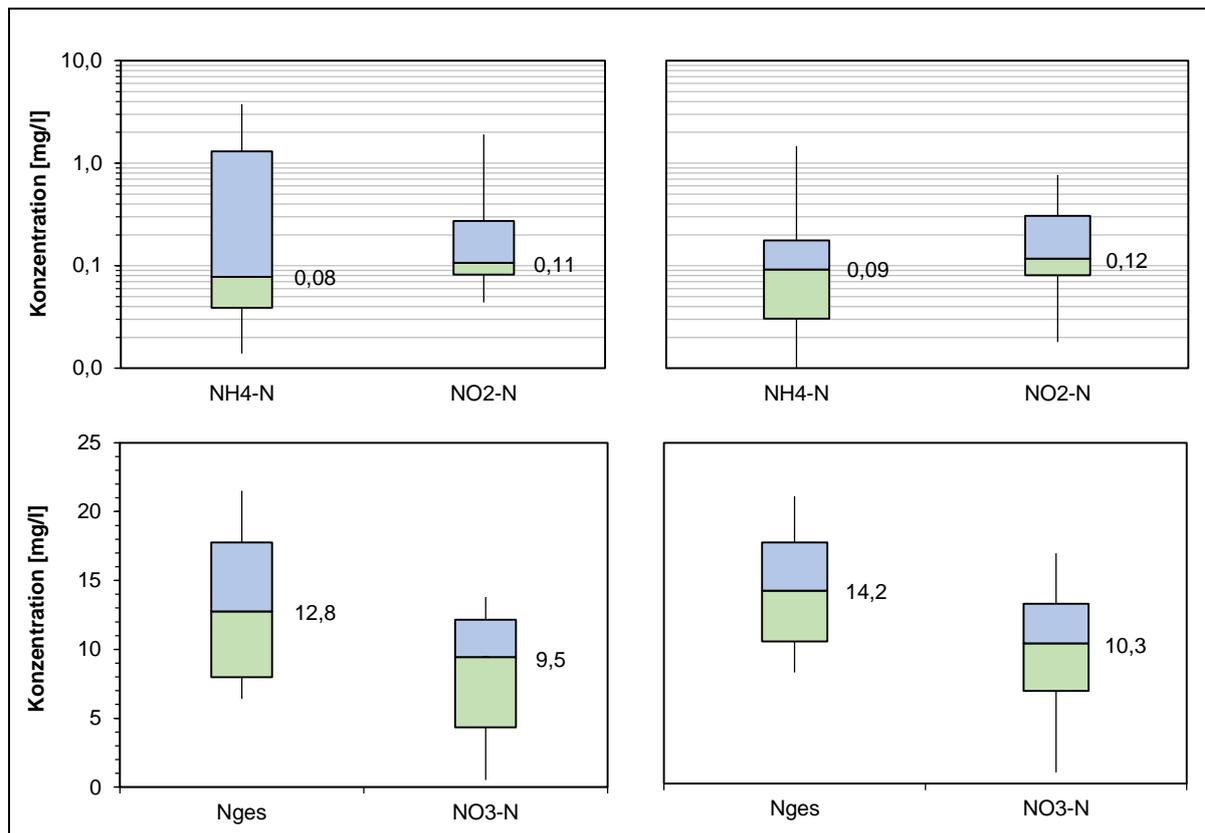


Bild 4.11: Konzentrationen von Ammoniumstickstoff, Nitritstickstoff, Gesamtstickstoff und Nitratstickstoff im MBR-Ablauf für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 1 (n = 30)

Die Kohlenstoffentnahme in der Vorklärung hatte keine quantifizierbare Auswirkung auf die Denitrifikation in der Versuchsstraße. Die NO₃-N Ablaufwerte liegen in beiden Straßen nahe zusammen. Die Ergebnisse zeigen, dass für die Parameter NH₄-N und NO₂-N in der Versuchsstraße durchgängig sichere Ablaufwerte eingehalten werden konnten. Dies wird vor allem bei der Betrachtung des 85 %-Perzentils deutlich. Die Elimination des Gesamtstickstoffs lag im Mittelwert für die Referenzstraße bei 82,7 % und für die Versuchsstraße bei 81 %. Für NH₄-N konnten mittlere Eliminationen von 99,9 % (Referenzstraße) und 99,8 % (Versuchsstraße) erreicht werden.

Die mittlere Reinigungsleistung der Versuchsstraße ist mit der Referenzstraße nahezu identisch. Beide Straßen können bei $t_{TS} = 25$ d und der o. a. Schlammbelastung für MBR typische, sehr gute Reinigungsergebnisse erzielen.

4.3.2 Filtrationsleistung der MBR

4.3.2.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit

Nach Installation der Onlinemessung wurden der Permeatvolumenstrom und der Transmembrandruck (TMP) der Versuchs- (MBR 2) und der Referenzstraße (MBR 1) in 10-Minuten-Intervallen aufgezeichnet. In Bild 4.12 sind der Bruttovolumenstrom, der TMP,

die dazugehörigen TR-Gehalte in den Belebungsbecken beider Straßen und die Temperatur im Zulauf der Kläranlage Neuss-Süd dargestellt.

Die starken Schwankungen im Volumenstrom der Versuchsstraße (nicht dargestellt) können auf Gasblasen im MID zurückgeführt werden, welche durch permeatseitige Ausgasung gelöster Luft im Wasser entstehen. Zur besseren Vergleichbarkeit beider MBR-Straßen wurden daher für die Versuchsstraße Wochenmittelwerte des Bruttovolumens dargestellt (blaue Linie). In den späteren Versuchsreihen wurde zusätzlich ein Flügelrad-durchflussmesser installiert. Dadurch konnte die Einhaltung des angestrebten Nettovolumenstromes von 200 l/h überprüft werden.

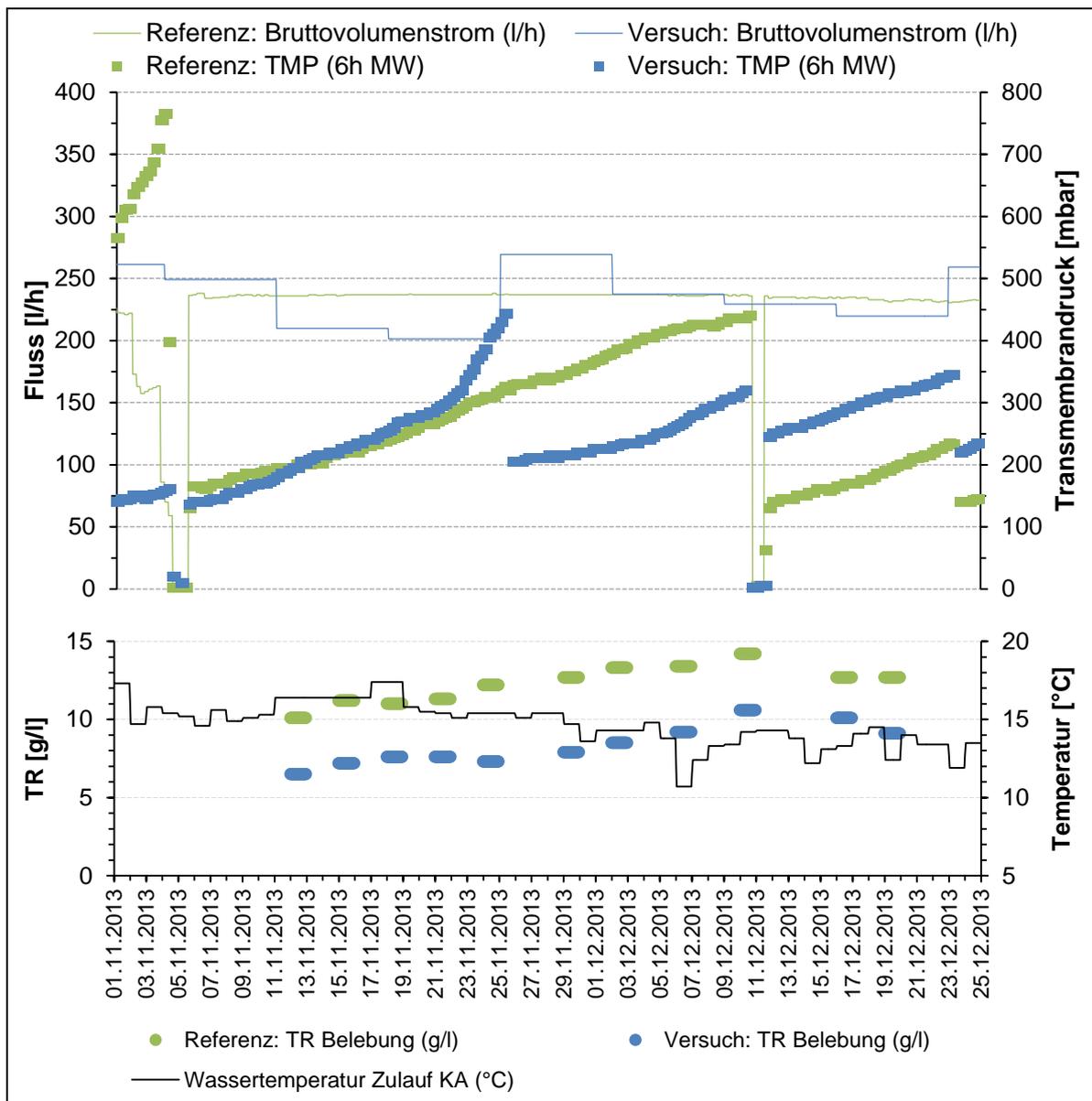


Bild 4.12: Fluss, Transmembrandruck und TR von Versuchs- und Referenzstraße in Versuchsreihe 1

Die aus dem Bruttovolumenstrom und dem Transmembrandruck errechnete Permeabilität der Membranen wurde nicht um Viskositätseinflüsse bereinigt. Zum Vergleich der Straßen

wurde daher der TMP herangezogen und dargestellt. Der TMP (blaue und grüne Quadrate) zeigt eine ähnliche zeitliche Veränderung der Leistungsfähigkeit der Membranen in beiden Straßen. Sprünge ergeben sich durch Membranreinigungen (siehe Kapitel 3.5). Die Versuchsstraße kann nach der Reinigung Anfang Dezember 2013 nicht das Niveau der Referenzstraße erreichen. Anzumerken ist dabei, dass am 28.10.2013 (noch keine Onlinedaten, daher nicht dargestellt) die Membranen beider Straßen ausgetauscht wurden, wobei in der Referenzstraße zwölf neue Module verbaut wurden, wogegen in der Versuchsstraße sechs neue und sechs gebrauchte Module eingebaut wurden. Somit ist in der Versuchsstraße eine Vorbeanspruchung eines Teils der Membranen durch irreversibles Fouling wahrscheinlich.

Der aufgrund des PS-Abzuges in der Versuchsstraße niedrigere TR im Belebungsbecken hat bei einem Schlammalter von $t_{TS} = 25$ d keine starken Auswirkungen auf die zeitliche Veränderung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Membranen. Mit dem Anstieg des TR in der Versuchsstraße (blaue Punkte) geht eine Verlangsamung des TMP-Anstiegs einher.

4.3.2.2 Filtrationseigenschaften des belebten Schlammes

Im Laufe der Versuchsreihe 1 konnten für die SFI Werte des belebten Schlammes die in Bild 4.13 dargestellten Spannweiten ermittelt werden.

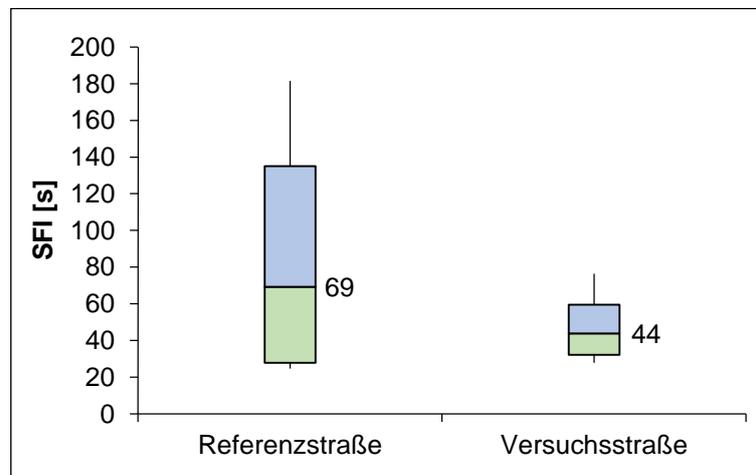


Bild 4.13: Auf den %TR bezogener Schlammfiltrationsindex (SFI) des belebten Schlammes der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 1

Der auf den %TR bezogene SFI der Referenzstraße wies einen Median von 69 s auf. Alle Werte lagen dabei im Bereich von 25 bis 180 s. In der Versuchsstraße wurde ein Median von 44 s ermittelt, mit einem Messwertbereich von 28 bis 77 s. Nach THIEMIG (2011) kann daraus auf eine bessere Filtrierbarkeit des belebten Schlammes aus der Versuchsstraße geschlossen werden. Eine zeitliche Abhängigkeit des SFI zum TMP konnte nicht festgestellt werden.

4.3.3 Gasertrag und Methangehalt in der Faulung

Die Tageswerte (Werktage) der Gasqualität und der Gasvolumenströme können Bild 4.14 entnommen werden. Es wird deutlich, dass die Tageswerte des Gasvolumenstromes (schwarze Rauten) zum Teil starken Schwankungen unterworfen waren. Das CH_4 zu CO_2 -Verhältnis der Versuchsstraße unterscheidet sich nicht signifikant von dem der Referenzstraße (siehe auch Tabelle 4.7). Aufgrund der gleichen Zusammensetzung der Abwasserinhaltsstoffe im Zulauf beider Straßen, vor allem in Bezug auf die Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen wurde dies so erwartet. In den Laborversuchen aus EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP ET AL., 2011B) wurde für den Methangehalt des PS und des ÜSS der Kläranlage Aachen-Soers ebenfalls sehr ähnliche Methangehalte gemessen. Somit ist zu vermuten, dass sich das Verhältnis an Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen innerhalb des Belebungsbeckens nicht derart stark verändert, dass bei Faulung des Mischschlammes aus ÜSS und PS bei Primärschlammabzug andere Methangehalte als im ÜSS bei Betrieb ohne Vorklärung vorliegen.

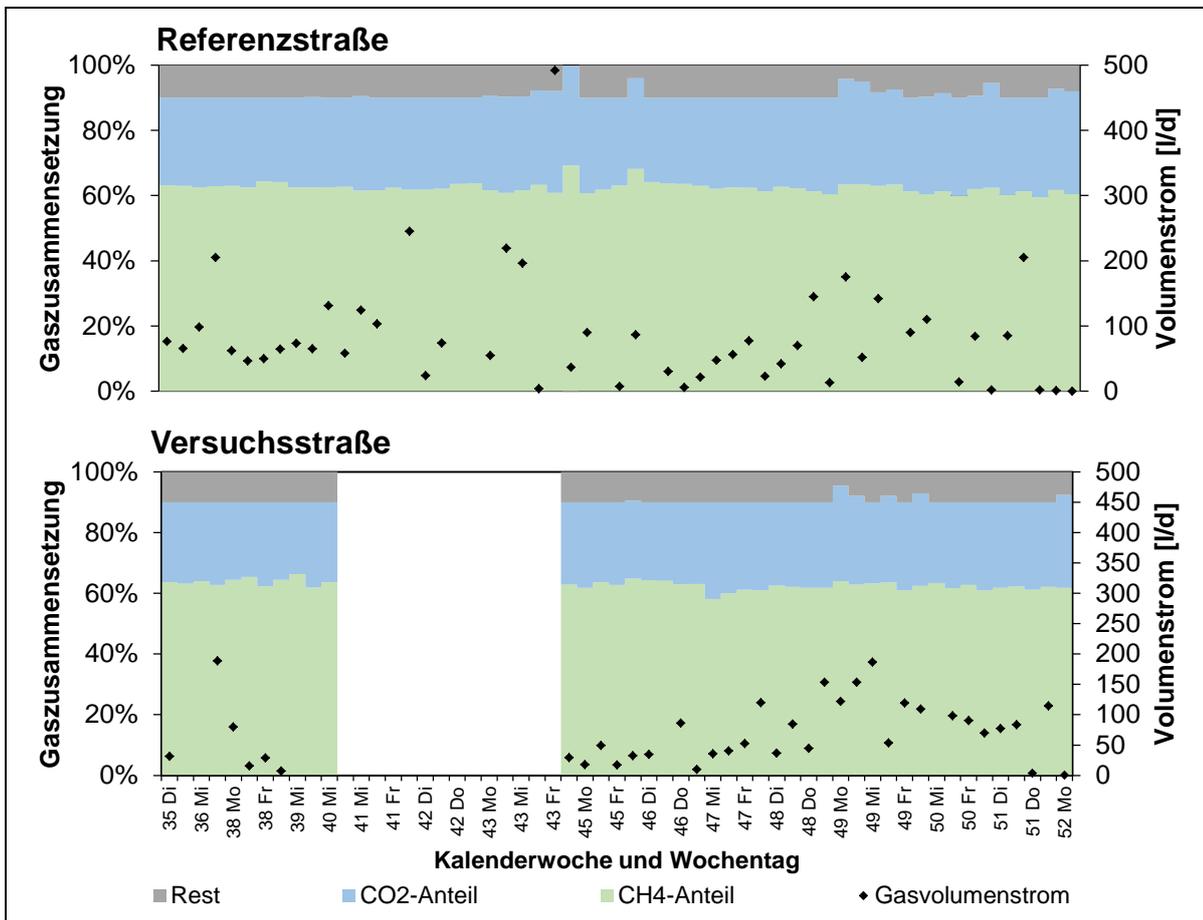


Bild 4.14: Gasvolumenstrom und -zusammensetzung für die Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 1

Für die Versuchsstraße konnten im Zeitraum der 41. bis 43. Kalenderwoche (KW) 2013 keine Gasvolumenströme bestimmt werden, da der Gaszähler aufgrund eines Defekts

ausgetauscht werden musste. Dieser Zeitraum wird für die Versuchsstraße in den nachfolgenden Betrachtungen daher nicht berücksichtigt.

Für die Bestimmung der spezifischen Gasproduktion wurden die insgesamt im Zeitraum der Versuchsreihe erzeugten Gasvolumina über die Anzahl der Versuchstage gemittelt und die mittleren täglichen Massenströme an organischer Trockensubstanz M_{oTR} im Input der Faulbehälter errechnet.

Daraus ergeben sich die in Tabelle 4.7 dargestellten spezifischen Gasproduktionen. Zudem sind Minimal-, Mittel und Maximal-Werte für die gemessenen CH_4 und CO_2 -Anteile angegeben.

Tabelle 4.7: Tägliche und spezifische Gaserträge aus der Faulung der Überschuss-schlämme, sowie CH_4 und CO_2 -Anteile im Faulgas in Versuchsreihe 1

Straße	Gasproduktion		Gasqualität		
	täglich	spezifisch			
	<i>l/d</i>	<i>l/kg oTR,zu</i>		%- CH_4	%- CO_2
Referenz	82	288	Min	59,4	25,6
			Mittel	62,5	28,4
			Max	69,5	32,4
Versuch	58	264	Min	58,1	23,7
			Mittel	62,7	27,7
			Max	66,3	31,9

Die spezifische Gasproduktion in der Referenzstraße lag im Vergleich zur Versuchsstraße höher. Dies lässt sich durch die Entnahme der leichter abbaubaren PS-Fraktion in der Vorklärung der Versuchsstraße erklären. Diese wird in der Referenzstraße nicht abgeschieden und kann – trotz weitgehender aerober Stabilisierung des Schlammes im MBR nach $t_{TS} = 25$ d – noch zur erhöhten Gasproduktion beitragen. Eine weitere Begründung könnte in der höheren Raumbelastung im Faulbehälter der Referenzstraße zu finden sein, welche sich aufgrund des höheren TR im ÜSS und der besseren Eindickung des Input-Volumenstroms vor der Faulung ergab (Tabelle 4.8).

Tabelle 4.8: Mittelwerte zu TR und GV, sowie der zugehörigen Massenströme in beiden Straßen in Versuchsreihe 1

Straße	Probenahmestelle	TR	GV	M_{oTR}	M_{TR}
		g/l	%	g/d	g/d
Referenz	MBR	10,1	71,0	1.154	1.620
	Input FB	13,4	71,2	347	479
	Output FB	9,3	65,1	213	334
Versuch	MBR	6,7	69,7	756	1.078
	Input FB	8,7	70,6	221	310
	Output FB	7,2	66,2	170	257
	PS	22,8	76,6	613	794

Aufgrund des höheren Massenstroms im Input der Faulung bei leicht erhöhtem GV lag der M_{oTR} im Input FB der Referenzstraße im Mittel um 55-60 % oberhalb des M_{oTR} im Input FB der Versuchsstraße. Die Raumbelastung der Faulbehälter bei einem Nutzvolumen von 750 l berechnete sich zu 0,49 kg oTR/(m³-d) für die Referenzstraße und 0,31 kg oTR/(m³-d) für die Versuchsstraße (siehe Bild 4.15). Dies liegt deutlich unterhalb der empfohlenen Raumbelastung von 2 - 4 kg oTR/(m³-d) aus dem ATV Handbuch Klärschlamm (LESCHBER ET AL., 1996). Somit besteht bei verbesserter Voreindickung deutliches Optimierungspotential hinsichtlich der benötigten Faulraumkapazität und des Faulgasertrages.

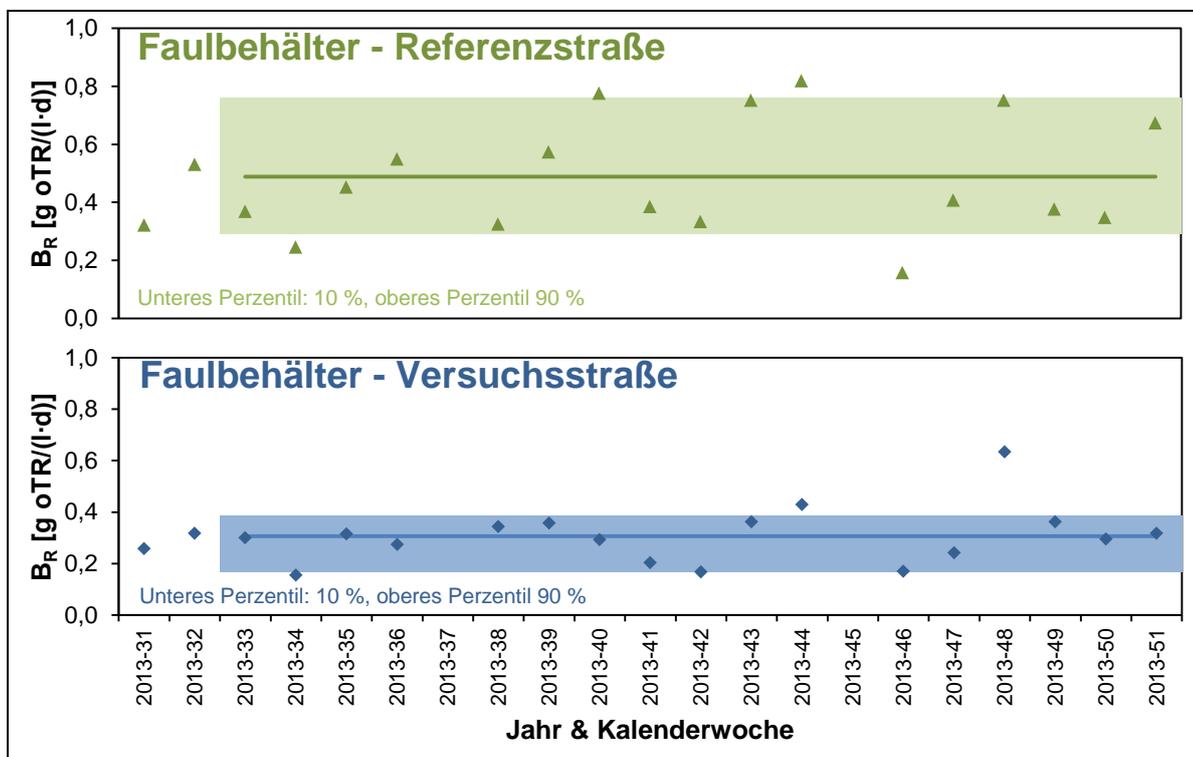


Bild 4.15: Raumbelastung (B_R) in beiden Faulbehältern in Versuchsreihe 1

Die dargestellten grünen und blauen Flächen in den Diagrammen zeigen den Wertebereich vom 10 %-Perzentil bis zum 90 %-Perzentil an. Unter Ausschluss der Ausreißer kann somit anhand der Flächen die Schwankung der Raumbelastung (B_R) schnell abgelesen werden. Die Linien hingegen geben die Medianwerte innerhalb der Versuchsreihe für den jeweiligen Faulbehälter an.

Der rechnerische Abbau an organischer Trockenmasse nach 21 d Faulzeit betrug 39 % in der Referenzstraße und 23 % in der Versuchsstraße, was auf eine weitgehende Stabilisierung der Organik in der Belebung der Versuchsstraße hindeutet. Nach ROEDIGER ET AL. (1990) ist für reinen Überschussschlamm nach 21 d Faulzeit ein Abbaugrad η_{OTR} von ca. 36-37 % zu erwarten. KAPP ET AL. (1994) geben für Überschussschlamm im Bereich von $15 \text{ d} \leq t_{TS} \leq 30 \text{ d}$ einen Abbaugrad von etwa 32-40 % für mesophile Milieubedingungen an.

4.3.4 Entwässerungs- und Absetzeigenschaften im MBR, sowie vor und nach anaerober Stabilisierung

In Bild 4.16 sind die Schlammvolumenindices (ISV) im Belebungsbecken beider MBR-Straßen, sowie die des eingedickten Faulbehälter-Inputs und des gefaulten Outputs gegenübergestellt. Der ISV des Überschussschlammes in der Nitrifikationsstufe der Referenzstraße liegt zumeist im grauhinterlegten Bereich von 80-120 ml/g, so dass eine ausreichende Absetzbarkeit gewährleistet ist. In der Versuchsstraße ist der ISV des ÜSS demgegenüber erhöht.

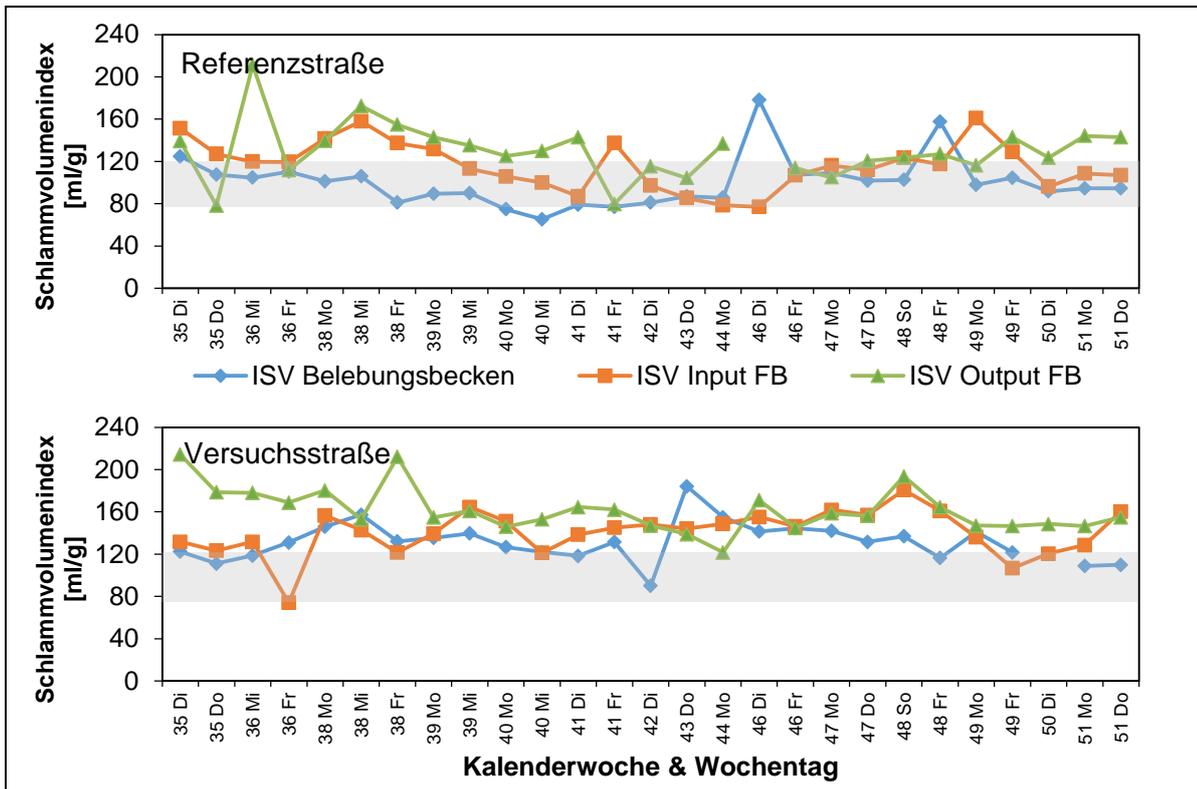


Bild 4.16: Schlammvolumenindex (ISV) in der Belegung und Veränderung durch Eindickung (Input FB) und Faulung (Output FB) für die Referenz- und die Versuchsstraße in Versuchsreihe 1

Die Absetzbarkeit des Faulschlammes verschlechtert sich erwartungsgemäß durch die anaerobe Behandlung in beiden Straßen. Auch die Entwässerbarkeit der Schlämme nimmt für beide Straßen nach der anaeroben Stabilisierung deutlich ab (siehe Bild 4.17).

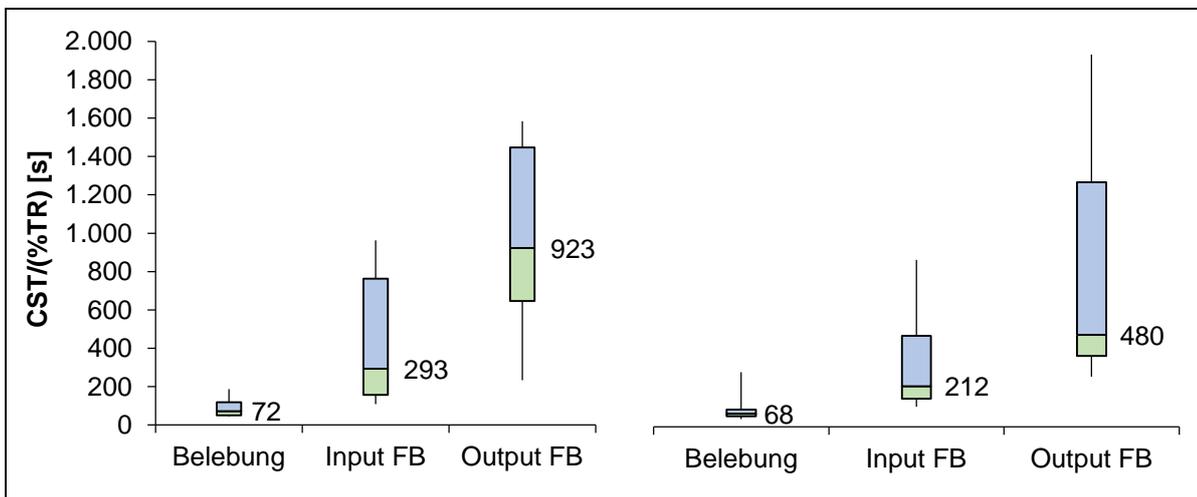


Bild 4.17: Auf den TR normierte Kapillare Fließzeit (CST/TR) der Schlämme für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 1

Im Belebungsbecken beider Straßen liegt der auf den TR normierte CST-Wert in der Einteilung nach DICHTL UND KOPP (2001) mit Mittelwerten von 82 s (Referenz), bzw. 77 s (Versuchsstraße) im mittelmäßig entwässerbaren Bereich. Durch die Eindickung nimmt der Wassergehalt ab, so dass sich die Entwässerbarkeit zwangsläufig verschlechtert.

Nach der anaeroben Schlammbehandlung sind die Ergebnisse der CST/TR-Bestimmung nochmals deutlich verschlechtert. Dies ist analog zu den Beobachtungen in EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B). Auffällig ist, dass der Medianwert für die Schlammfäulung der Versuchsstraße deutlich niedriger liegt als der Median der Referenzstraße. Die Entwässerbarkeit des Faulschlammes scheint sich hier nicht im selben Maße zu verschlechtern.

4.4 Versuchsreihe 2

Für die Versuchsstraße wurde ein Schlammalter von $t_{TS} = 15$ d eingestellt. Der im Versuchsbetrieb anfallende PS wurde verworfen. Der ÜSS ging für beide Straßen nach einer Voreindickung in die jeweilige Fäulung.

4.4.1 Reinigungsleistung im MBR

Die Konzentrationen an organischen Summenparametern in den MBR-Zuläufen zum Belebungsbecken der Referenz- und der Versuchsstraße sind Bild 4.18 zu entnehmen. Durch die Vorklärung ergeben sich niedrigere Zulaufkonzentrationen an Organik in der Versuchsstraße.

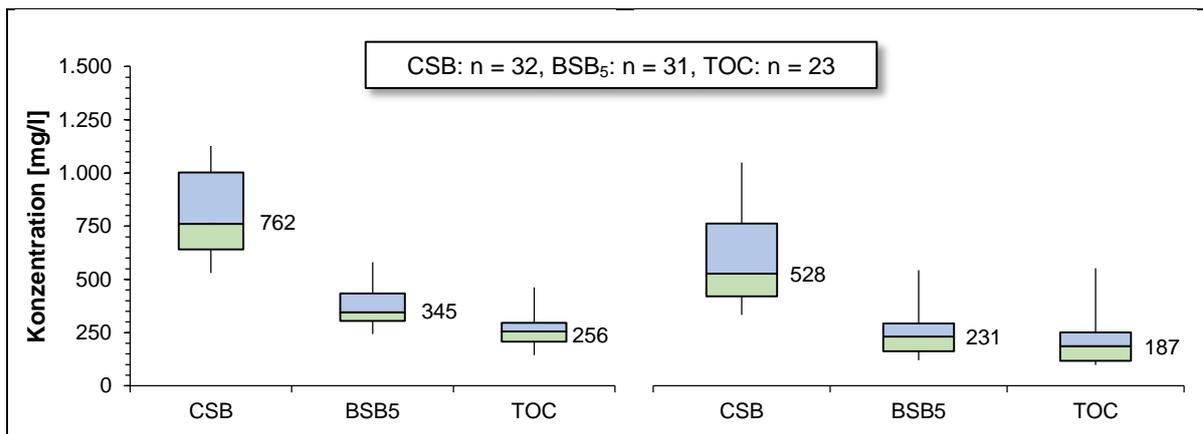


Bild 4.18: Konzentrationen organischer Summenparameter im Zulauf zum Belebungsbecken für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 2

Das CSB/BSB₅-Verhältnis des nicht vorgeklärten Abwassers veränderte sich im Vergleich zur ersten Versuchsreihe und lag hier bei 2,27. Im Zulauf des MBR der Versuchsstraße lag ein leicht verschlechtertes Verhältnis von 2,47 vor. Da die Betriebsweise des Vorklärbeckens zwischen den Versuchsreihen 1 und 2 nicht geändert wurde, ist die plötzliche Verschlechterung des CSB/BSB₅-Verhältnisses im Ablauf der Vorklärung vermutlich auf Schwankungen im Zulauf wie z. B. einem höheren Anteil an gelöstem CSB zurück zu führen. Die auf den Median bezogenen Eliminationen an CSB, BSB₅ und TOC in der Vorklärung ergeben sich zu 30,7 %, 33 % und 26,9 %.

Der Vergleich der Schlammbelastungen beider MBR-Straßen kann Bild 4.19 entnommen werden.

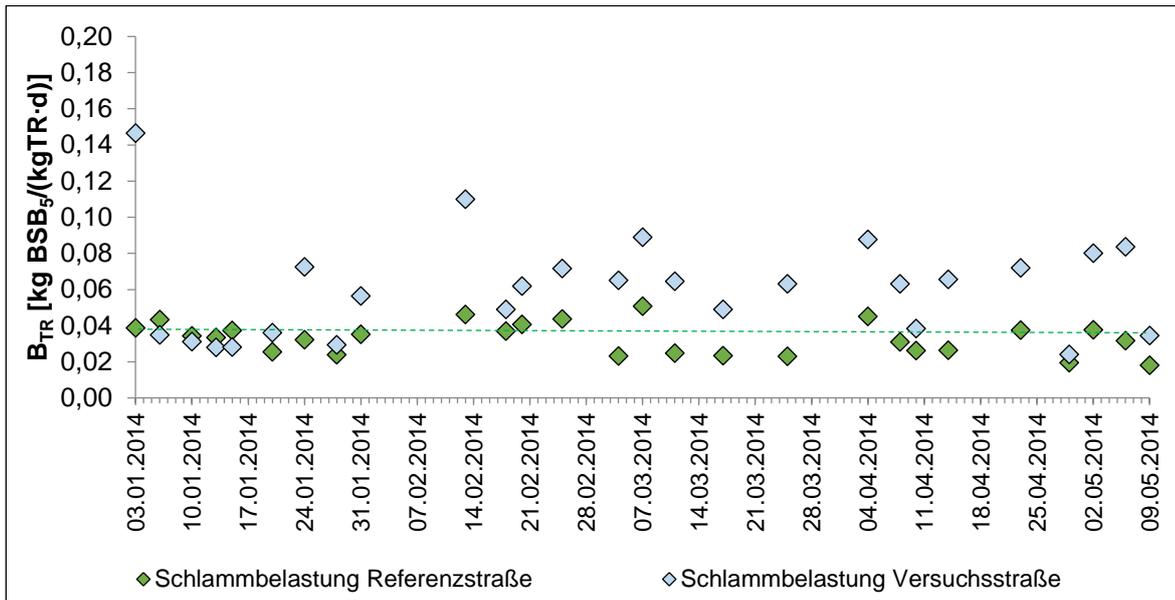


Bild 4.19: Schlammbelastung im MBR der Referenz- und der Versuchsstraße sowie Auslegungswert (---) der Referenzstraße (siehe Kapitel 3.2.2) für Versuchsreihe 2

Für die Referenzstraße konnte der Bemessungswert von 0,04 kg BSB₅/(kg TS·d) gut eingehalten werden. Für die Versuchsstraße ergab sich durch die Absenkung des TR im Belebungsbecken aufgrund der erhöhten Schlammentnahme nach anfänglich niedriger Schlammbelastung im Laufe der Versuchsreihe eine mittlere Schlammbelastung von 0,06 kg BSB₅/(kg TR·d).

In Bild 4.20 sind die Eliminationen von CSB, BSB₅ und TOC beider Straßen bezogen auf den Zulauf zu den Straßen dargestellt.

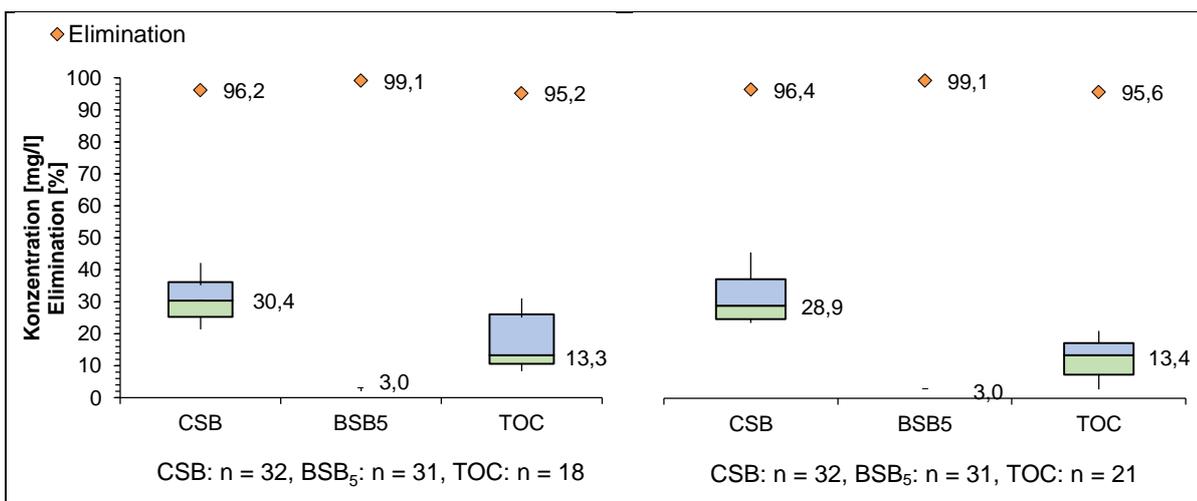


Bild 4.20: Ablaufkonzentrationen und Eliminationen von CSB, BSB₅ und TOC für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 2

Der BSB₅ konnte in beiden Straßen durchgängig vollständig bis unterhalb der Bestimmungsgrenze eliminiert werden. Für CSB und TOC ergaben sich zwischen den Straßen kaum Unterschiede in den mittleren Eliminationen. Die Versuchsstraße konnte allerdings, sowohl bezogen auf das 85-Perzentil, als auch auf den Maximalwert bessere Ablaufwerte für den TOC erreichen. Die insgesamt über das Jahr erreichbare Frachtreduktion an organischen Kohlenstoffverbindungen war hier also signifikant höher.

In Bild 4.21 sind die Überschussschlammproduktion und die TR-Gehalte beider MBR als Wochenmittelwerte dargestellt. Die veränderte Darstellungsform im Vergleich zu Bild 4.10 ist durch die in dieser Versuchsreihe unterschiedlichen ÜSS-Volumenströme in der Referenz- und in der Versuchsstraße bedingt (siehe Tabelle 3.3).

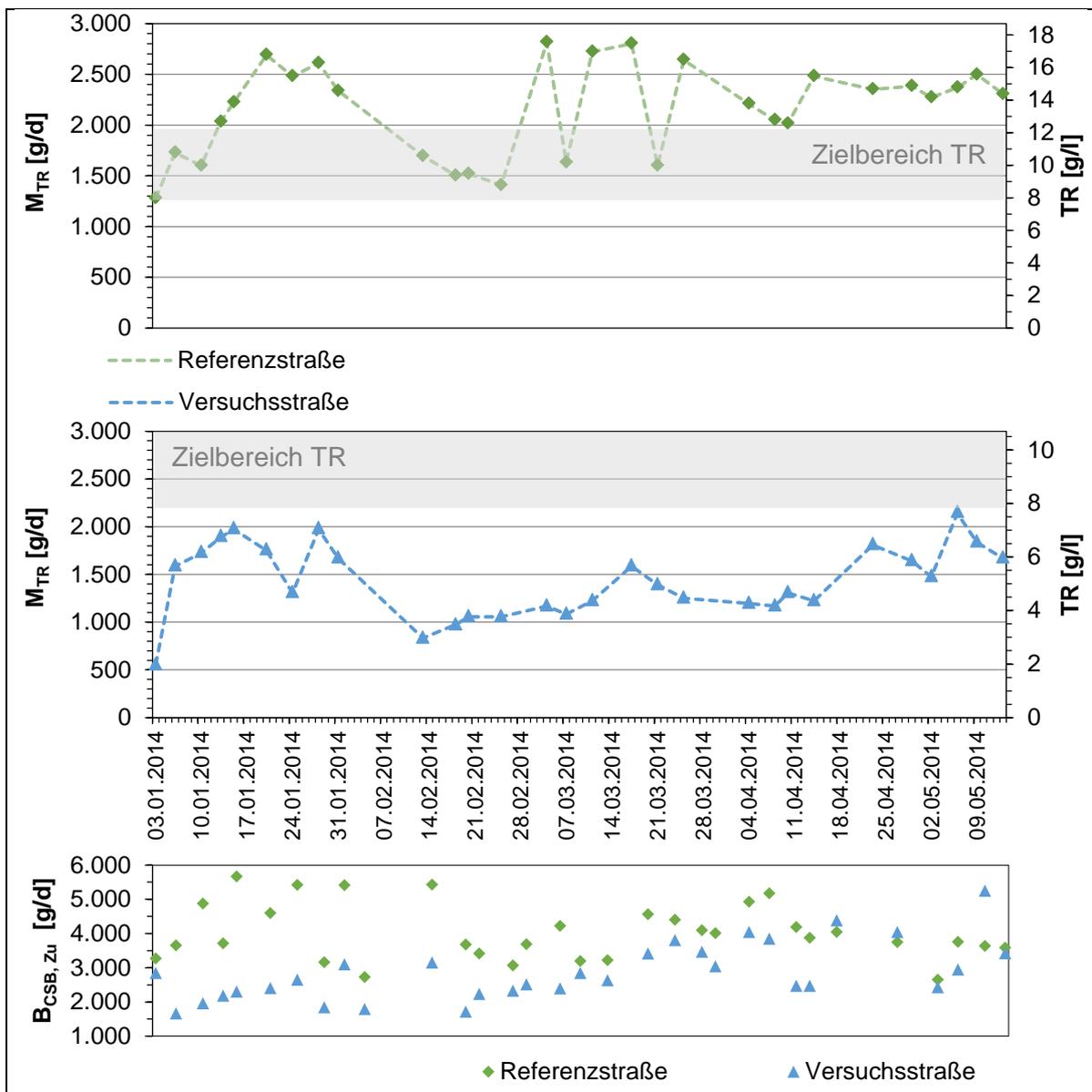


Bild 4.21: Entwicklung des Überschussschlammabzuges und des TR im MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 2

Der TR im MBR der Referenzstraße lag zu Beginn der Versuche im Zielbereich von 8 - 12 g/l. Gegenüber der vorangegangenen Versuchsreihe 1 ergab sich eine deutliche Absenkung, welche aufgrund der unveränderten Betriebsweise der Referenzstraße über die zweiwöchige Übergangsphase durch äußere Einflüsse wie eine geänderte Feststoff- oder CSB-Fracht im Zulauf zu erklären ist. Die deutlichen Veränderungen in der Zulauffracht spiegeln sich auch im TR der Referenzstraße wieder. Im Mittel lag dieser mit 13,5 g/l oberhalb des Zielbereiches von 8 – 12 g/l. In der Versuchsstraße konnte nach der Umstellung auf ein Schlammalter von 15 Tagen bedingt durch die erhöhten ÜSS-Massenstrom ein rascher Abfall auf einen TR von 3 – 3,5 g/l beobachtet werden. Durch die nachfolgende Anpassung der Biozönose auf die veränderten Randbedingungen konnte über die Gesamtzeit der Versuchsreihe ein Anstieg auf 6 – 6,5 g TR/l erreicht werden. Das Erreichen des angestrebten Zielwertes von mindestens 8 g TR/l war unter Einhaltung des Schlammalters nicht möglich. Die Mediane und Mittelwerte für TR und GV beider MBR-Schlämme können Tabelle 4.3 entnommen werden. Der mittlere GV der Versuchsstraße lag mit 64,3 % unterhalb der 72,6 % der Referenzstraße, was durch den geringeren Stabilisierungsgrad in der Versuchsstraße zu erklären ist.

Tabelle 4.9: TR und GV des belebten Schlammes im MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 2

	Referenzstraße		Versuchsstraße	
	TR	GV	TR	GV
	<i>g/l</i>	<i>%</i>	<i>g/l</i>	<i>%</i>
Median	14,4	72,6	4,5	64,3
Mittelwert	13,5	72,2	4,9	65,7

In Bild 4.22 sind die Ablaufkonzentrationen der Stickstoffverbindungen beider MBR dargestellt.

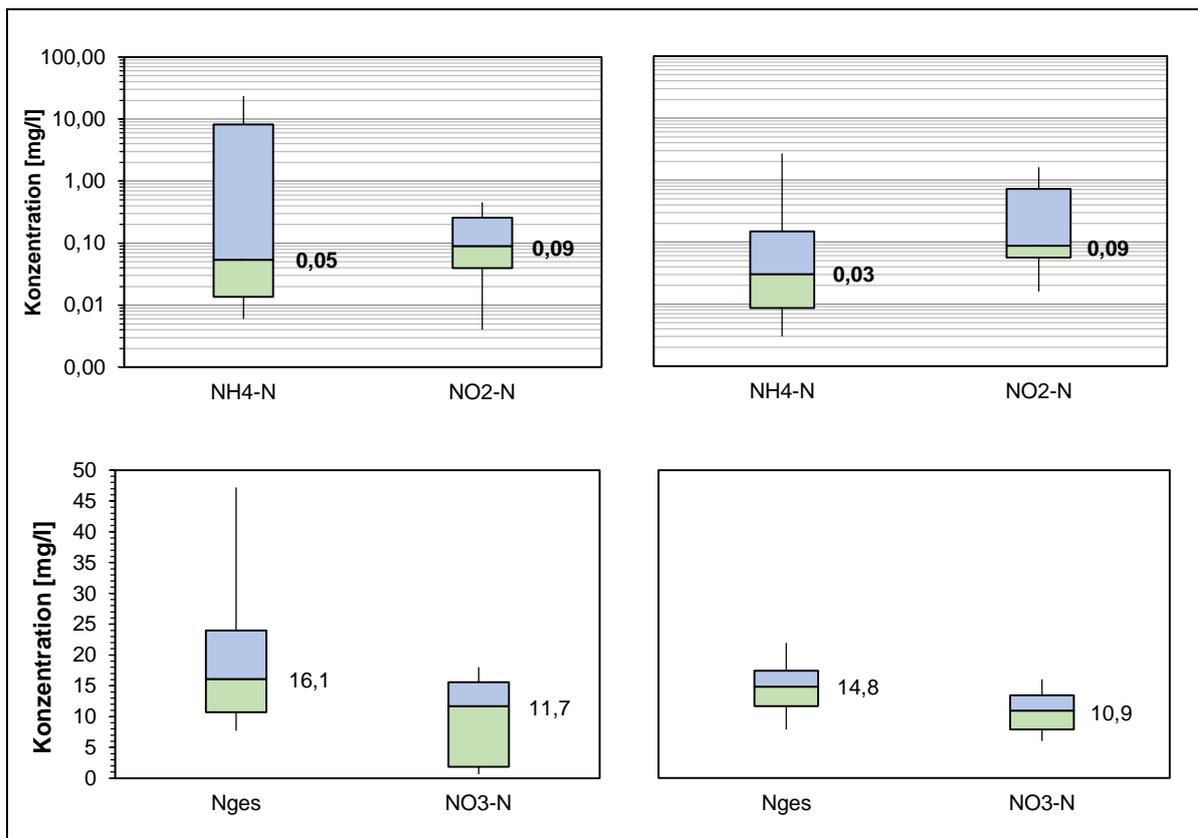


Bild 4.22: Konzentrationen von Ammoniumstickstoff, Nitritstickstoff, Gesamtstickstoff und Nitratstickstoff im Ablauf des MBR für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 2 (n = 31)

Die Medianwerte der Ablaufkonzentrationen beider MBR-Straßen unterschieden sich nur unwesentlich. Analog zu Versuchsreihe 1 (vergleiche Bild 4.11) konnte auch in Versuchsreihe 2 eine Vergleichmäßigung der Ablaufkonzentrationen von Ammoniumstickstoff (NH₄-N) und Gesamtstickstoff der Versuchsstraße beobachtet werden. Die Frachtreduktion an organischem Kohlenstoff im Zulauf des MBR durch die Vorklärung und damit auch im Zulauf der Nitrifikation könnte sich auf diese positiv auswirken. Aufgrund der reduzierten Belastung besteht ein geringerer Sauerstoffbedarf zur Veratmung des organischen Kohlenstoffgehalts. Durch den gesenkten TR im Belebungsbecken der Versuchsstraße steigt zusätzlich der Sauerstoffeintrag durch die Belüftung (vgl. Zusammenhang TR und Grenzflächenfaktor α , z. B. in MOLDT, 2001). Beide Faktoren können sich positiv auf die Elimination der täglichen Spitzenfrachten an NH₄-N auswirken. Eine getrennte Bilanzierung des Denitrifikations- und des Nitrifikationsbeckens hinsichtlich der Frachten an organischen Kohlenstoffverbindungen, N_{ges}, NH₄-N und NO₃-N könnte hier genaueren Aufschluss geben.

4.4.2 Filtrationsleistung im MBR

4.4.2.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit

In Bild 4.23 sind der Bruttovolumenstrom, der TMP der Membranen, die dazugehörigen TR-Gehalte in den Belebungsbecken beider Straßen und die Temperatur im Zulauf der Kläranlage Neuss-Süd dargestellt.

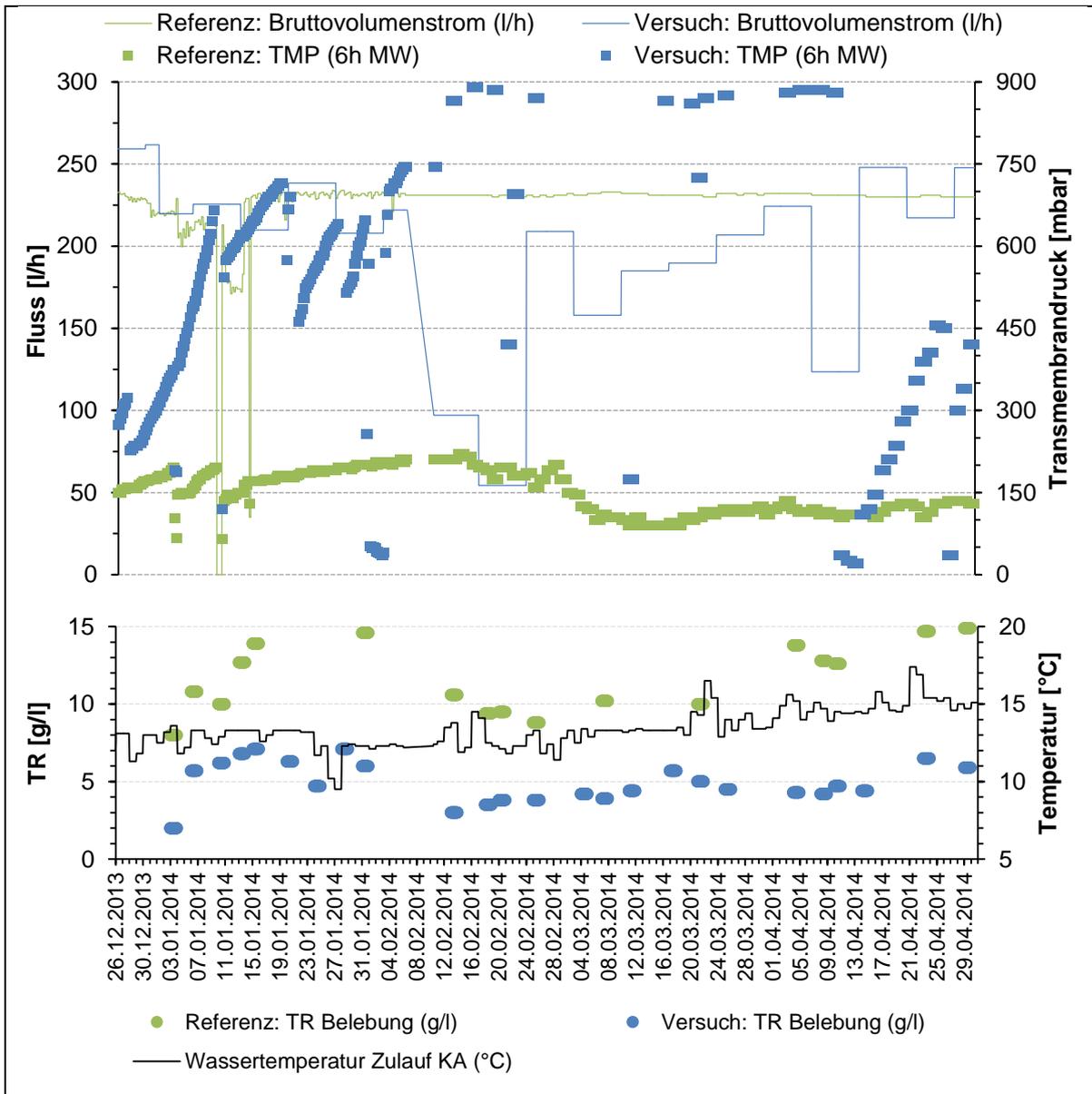


Bild 4.23: Fluss, Transmembrandruck und TR von Versuchs- und Referenzstraße in Versuchsreihe 2

In der Referenzstraße konnte ein Bruttovolumenstrom von 230 l/h gut eingehalten werden. Der zugehörige TMP lag zwischen 90 – 200 mbar. Die Referenzstraße wurde ab dem 14.01.2014 ohne Zwischenreinigung betrieben. Nachdem der TMP zunächst auf ca. 200 mbar anstieg, wurde ab dem 28.02.2014 eine deutliche Verbesserung mit einem TMP um ca. 100 mbar beobachtet. Diese kann zum großen Teil auf die Temperaturerhöhung des Zulaufs zur Kläranlage zurückgeführt werden. In der Versuchsstraße war

nach der Umstellung der Betriebsweise auf 15 Tage Schlammalter innerhalb von wenigen Tagen eine deutliche Steigerung des TMP zu beobachten. Die absoluten Werte der TMP-Messung sind aufgrund der Luftblasen im Permeat (vergleiche Kapitel 4.3.1) nicht aussagekräftig, doch kann deutlich abgelesen werden, dass nach den durchgeführten Reinigungen am 09.01., 18.01., 27.01. und 31.01. jeweils innerhalb weniger Stunden wieder ein deutlich überhöhter TMP vorhanden war. Vom 11.04. bis 13.04. kam es zu einem Ausfall des Filtrationsbetriebs bei fortgeführter Belüftung. Dieser wurde über das Wochenende nicht bemerkt. Im Anschluss konnte eine deutliche Verbesserung des Transmembrandrucks festgestellt werden. Dieser stieg allerdings im Nachgang bis zum 25.04. wieder auf größer 450 mbar an. Trotz nicht optimaler Filtrationsbedingungen wurde der Versuchsbetrieb planmäßig durchgeführt. Das Hauptaugenmerk wurde auf die Bestimmung der erreichbaren Gaserträge gelegt.

4.4.2.2 Filtrationseigenschaften des belebten Schlammes

Im Laufe der Versuchsreihe 2 konnten für die SFI Werte des belebten Schlammes die in Bild 4.24 dargestellten Spannweiten ermittelt werden.

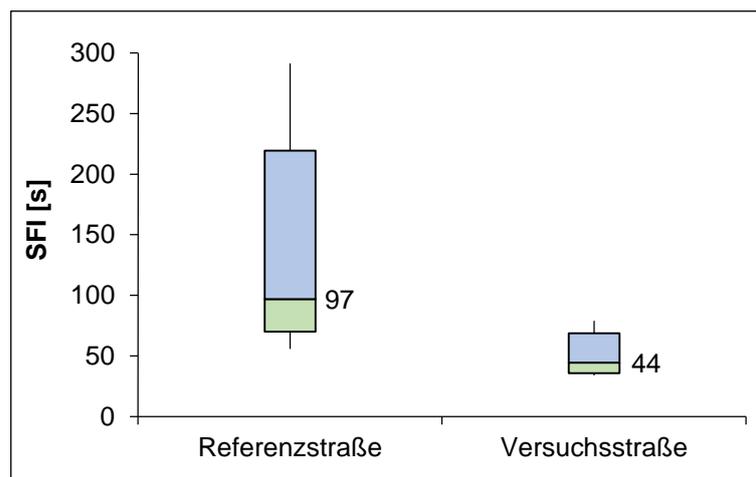


Bild 4.24: Auf den %TR bezogener Schlammfiltrationsindex (SFI) des belebten Schlammes der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 2

Der auf den %TR bezogene SFI der Referenzstraße wies einen Median von 97 s auf. Alle Werte lagen dabei im Bereich von 56 bis 291 s. In der Versuchsstraße wurde ein Median von 44 s ermittelt, mit einem Messwertbereich von 33 bis 79 s. Aufgrund des im vorangegangenen Kapitel 4.4.2.1 dargestellten stark erhöhten TMP in der Versuchsstraße kann die aus dem SFI hervorgehende gute Filtrationsneigung des belebten Schlammes nicht direkt in der Praxis bestätigt werden. Im Laufe der Versuchsreihe wurde allerdings eine Ablagerung von Biopolymeren auf der Membran beobachtet. Eine Biofilmbildung auf der Membran kann bei der SFI-Bestimmung mit einer Laufzeit von weniger als 10 Minuten nicht nachgestellt werden. Zudem ist der SFI in seiner Funktion als Momentaufnahme der aktuellen Filtrierbarkeit des belebten Schlammes zu verstehen. In Bild 4.25 ist erkennbar,

dass der SFI mit 155 s (03.01.2014) zu Beginn der Versuchsreihe 2 kurzzeitig deutlich oberhalb des späteren Medians von 44 s lag. Aufgrund des engen Zeitplans wurde eine Umstellung der Versuchseinstellungen um die Weihnachtszeit gewählt. Dies hatte leider zur Folge, dass eine geringe Datenbasis während des Einfahrbetriebs für Versuchsreihe 2 vorliegt. Somit ist eine längerfristige Verschlechterung des SFI im Zeitraum 20.12.2013 bis 03.01.2014 nicht belegbar.

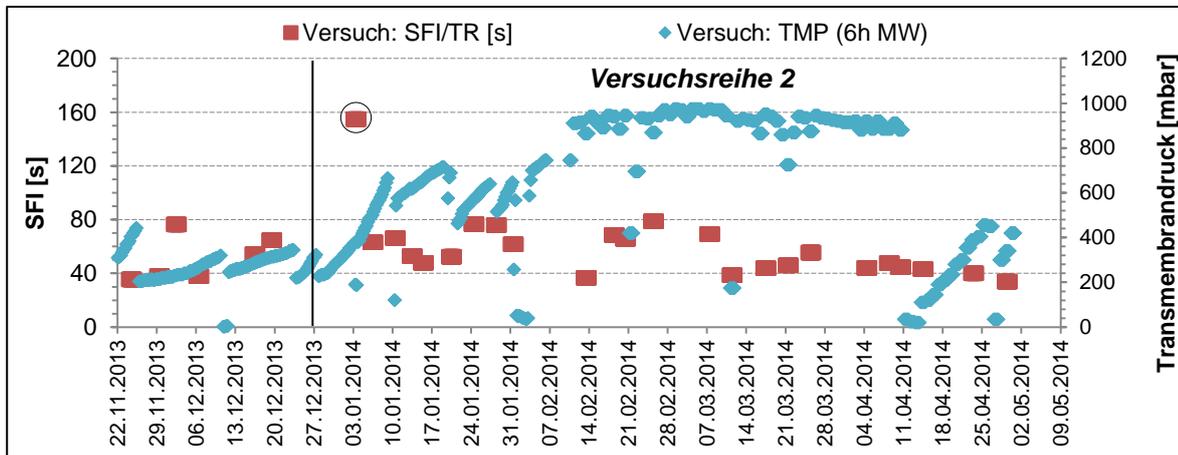


Bild 4.25: Zeitlicher Verlauf des TMP und SFI des belebten Schlammes in der Versuchsstraße für Versuchsreihe 2

Diese Verschlechterung könnte allerdings die deutliche Steigerung des TMP innerhalb weniger Tage erklären. Eine Verblockung der Membranporen in diesem Zeitraum wäre mittels einer chemischen Reinigung nur ungenügend entfernt worden. Eine mechanische Intensivreinigung war ohne eine mehrtägige Einstellung des Versuchsbetriebs jedoch nicht möglich. Die anhand des SFI ermittelte Filtrierbarkeit des belebten Schlammes aus der Versuchsstraße kann nach erfolgter Umstellung auf 15 Tage Schlammalter im Vergleich zur Referenzstraße als gut eingestuft werden. Eine Unsicherheit bezüglich der Aussagekraft des SFI für den langfristigen Filtrationsbetrieb bleibt allerdings.

Für die langfristigen Auswirkungen des Betriebs mit Vorklärung und 15 Tagen Schlammalter sind folglich weitere Untersuchungen der Schlammzusammensetzung zweckmäßig. Deshalb wurden in Versuchsreihe 4 zusätzlich die EPS-Gehalte in der Referenz- und in der Versuchsstraße bestimmt, um genauere Aussagen über die Foulingneigung zu treffen.

4.4.3 Gasertrag und Methangehalt in der Faulung

Aufgrund eines erneuten Ausfalls der verwendeten Balgengaszähler in Versuchsreihe 2 an beiden Faulbehältern stand ab der 4. KW 2014 keine Gas-Volumenstrom-Messung zur Verfügung. Die Aussagekraft der zu Beginn der Versuchsreihe ermittelten Volumenströme war aufgrund des wahrscheinlich bereits dort vorliegenden Defekts (Korrosion und Schlamm Eintritt in beiden Zählern) zweifelhaft. Somit liegen bis zur 7. KW 2014 keine

Volumenstrommessungen vor. Ab diesem Zeitpunkt standen Trommelgaszähler der Firma Ritter zur Verfügung. Bis auf einzelne Ausfälle konnte die Gasqualitätsmessung täglich durchgeführt werden. In Bild 4.26 sind die Ergebnisse der Gasqualitätsmessung für die gesamte Dauer der Versuchsreihe 2 dargestellt, die der Volumenstrommessungen erst ab der 7. KW 2014.

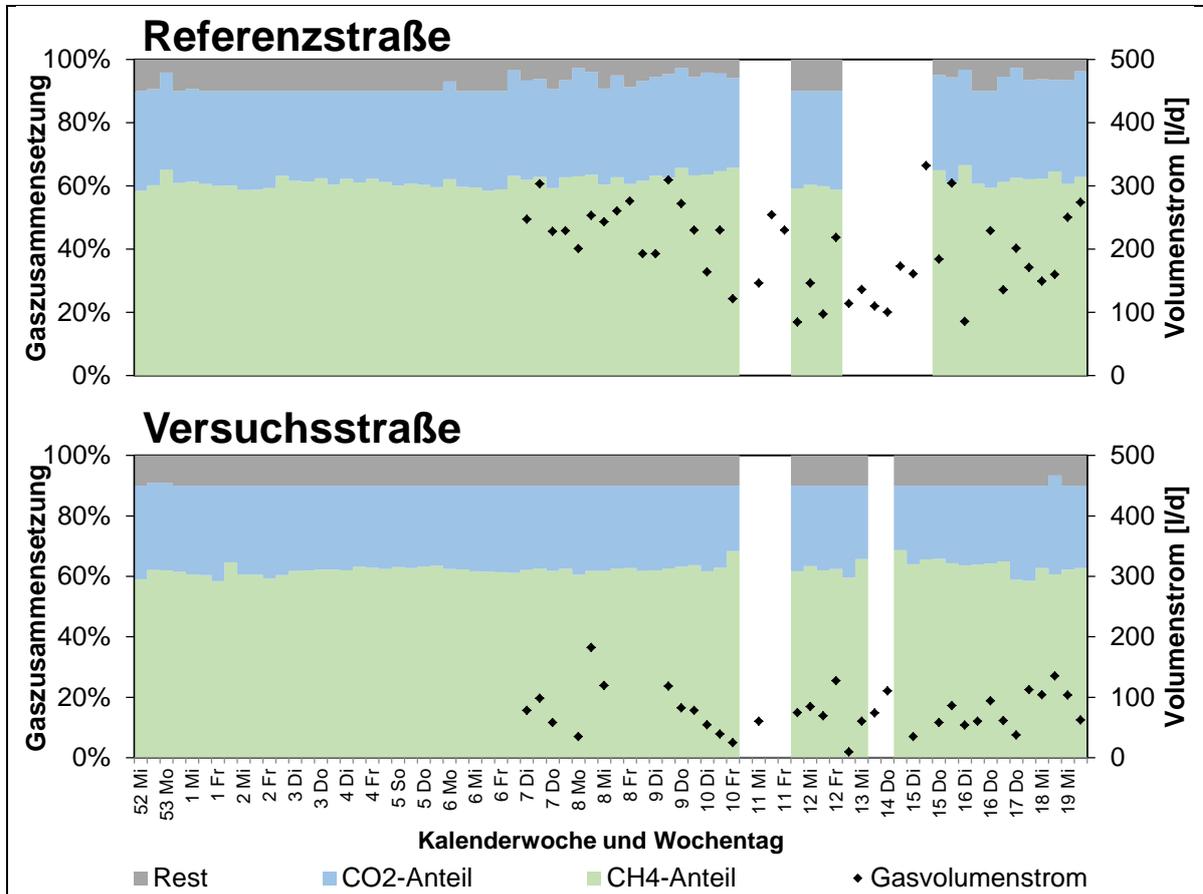


Bild 4.26: Gasvolumenstrom und -zusammensetzung für die Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 2

Das Verhältnis von CH_4 zu CO_2 blieb in beiden Straßen über die Versuchszeit gleichmäßig. Die mittlere tägliche Gasproduktion lag in der Referenzstraße bei 164 l/d und in der Versuchsstraße bei 72 l/d. Die täglichen und spezifischen Gasproduktionen der Faulbehälter sind Tabelle 4.11 zu entnehmen. Zudem sind Minimal-, Mittel und Maximalwerte für die gemessenen CH_4 und CO_2 -Anteile angegeben.

Tabelle 4.10: Tägliche und spezifische Gaserträge aus der Faulung der Überschuss-schlämme, sowie CH₄ und CO₂-Anteile im Faulgas in Versuchsreihe 2

Straße	Gasproduktion		Gasqualität		
	täglich	spezifisch		% -CH ₄	% -CO ₂
	l/d	l/kg oTR,zu			
Referenz	164	311	Min	58,7	28,4
			Mittel	62,3	31,4
			Max	66,5	34,7
Versuch	72	307	Min	58,5	21,3
			Mittel	62,9	27,2
			Max	68,7	32,8

Die spezifischen Gasproduktionen der Referenzstraße und der Versuchsstraße waren faktisch gleich bei 305 – 310 l/kg oTR,zu.

Tabelle 4.11 zeigt die mittleren TR und GV der einzelnen Massenströme in der Referenz- und Versuchsstraße.

Tabelle 4.11: Mittelwerte zu TR und GV, sowie der zugehörigen Massenströme in beiden Straßen in Versuchsreihe 2

Straße	Ort	TR	GV	M _{oTR}	M _{TR}
		g/l	%	g/d	g/d
Referenz	MBR	13,5	72,2	1.568	2.165
	Input FB	20,2	73,4	529	721
	Output FB	15,0	62,5	336	534
Versuch	MBR	4,9	65,7	899	1.354
	Input FB	9,3	69,7	236	332
	Output FB	6,7	61,3	147	239
	PS	14,2	80,1	755	1.103

Ähnlich wie in Versuchsreihe 1 lag der M_{oTR} im Input des FB in der Referenzstraße im Mittel um 124 % oberhalb dem der Versuchsstraße, was durch die bessere Eindickbarkeit des ÜSS aus der Referenzstraße aufgrund des nicht erfolgten PS-Abzuges zu erklären ist. In der Versuchsstraße konnte der TR von im Mittel 4,9 g/l in der Belebung auf 9,3 g/l im Input der Faulung gesteigert werden. In der Referenzstraße wurde ein mittlerer TR im Input der Faulung von 20,3 g/l erreicht. Die Raumbelastung der Faulbehälter berechnete sich zu 0,696 kg oTR/(m³·d) für die Referenzstraße und 0,321 kg oTR/(m³·d) für die Versuchsstraße (siehe Bild 4.27).

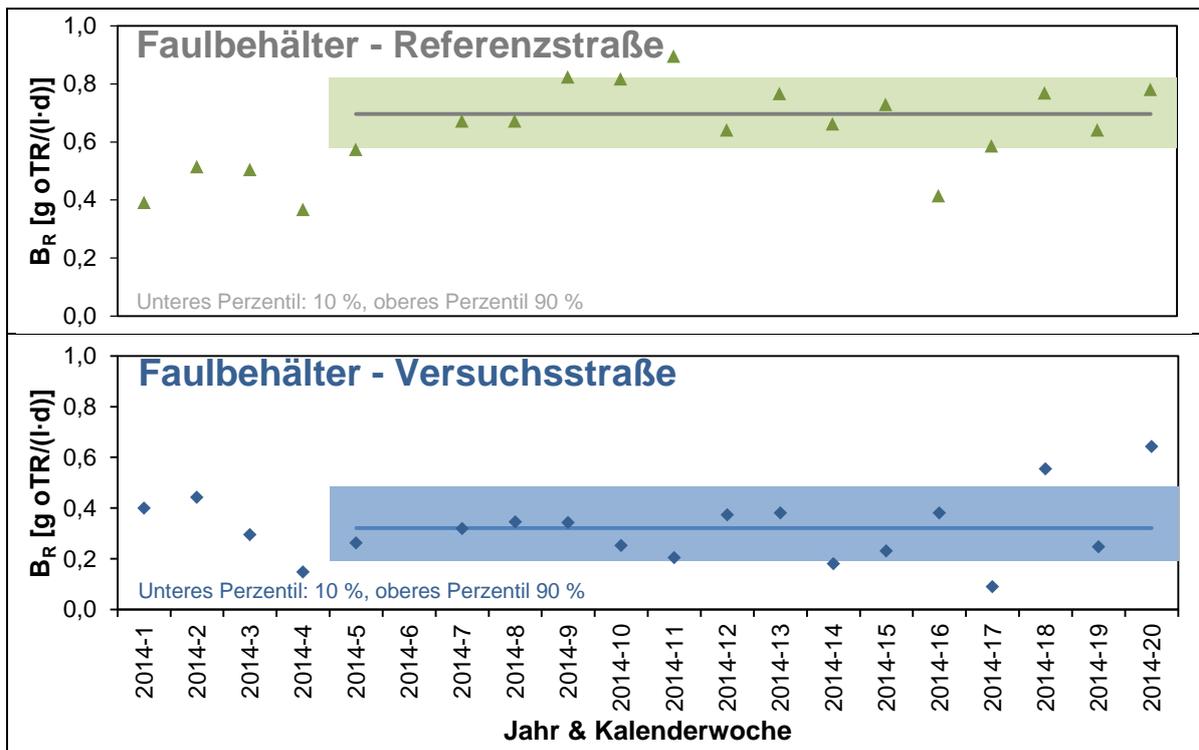


Bild 4.27: Raumbelastung (B_R) in beiden Faulbehältern in Versuchsreihe 2

Im Faulbehälter der Versuchsstraße war wie in Versuchsreihe 1 eine geringe Schwankung in der Raumbelastung festzustellen. Die Raumbelastung im Faulbehälter der Referenzstraße konnte in Versuchsreihe 2 im Vergleich zu Versuchsreihe 1 auch mit geringerer Schwankungsbreite gefahren werden.

Der rechnerische Abbau an organischer Trockensubstanz nach 21 d Faulzeit betrug 36 - 37 % in der Referenzstraße und 37 - 38 % in der Versuchsstraße. Die in Versuchsreihe 1 festgestellte weitgehende Stabilisierung der Organik in der Belebung ist somit in Versuchsreihe 2 nach Absenkung des Schlammalters erwartungsgemäß nicht mehr festzustellen. Beide Überschussschlämme weisen einen ähnlichen Abbaugrad in der Faulung auf. Die Ergebnisse liegen in den von ROEDIGER ET AL. (1990) und KAPP ET AL. (1994) angegebenen Bereichen der Abbaugrade von Überschussschlamm.

4.4.4 Entwässerungs- und Absetzeigenschaften im MBR, sowie vor und nach anaerober Stabilisierung

Die ISV im Belebungsbecken und im Input und Output der Faulbehälter für die Referenz- und die Versuchsstraße sind in Bild 4.28 dargestellt. Für die Referenzstraße lag dabei im gesamten Versuchszeitraum eine gute Absetzbarkeit vor. In der Versuchsstraße lag größtenteils eine gute Absetzbarkeit vor. Es war kein durchgängiger Trend zur Verbesserung oder Verschlechterung der Absetzbarkeit nach anaerober Behandlung der Schlämme erkennbar.

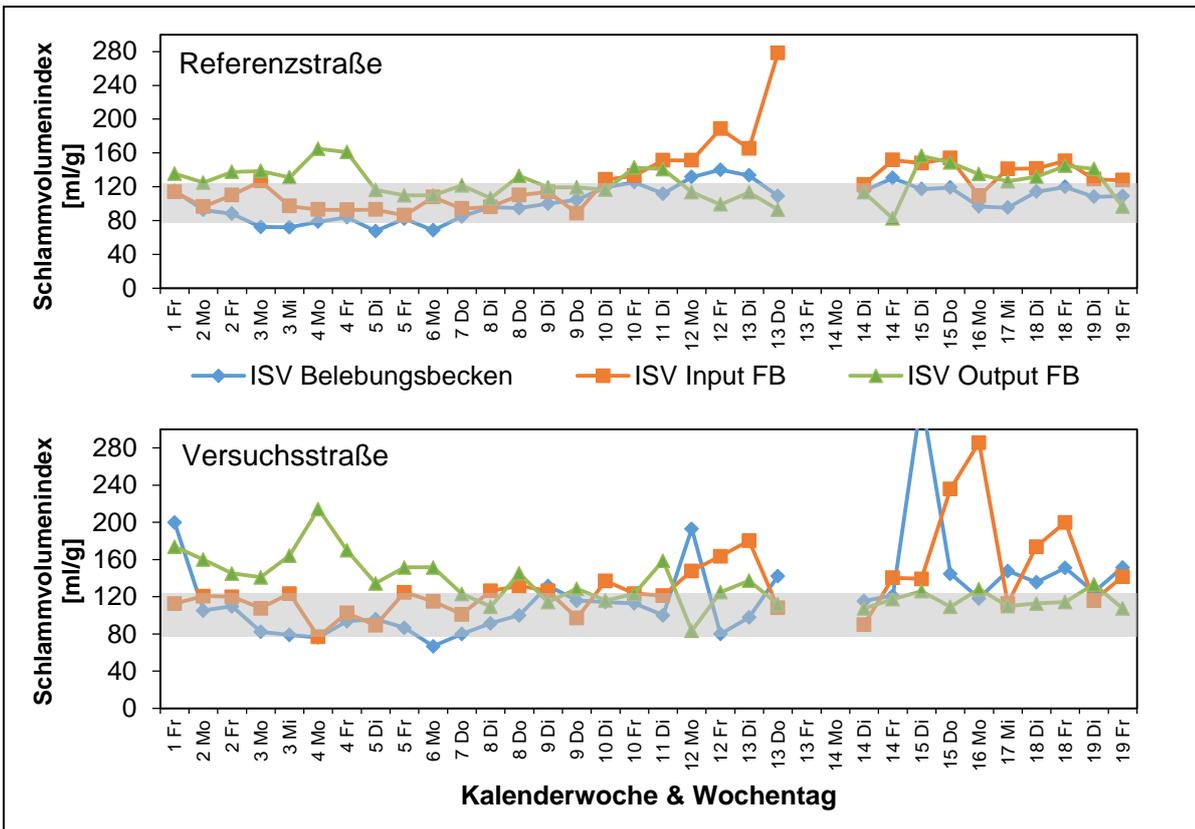


Bild 4.28: Schlammvolumenindex (ISV) in der Belegung und Veränderung durch Eindickung (Input FB) und Faulung (Output FB) für die Referenz- und die Versuchsstraße in Versuchsreihe 2

Die Entwässerbarkeit ausgedrückt als CST/TR war für den Überschussschlamm aus der Referenzstraße besser als in der Versuchsstraße, wie Bild 4.29 zeigt.

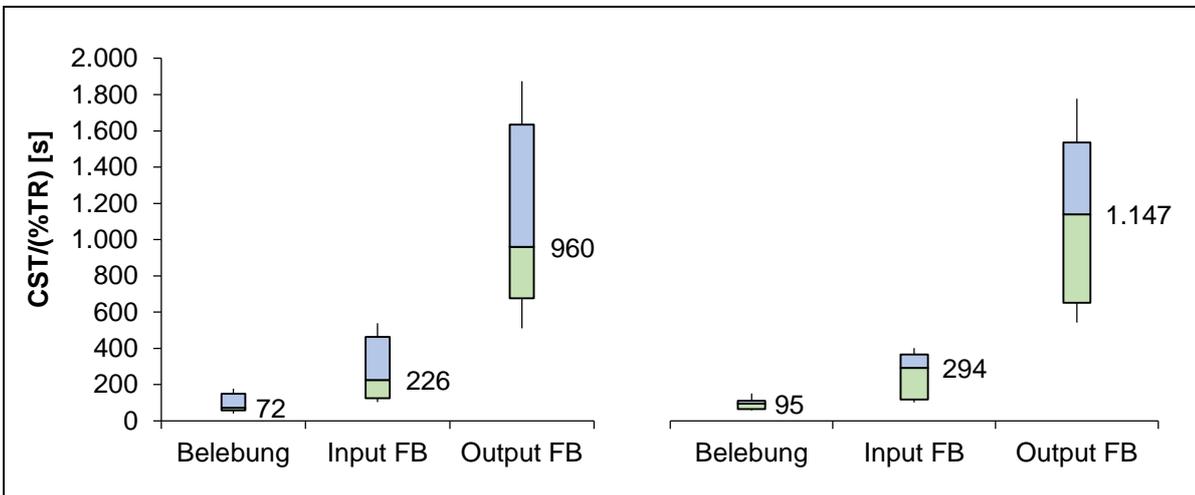


Bild 4.29: Auf den TR normierte Kapillare Fließzeit (CST/TR) der Schlämme für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 2

Durch die Voreindickung stieg der CST/TR wie erwartet an. Im Gegensatz zu der in Versuchsreihe 1 beobachteten besseren Entwässerbarkeit im Output des Faulbehälters der Versuchsstraße im Vergleich zur Referenzstraße konnte in Versuchsreihe 2 hier ein schlechterer CST/TR in der Versuchsstraße festgestellt werden. Die Ergebnisse der Entwässerungsversuche lagen nach DICHTL UND KOPP (2001) für die Belebungsbecken

abermals im mittelmäßig entwässerbaren Bereich, während durch die anaerobe Behandlung des voreingedickten Schlammes eine Verschlechterung der Entwässerbarkeit stattfand.

4.5 Versuchsreihe 3

Für die Versuchsstraße wurde ein Schlammalter von $t_{TS} = 25$ d eingestellt. Der in der Versuchsstraße anfallende PS wurde verworfen. Es wurde PS aus der KA Neuss-Süd (vgl. Kapitel 4.2.3) mit voreingedicktem ÜSS aus der Versuchsstraße gemischt und der Faulung dieser Straße zugegeben.

4.5.1 Reinigungsleistung im MBR

Die Konzentrationen der organischen Summenparameter in den MBR-Zuläufen zum Belebungsbecken der Referenz- und der Versuchsstraße sind Bild 4.30 zu entnehmen. Die Unterschiede ergeben sich abermals durch die Vorklärung in der Versuchsstraße.

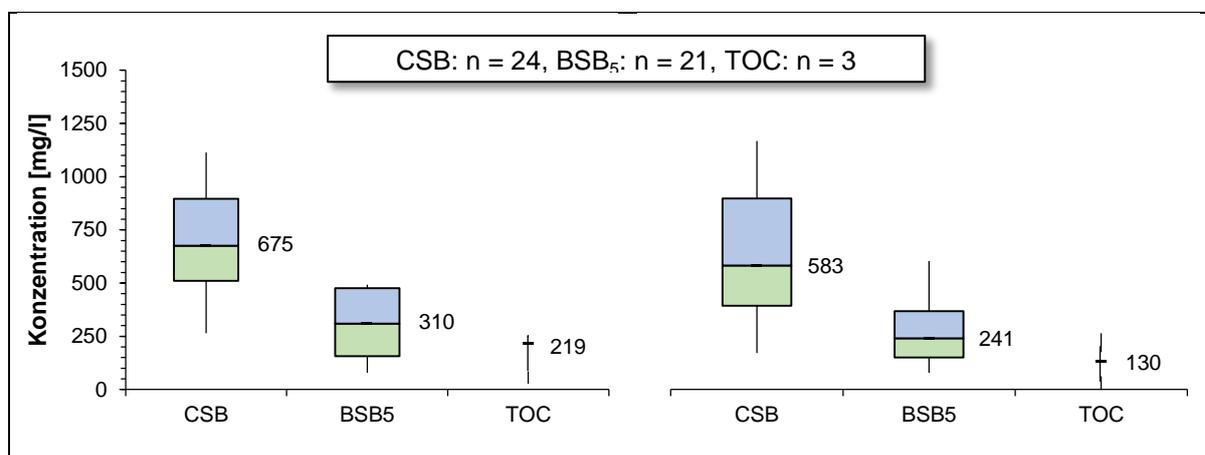


Bild 4.30: Konzentrationen organischer Summenparameter im Zulauf zum Belebungsbecken für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 3

Das CSB/BSB-Verhältnis des nicht vorgeklärten Abwassers lag bei 2,53. Im Zulauf des MBR der Versuchsstraße lagen ein ähnliches Verhältnis von 2,40 wie in Versuchsreihe 2 und damit eine ähnlich schlechte biologische Abbaubarkeit vor. Die auf den Median bezogenen Eliminationen an CSB, BSB₅ und TOC in der Vorklärung ergeben sich zu 13,6 %, 22,2 % und 40,6 %. Die deutliche Veränderung der Abscheidewirkung im Vorklärbecken hat ihre Begründung vermutlich in der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Veränderung des PS-Abzuges. Diese hatte, wie Kapitel 4.2.3 entnommen werden kann, ebenfalls Auswirkungen auf den Median des einwohnerspezifischen Primärschlamm-anfalls.

Bild 4.31 zeigt den Vergleich der Schlammbelastungen beider MBR-Straßen. Der Bemessungswert von 0,04 kg BSB₅/(kgTS·d) konnte sowohl für die Referenz- als auch für die Versuchsstraße im Median eingehalten werden.

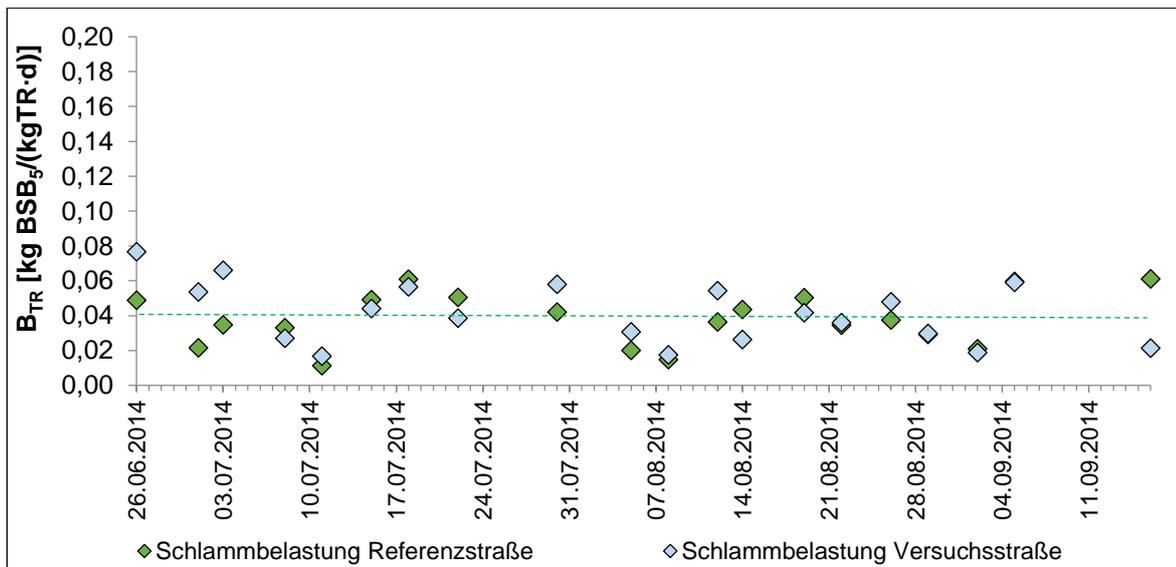


Bild 4.31: Schlammbelastung im MBR der Referenz- und der Versuchsstraße sowie Auslegungswert (---) der Referenzstraße (siehe Kapitel 3.2.2) für Versuchsreihe 3

Die Eliminationen von CSB, BSB₅ und TOC beider Straßen bezogen auf deren Zulauf sowie die erreichten Ablaufkonzentrationen können Bild 4.32 entnommen werden.

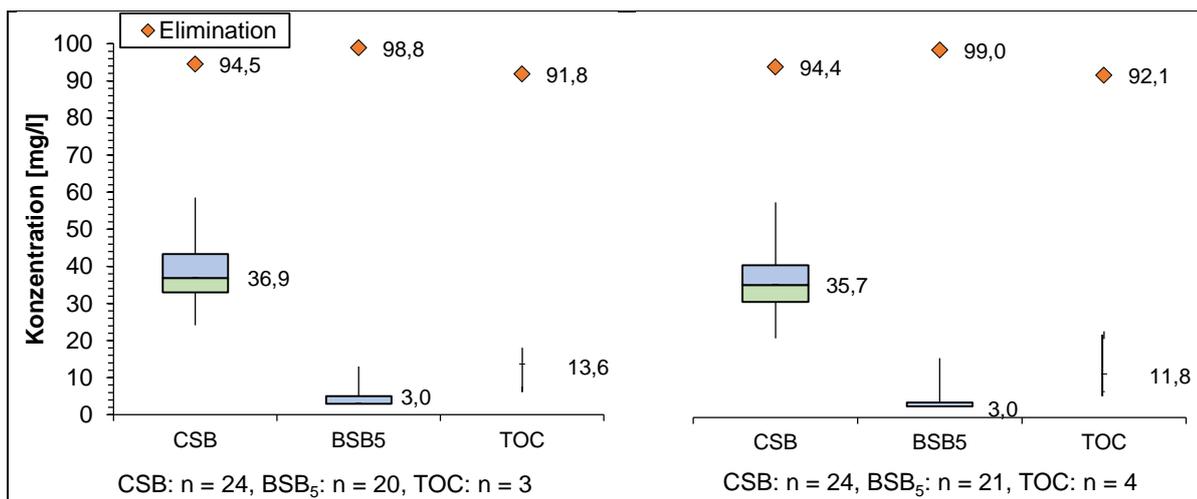


Bild 4.32: Ablaufkonzentrationen und Eliminationen von CSB, BSB₅ und TOC für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 3

Für beide Straßen war die Elimination der organischen Summenparameter wie in den vorangegangenen Versuchsreihen nahezu gleich. Der CSB wurde in der Versuchsstraße marginal besser eliminiert. Der BSB₅ wurde im Median bis unterhalb der Bestimmungsgrenze abgebaut.

In Bild 4.33 sind die Überschussschlammproduktion und die TR-Gehalte in beiden MBR als Wochenmittelwerte dargestellt.

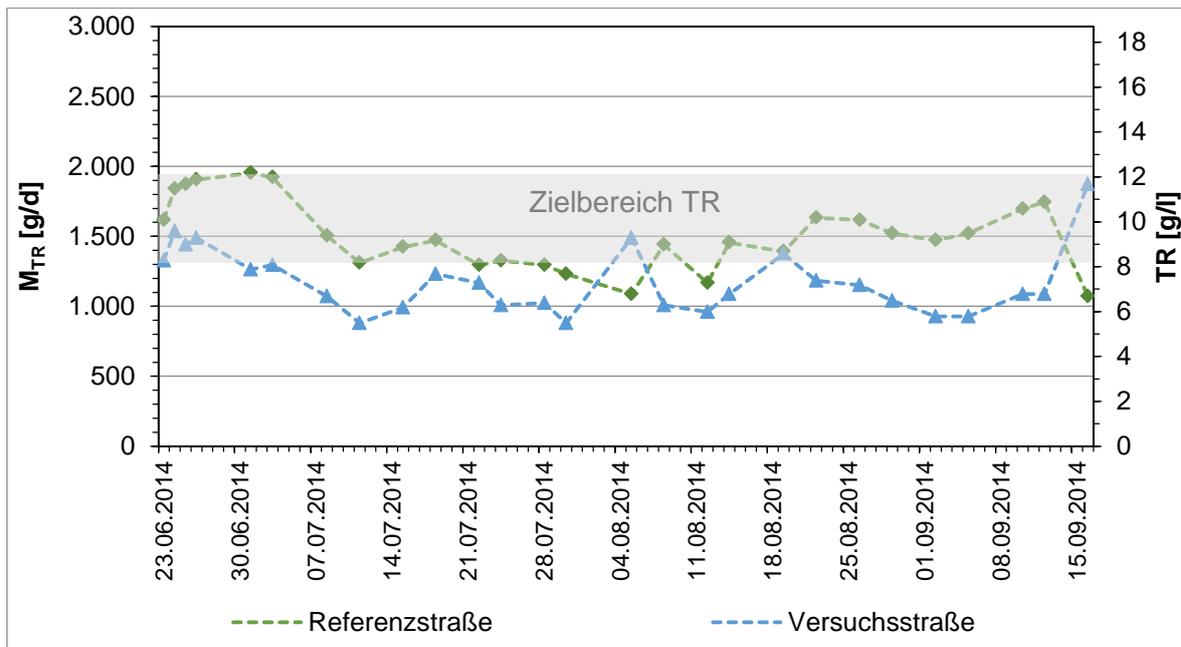


Bild 4.33: Entwicklung der Überschussschlammproduktion und des TR in der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 3

Der TR der Referenzstraße lag über die Laufzeit der Versuchsreihe im Zielbereich von 8 - 12 g/l mit einem Mittelwert von 9,5 g/l (siehe Tabelle 4.12). In der Versuchsstraße lag ein mittlerer TR von 7,2 g/l vor. Der TR lag über den Versuchszeitraum zumeist unterhalb des Zielbereiches von 8 - 12 g/l. Die Mediane und Mittelwerte für TR und GV beider MBR können Tabelle 4.12 entnommen werden.

Tabelle 4.12: TR und GV des belebten Schlammes im MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 3

	Referenzstraße		Versuchsstraße	
	TR	GV	TR	GV
	g/l	%	g/l	%
Median	9,3	69,3	6,8	70,0
Mittelwert	9,5	69,8	7,2	69,6

Bild 4.34 zeigt die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen im Ablauf der Referenz- und der Versuchsstraße.

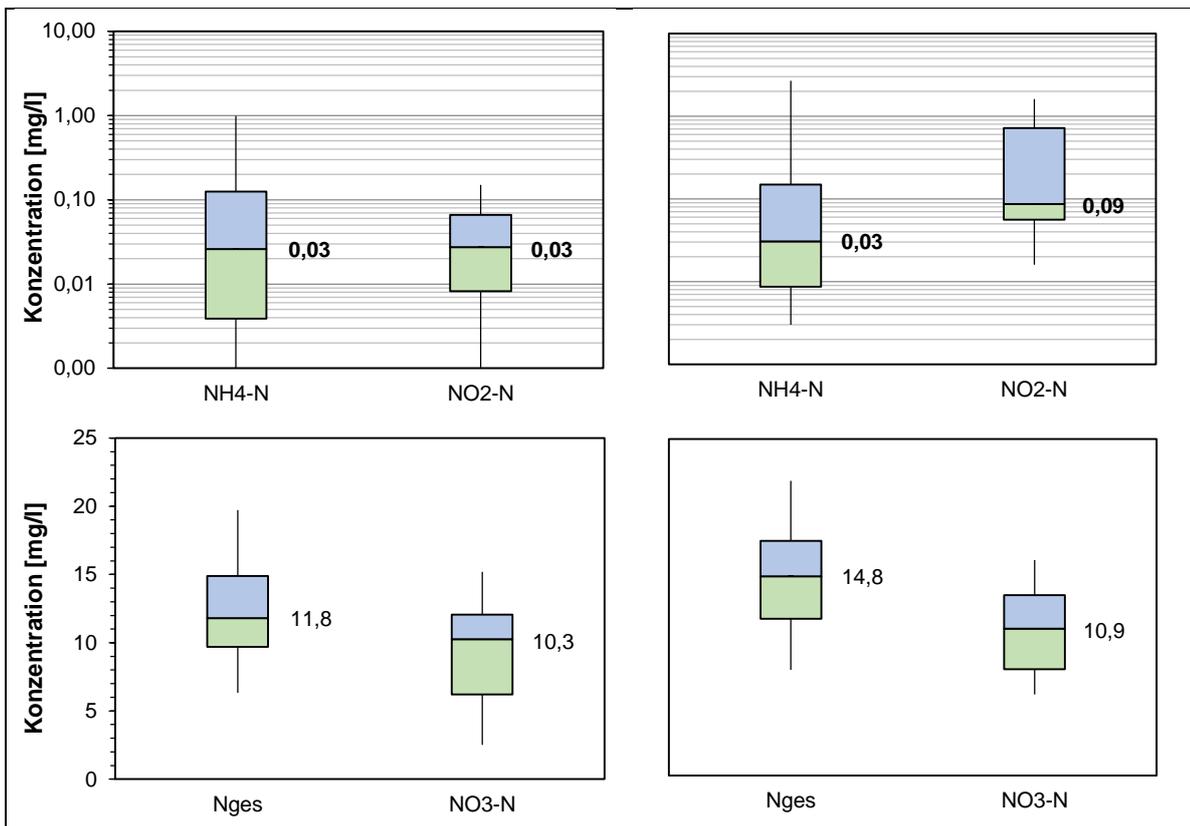


Bild 4.34: Konzentrationen von Ammoniumstickstoff, Nitritstickstoff, Gesamtstickstoff und Nitratstickstoff im Ablauf des MBR für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 3 (n = 21)

Im Unterschied zu den vorangegangenen Versuchsreihen konnte dieses Mal keine bessere Qualität des Ablaufs der Versuchsstraße bezogen auf das 85-Perzentil festgestellt werden. Dies ist vor allem beim Nitritstickstoff-Ablaufwert zu beobachten. Auch für Ammonium wurden vereinzelt hohe Konzentrationen im Ablauf gemessen. Der zeitliche Verlauf der Ammonium- und Nitrit-Ablaufwerte ist in Bild 4.35 dargestellt.

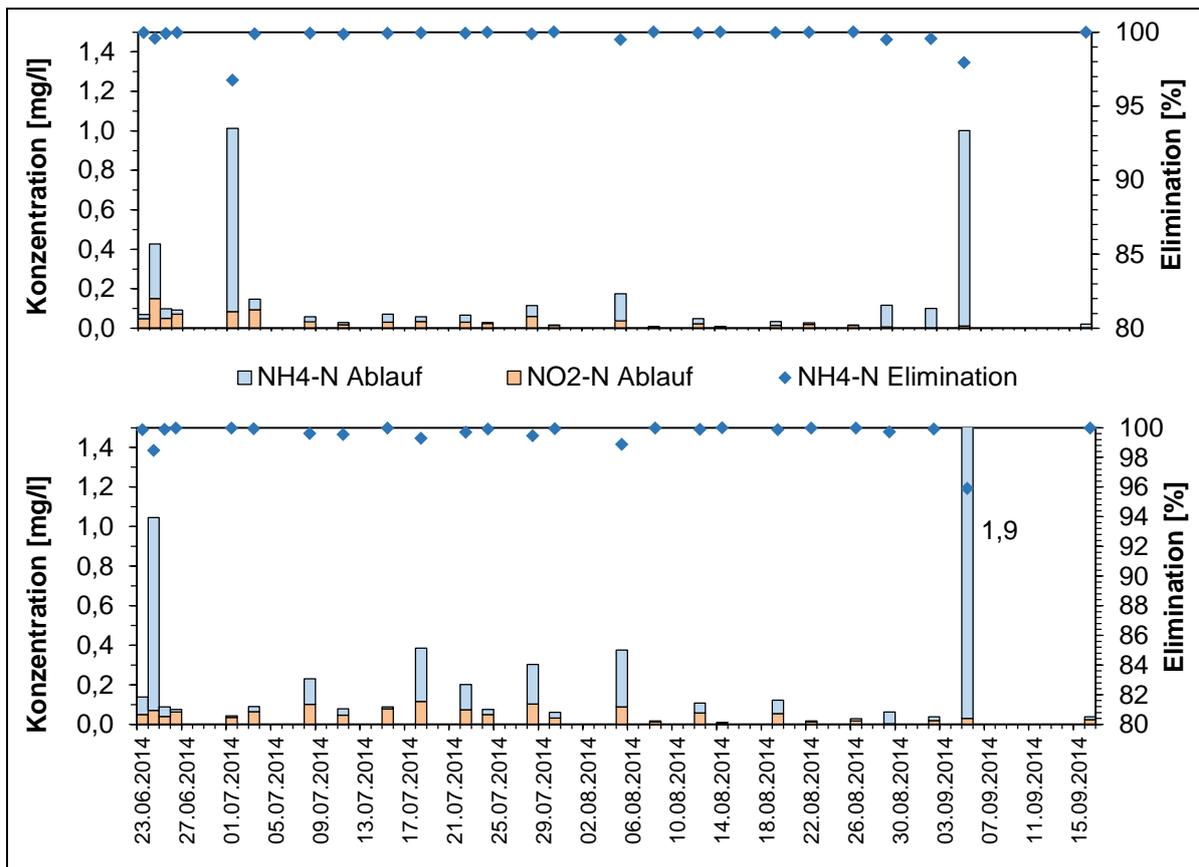


Bild 4.35: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffelimination im MBR der Referenz- (oben) und der Versuchsstraße (unten) für Versuchsreihe 3

In beiden Abläufen sind einzelne Nitrit-Spitzen festzustellen. Am 5.09.2014 war in beiden Straßen ein deutlich erhöhter Ammonium-Ablaufwert festzustellen. Dieser ist aufgrund der geringen Probenanzahl auch hauptverantwortlich für die Höhe des 85-Perzentils im Ablauf der Versuchsstraße.

4.5.2 Filtrationsleistung im MBR

4.5.2.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit

In Bild 4.36 sind der Bruttovolumenstrom, der TMP der Membranen, die dazugehörigen TR-Gehalte in den Belebungsbecken beider Straßen und die Temperatur im Zulauf der Kläranlage Neuss-Süd dargestellt.

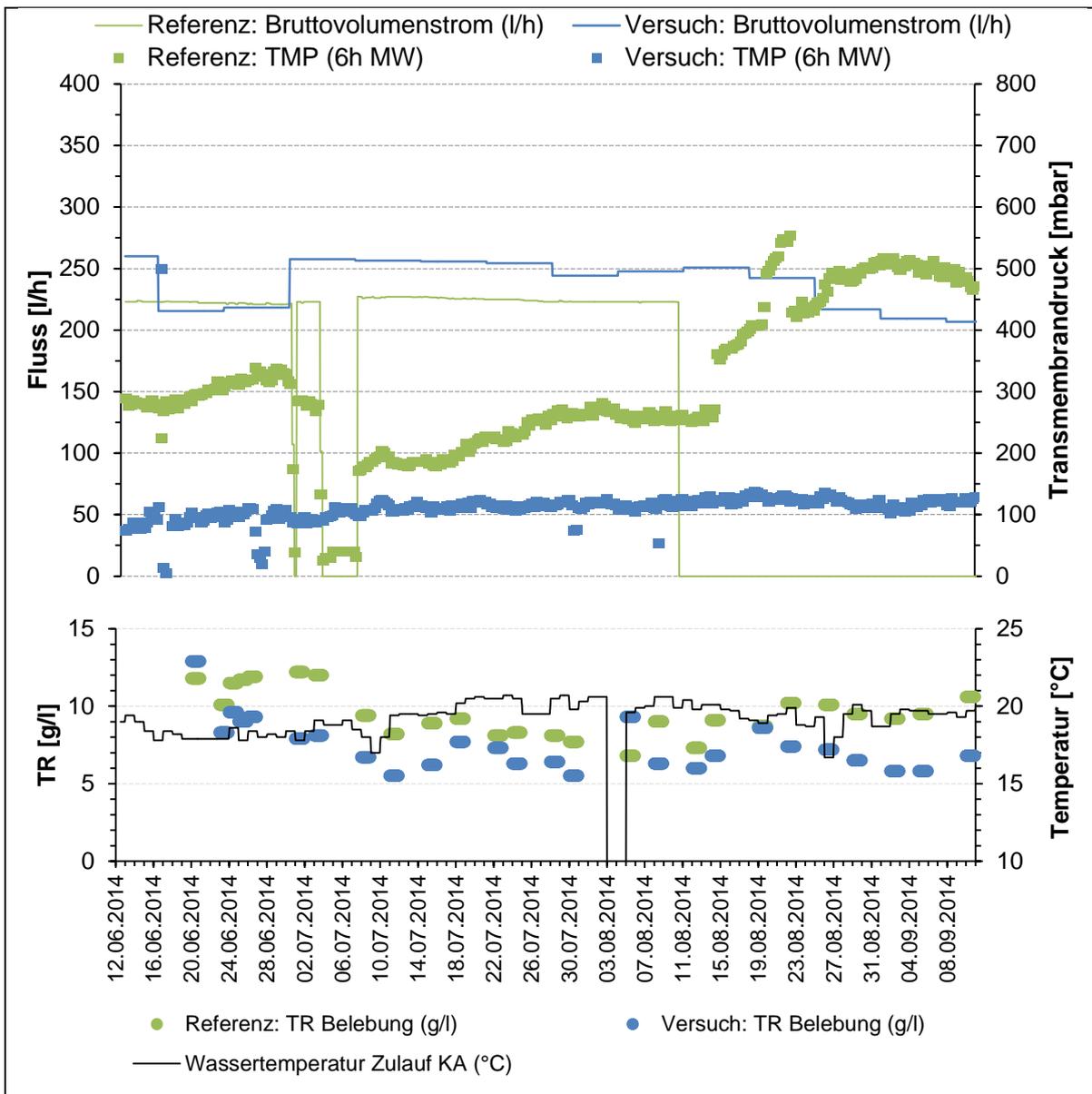


Bild 4.36: Fluss, Transmembranndruck und TR von Versuchs- und Referenzstraße in Versuchsreihe 3

Nach dem Wiederanfahren des Versuchsbetriebs mit Schlamm aus der Referenzstraße konnte für die Versuchsstraße für ein Schlammalter von 25 Tagen ein TMP von 80 - 120 mbar durchgängig eingehalten werden. Der Nettofluss lag bei den angestrebten 200 l/h (Tabelle 4.13). Es wurde keine Zwischenreinigung benötigt. Für die Referenzstraße wurden deutlichere Schwankungen im TMP festgestellt. Ab dem 10.08. kam es zu einem Ausfall in der Volumenstrommessung für die Referenzstraße. Die Einhaltung des Nettoflusses konnte anhand des installierten Wasserzählers nachgewiesen werden (Tabelle 4.13).

Tabelle 4.13: Nettovolumenströme des Permeatabzuges im MBR der Referenz- und Versuchsstraße für Versuchsreihe 3

Perzentil		Versuchsreihe 3	
		Referenzstraße	Versuchsstraße
		Ablauf	Ablauf
Min	l/h	185,8	178,1
15 %	l/h	197,6	186,0
Median	l/h	207,8	197,7
85 %	l/h	219,8	205,5
Max	l/h	232,6	244,6
Mittelwert	l/h	205,4	198,0
Anzahl Tage		14	16

4.5.2.2 Filtrationseigenschaften des belebten Schlammes

Im Laufe der Versuchsreihe 3 konnten für die SFI Werte des belebten Schlammes die in Bild 4.37 dargestellten Spannweiten ermittelt werden.

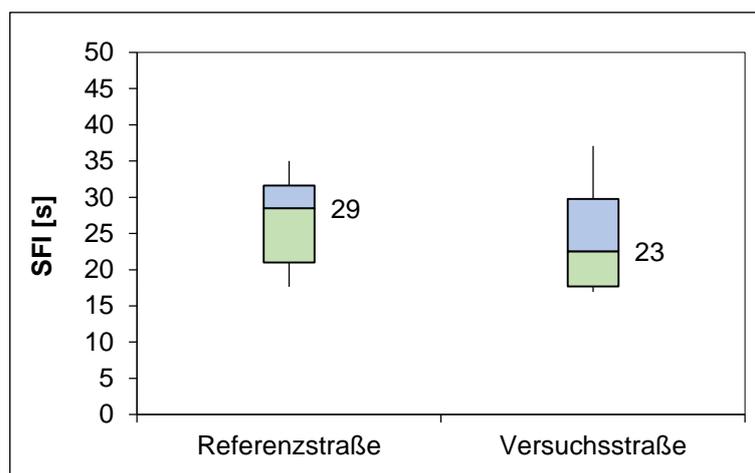


Bild 4.37: Auf den %TR bezogener Schlammfiltrationsindex (SFI) des belebten Schlammes der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 3

Der auf den %TR bezogene SFI des belebten Schlammes der Referenzstraße wies einen Median von 29 s auf. Alle Werte lagen dabei im Bereich von 18 bis 35 s. In der Versuchsstraße wurde ein Median von 23 s ermittelt, mit einem Messwertbereich von 17 bis 37 s.

Im Vergleich liegen die Werte beider Schlämme in einem ähnlichen Bereich, wobei die Versuchsstraße leicht bessere Ergebnisse erzielt. Die ähnlichen Werte für die Filtrierbarkeit in beiden Straßen sind wahrscheinlich zunächst auf das Wiederanfahren mit gleichem Schlamm aus der Referenzstraße begründbar. Eine Erklärung, warum die Werte der Referenzstraße sich im Vergleich zu den Versuchsreihen 1 und 2 deutlich verringert haben, konnte nicht gefunden werden. Die gute Filtrierbarkeit des belebten Schlammes aus der Versuchsstraße konnte auch anhand des TMP nachgewiesen werden (siehe Bild

4.36). In der Referenzstraße lag der TMP hingegen deutlich höher. Eine direkte zeitliche Abhängigkeit des TMP zum SFI konnte in Versuchsreihe 3 abermals nicht nachgewiesen werden (Bild 4.38).

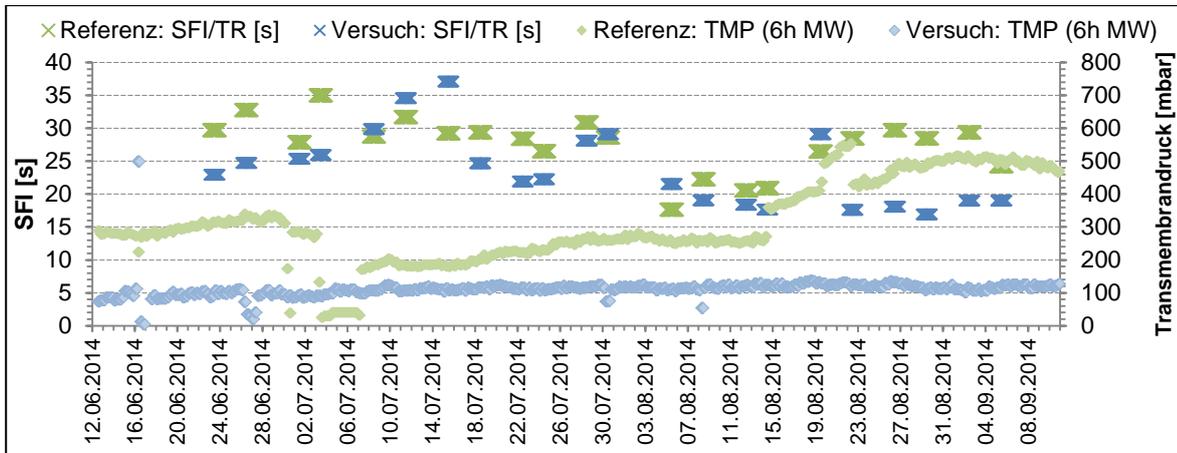


Bild 4.38: Zeitlicher Verlauf des TMP und SFI im MBR der Referenz- und Versuchsstraße für Versuchsreihe 3

Insgesamt wurden in beiden MBR-Straßen keine SFI-Spitzen wie in Versuchsreihe 1 und 2 gemessen.

4.5.3 Gasertrag und Methangehalt in der Faulung

Die Ergebnisse der Gasqualitätsmessung und der –volumenstrommessung für Versuchsreihe 3 sind in Bild 4.39 dargestellt.

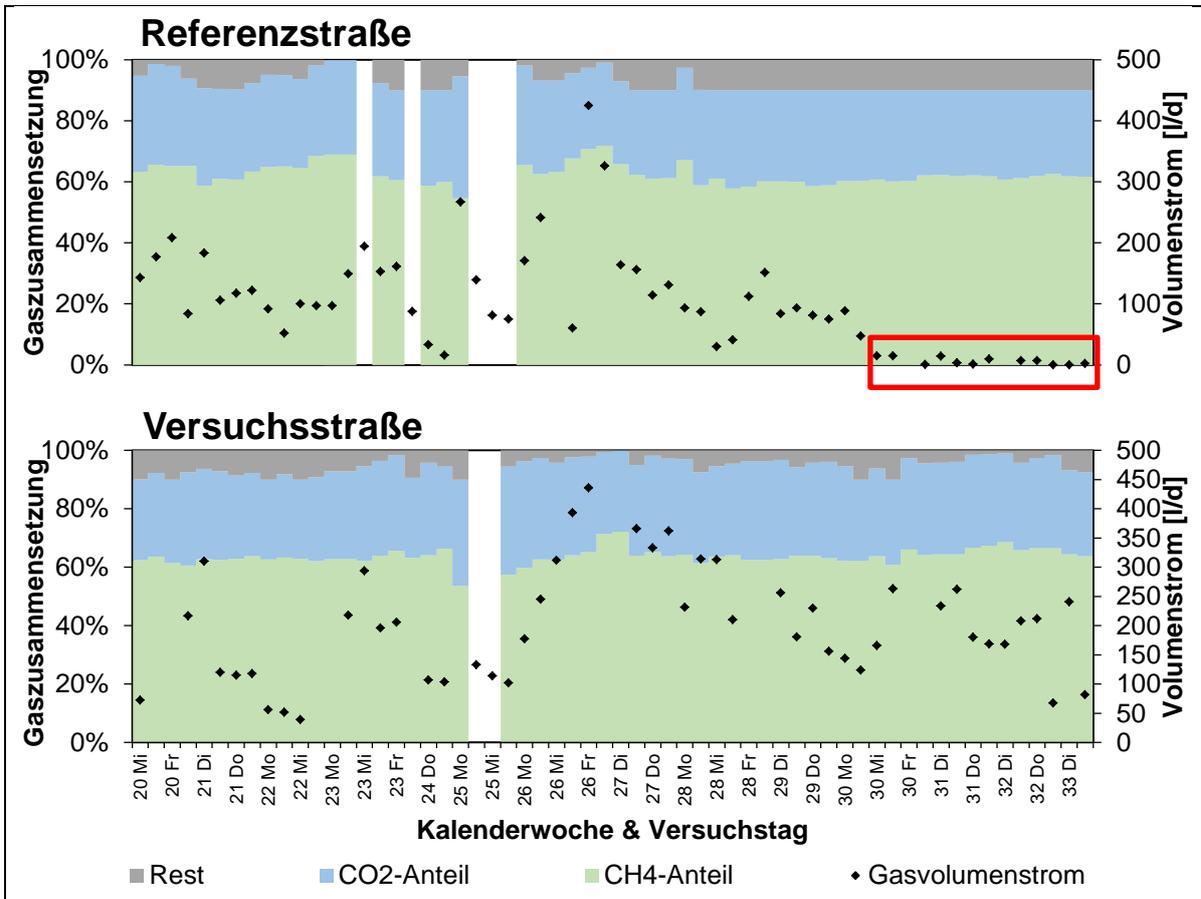


Bild 4.39: Gasvolumenstrom und -zusammensetzung für die Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 3

Bis auf einzelne Ausfälle konnte die Gasqualitätsmessung täglich durchgeführt werden. Das Verhältnis von CH₄ zu CO₂ blieb in beiden Straßen über die Versuchszeit gleichmäßig. Der Restgas-Anteil lag in der Versuchsstraße durchgängig unterhalb von 10 %. Für die Referenzstraße wurde zu Anfang ein niedrigerer Restgas-Anteil errechnet. Die Steigerung des täglichen Gasvolumenstroms der Referenzstraße durch Mitfaulung des PS kann deutlich abgelesen werden. Die mittlere tägliche Gasproduktion lag in der Referenzstraße bei 147 l/d und in der Versuchsstraße bei 217 l/d. Bei der Berechnung der täglichen Gasproduktion in der Referenzstraße wurde der rot umrahmte Bereich in Bild 4.39 nicht berücksichtigt, weil dort ein Defekt am Trommelgaszähler vorlag.

Die täglichen und spezifischen Gasproduktionen der Faulbehälter sind Tabelle 4.14 zu entnehmen. Zudem sind Minimal-, Mittel und Maximal-Werte für die gemessenen CH₄ und CO₂-Anteile angegeben.

Tabelle 4.14: Tägliche und spezifische Gaserträge aus der Faulung sowie CH₄ und CO₂-Anteile im Faulgas in Versuchsreihe 3

Straße	Gasproduktion		Gasqualität		
	täglich	spezifisch		% -CH ₄	% -CO ₂
	l/d	l/kg oTR,zu			
Referenz	147	295	Min	57,8	25,4
			Mittel	62,1	28,8
			Max	71,8	32,6
Versuch	217	394	Min	59,0	27,5
			Mittel	64,0	31,3
			Max	72,1	36,5

Wie in den vorangegangenen Versuchsreihe 1 und 2 konnten für die Referenzstraße ca. 300 l Gas/kg oTR,zu gemessen werden. In der Versuchsstraße wurden 394 l Gas/kg oTR,zu produziert. Die CH₄-Konzentrationen liegen in einem ähnlichen Bereich, wobei im Faulbehälter der Versuchsstraße im Mittel eine leicht höhere CH₄-Konzentration vorlag. Das Massenverhältnis im Input der Faulung der Versuchsstraße wurde zu 39 % PS und 61 % ÜSS im Mischschlamm bestimmt (vergleiche Kapitel 3.1.3 und 4.2.4). Der Anteil organischer Trockenmasse betrug ebenfalls 39 % für PS und 61 % für ÜSS. Daraus ergibt sich unter Zugrundelegung eines spezifischen Gasertrags des ÜSS von 264 l /kg oTR,zu ein Anteil des PS von 599,6 l/kg oTR,zu an den gemessenen 394 l/kg oTR,zu des Mischschlammes.

Die mittleren TR und GV der einzelnen Massenströme in der Referenz- und Versuchsstraße können Tabelle 4.15 entnommen werden.

Tabelle 4.15: Mittelwerte zu TR und GV, sowie der zugehörigen Massenströme in beiden Straßen in Versuchsreihe 3

Straße	Ort	TR	GV	M _{oTR}	M _{TR}
		g/l	%	g/d	g/d
Referenz	MBR	9,5	69,8	1.066	1.527
	Input FB	16,6	71,1	500	594
	Output FB	14,3	65,1	336	512
Versuch	MBR	7,2	69,6	802	1.151
	Input FB	20,5	74,4	550	733
	Output FB	12,5	65,6	293	446
	PS	13,7	75,4	762	918

Aufgrund der verbesserten Schlammindickung und der Mitfaulung von PS in der Versuchsstraße lag der M_{oTR} im Input des FB in Versuchsreihe 3 um ca. 10 % höher als in der Referenzstraße. Die Raumbelastung der Faulbehälter ist in Bild 4.42 dargestellt. Die

dargestellten grünen und blauen Flächen in den Diagrammen zeigen den Wertebereich vom 10 %-Perzentil bis zum 90 %-Perzentil an.

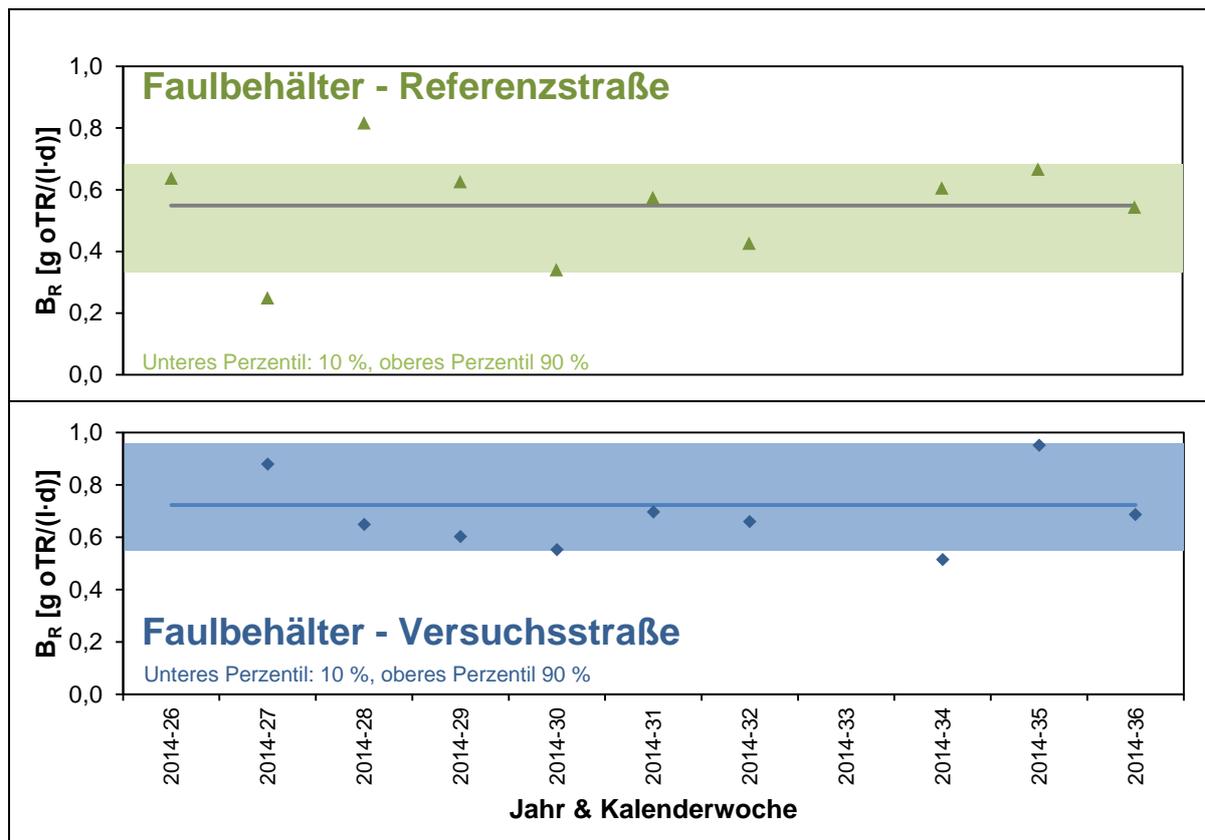


Bild 4.40: Raumbelastung in beiden Faulbehältern in Versuchsreihe 3

Aufgrund der verbesserten Schlammeindickung und der Mitfaulung von PS lag die Raumbelastung des Faulbehälters der Versuchsstraße mit im Mittel 0,707 kg oTR/(m³·d) in Versuchsreihe 3 oberhalb der Raumbelastung des Faulbehälters der Referenzstraße von 0,564 kg oTR/(m³·d).

Der rechnerische Abbau an organischer Trockensubstanz nach 21 Tage Faulzeit betrug 32 – 33 % in der Referenzstraße und 46 – 47 % in der Versuchsstraße. Durch die Mitfaulung des leicht abbaubaren PS konnte für die Mischung eine deutliche Erhöhung des Abbaugrades in der Faulung der Versuchsstraße erreicht werden. ROEDIGER ET AL. (1990) geben für 21 Tage Faulzeit ein Abbaugrad von 44 – 45 % für Mischschlamm an.

4.5.4 Entwässerungs- und Absetzeigenschaften im MBR, sowie vor und nach anaerober Stabilisierung

Die ISV im Belebungsbecken und im Input und Output der Faulbehälter für die Referenzstraße (nur ÜSS) und die Versuchsstraße (ÜSS + PS) sind in Bild 4.59 dargestellt. Für die Referenzstraße konnte nur eine geringfügige Veränderung der Absetzbarkeit des Überschussschlammes nach der Eindickung festgestellt werden.

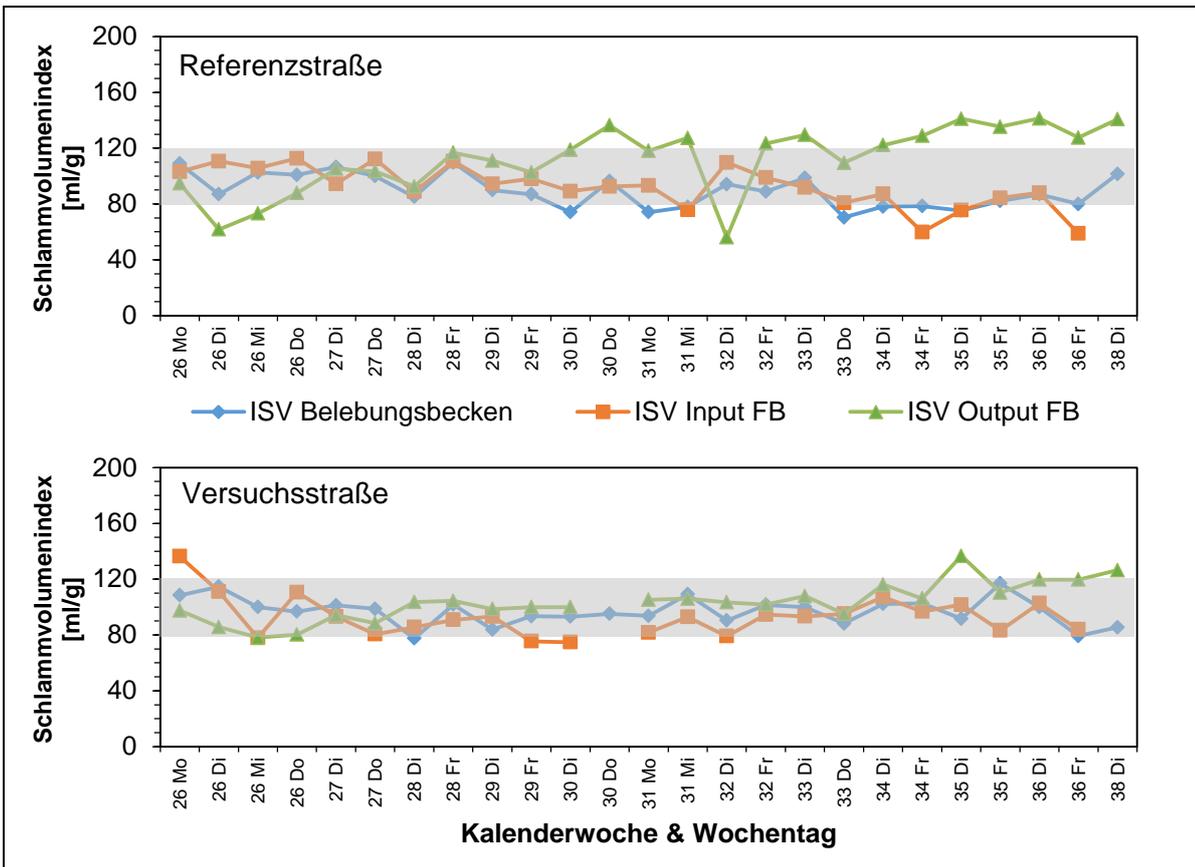


Bild 4.41: Schlammvolumenindex (ISV) in der Belegung und Veränderung durch Eindickung des ÜSS und Einmischen des PS für die Versuchsstraße (Input FB) und Faulung (Output FB) für die Referenz- und die Versuchsstraße in Versuchsreihe 3

In der Versuchsstraße war durch die Mischung des voreingedickten ÜSS mit PS eine leichte Verbesserung der Absetzbarkeit im Input des FB im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchsreihen festzustellen. Durch die anaerobe Stabilisierung kommt es zu einer Verschlechterung des ISV im Output beider Faulbehälter.

Die Entwässerbarkeit der Schlammmassenströme ist als CST/TR in Bild 4.42 dargestellt.

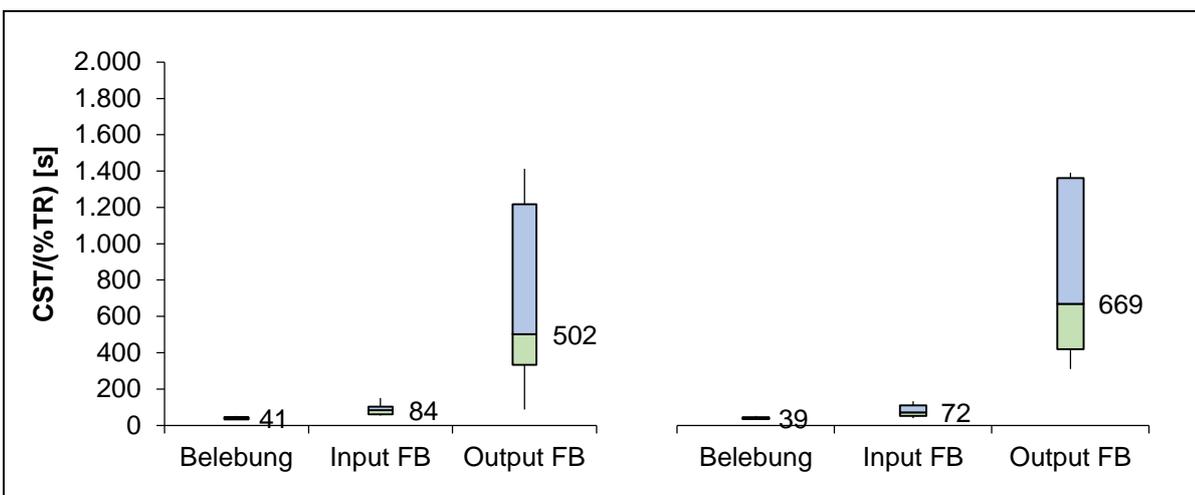


Bild 4.42: Auf den TR normierte Kapillare Fließzeit (CST/TR) der Schlämme für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 3

In den Belebungsbecken beider Straßen lag der CST/TR im gleichen Bereich. Mit der Eindickung (Referenzstraße), bzw. Eindickung und Vermischung mit PS (Versuchsstraße) und den damit abnehmenden Wassergehalt war, wie zu erwarten, eine leichte Verschlechterung der Entwässerbarkeit verbunden. Die anaerobe Stabilisierung hatte, wie in Versuchsreihe 1 und 2, einen negativen Einfluss auf die Entwässerbarkeit.

4.6 Versuchsreihe 4

Für die Versuchsstraße wurde ein Schlammalter von $t_{TS} = 15$ d eingestellt. Der in der Versuchsstraße anfallende PS wurde verworfen. Es wurde PS aus der KA Neuss-Süd (vgl. Kapitel 4.2.3) mit voreingedicktem ÜSS aus der Versuchsstraße gemischt und der Faulung dieser Straße zugegeben.

4.6.1 Reinigungsleistung im MBR

In Bild 4.43 sind die Konzentrationen an organischen Summenparametern in den Zuläufen der Referenz- (links) und in der Versuchsstraße (rechts) dargestellt. In der Versuchsstraße liegen diese wie in den vorherigen Versuchsreihen aufgrund der vorgeschalteten Vorklärung niedriger als in der Referenzstraße.

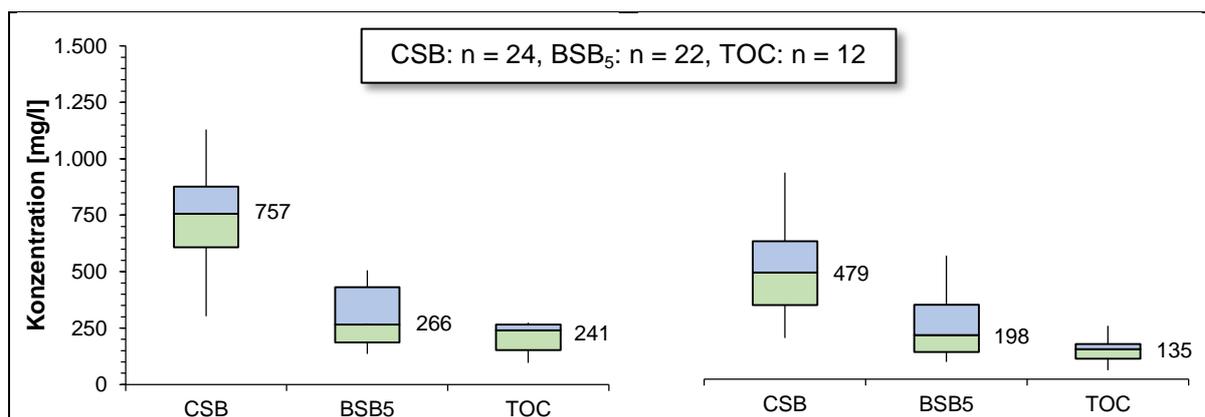


Bild 4.43: Konzentrationen organischer Summenparameter im Zulauf zum Belebungsbecken für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 4

Das CSB/BSB₅-Verhältnis des nicht vorgeklärten Abwassers lag mit 2,95 deutlich oberhalb der vorangegangenen Versuchsreihen und im stark industriell geprägten Bereich. Im Zulauf des MBR der Versuchsstraße lag mit einem Verhältnis von 2,40 eine bessere biologische Abbaubarkeit im Bereich der vorangegangenen drei Versuchsreihen vor. Die auf den Median bezogenen Eliminationen an CSB, BSB₅ und TOC in der Vorklärung ergeben sich zu 36,7 %, 25,6 % und 43,9 %.

Bild 4.44 zeigt den Vergleich der Schlammbelastungen beider MBR-Straßen.

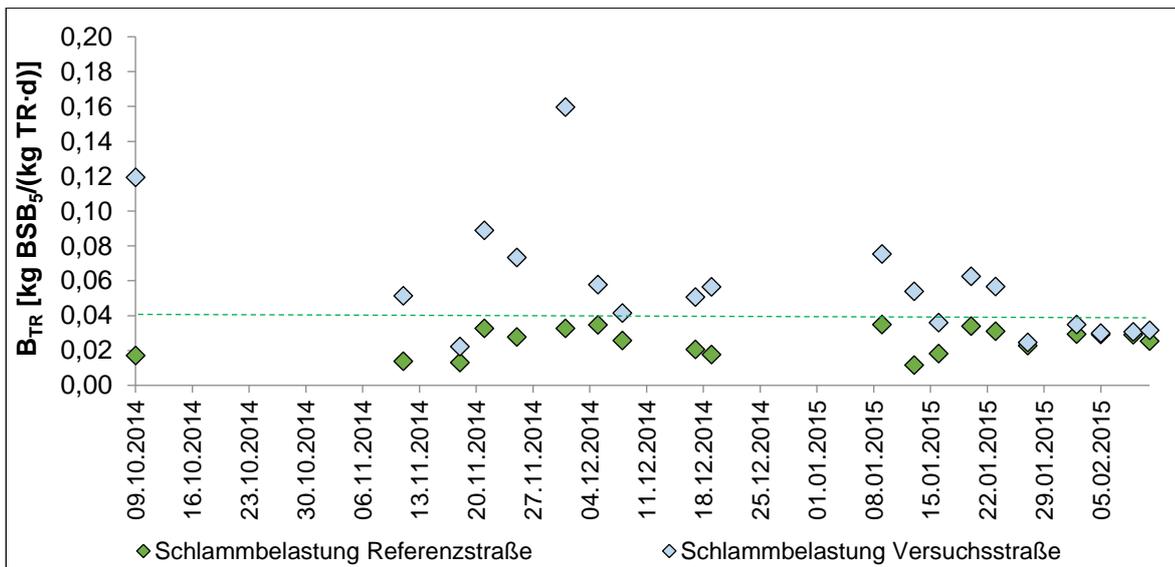


Bild 4.44: Schlammbelastung im MBR der Referenz- und der Versuchsstraße sowie Auslegungswert (---) der Referenzstraße (siehe Kapitel 3.2.2) für Versuchsreihe 4

Im MBR der Referenzstraße lag die mittlere Schlammbelastung bei 0,03 kg BSB₅/(kg TR·d) und für die Versuchsstraße bei 0,05 kg BSB₅/(kg TR·d). Zum Ende der Versuchslaufzeit hin (ab Februar 2015) nahm die Schlammbelastung in der Versuchsstraße ab. Dies ist neben einem deutlichen TR-Anstieg im Belebungsbecken auch auf eine Abnahme der BSB₅-Fracht im Zulauf zurückzuführen (vgl. Bild 4.46).

In Bild 4.45 sind die Eliminationen von CSB, BSB₅ und TOC in beiden Straßen bezogen auf deren Zulauf (in der Versuchsstraße einschließlich Vorklärung) sowie die Ablaufkonzentrationen dargestellt.

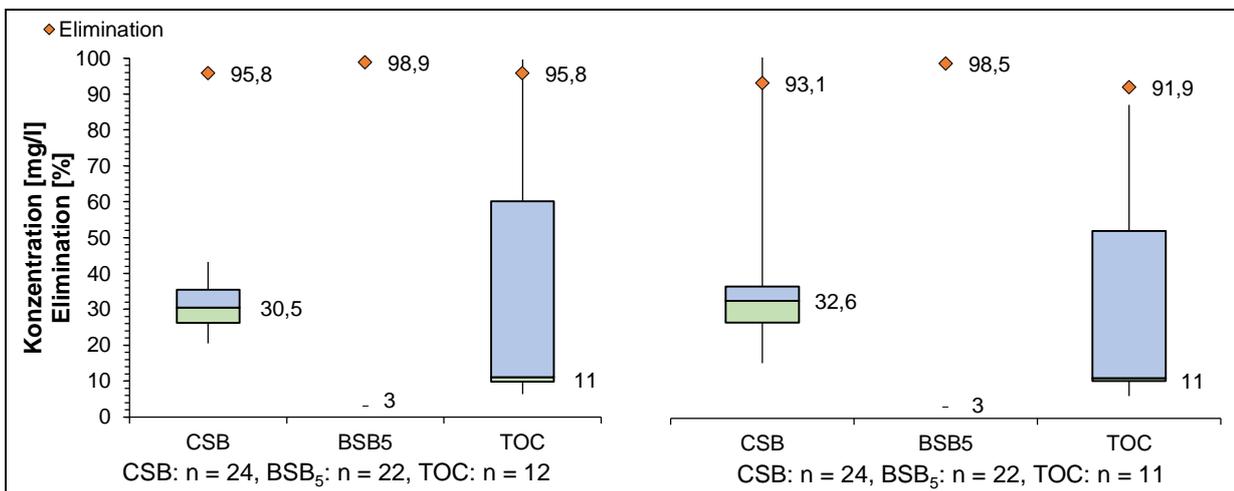


Bild 4.45: Ablaufkonzentrationen und Eliminationen von CSB, BSB₅ und TOC für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 4

Auch in Versuchsreihe 4 war durch die Erhöhung der Schlammbelastung in der Versuchsstraße im direkten Vergleich zur Referenzstraße keine Verschlechterung der Abwasserreinigung bezogen auf die organischen Summenparameter feststellbar. In Bild 4.46 sind die Überschussschlammproduktion und die TR-Gehalte beider MBR sowie die

absolute BSB₅-Fracht im Zulauf der MBR als Wochenmittelwerte dargestellt. Die absolute BSB₅-Fracht im Zulauf der Versuchsstraße liegt trotz Frachtentnahme in der Vorklärung höher als in der Referenzstraße, da hier der doppelte Zulaufvolumenstrom zu berücksichtigen ist.

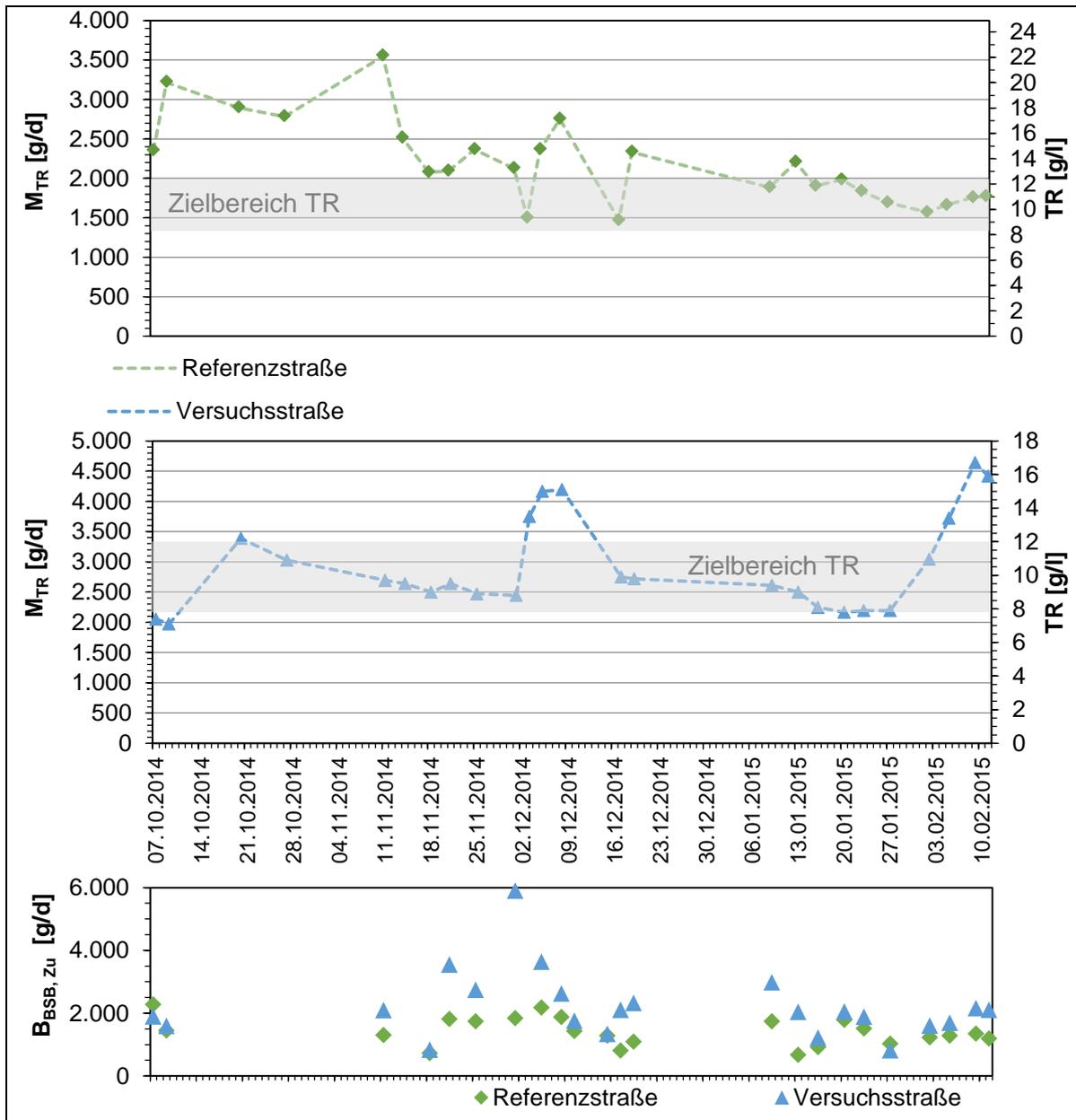


Bild 4.46: Entwicklung der Überschussschlammproduktion und des TR sowie BSB₅-Fracht im Zulauf von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 4

Durch die Erhöhung des Permeatvolumenstromes der Versuchsstraße in Versuchsreihe 4 im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchsreihen konnte durch die höhere Frachtbelastung im Zulauf des MBR durchgängig ein TR von mindestens 8 g/l eingehalten werden. Für die Referenzstraße lag der TR zunächst oberhalb des Zielbereichs, befand sich aber zum Ende der Versuchslaufzeit hin wieder im Bereich von 8 – 12 g/l. Die BSB₅-Fracht im Zulauf der MBR ist starken zeitlichen Schwankungen unterworfen (vgl. Kapitel 4.2.2), welche sich z. T. zeitnah in einer Veränderung der Schlammmasse in den

Belebungsbecken erkennen lassen. So hat der Anstieg der BSB₅-Fracht im Zulauf der Versuchsstraße in KW 49 (Messwert: 1.12.2014) Auswirkungen auf den TR im MBR und die ÜSS-Produktion in KW 50 (Messwerte: 3.12. 8.12.2014). Der TR stieg in diesem Zeitraum auf 13,5 bis 15 g/l. Nach Abfall der BSB₅-Fracht konnte eine Absenkung des TR in den Bereich von 8 – 12 g/l beobachtet werden. Der deutliche TR-Anstieg zum Ende der Versuchsreihe kann durch die vorliegenden Messdaten mit zwei Messungen je Woche nicht gedeutet werden. Allerdings ist hier eine ähnliche Begründung denkbar. In Tabelle 4.16 sind die Mittel- und Medianwerte für TR und GV des belebten Schlammes beider Straßen zusammengefasst. Der Glühverlust lag in beiden Straßen im gleichen Bereich bei 75 – 76 %.

Tabelle 4.16: TR und GV des belebten Schlammes der MBR von Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 4

	Referenzstraße		Versuchsstraße	
	TR	GV	TR	GV
	<i>g/l</i>	%	<i>g/l</i>	%
Median	13,1	75,7	9,6	75,3
Mittelwert	13,6	76,4	10,7	75,2

Aus Bild 4.47 können die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen im Ablauf beider MBR entnommen werden.

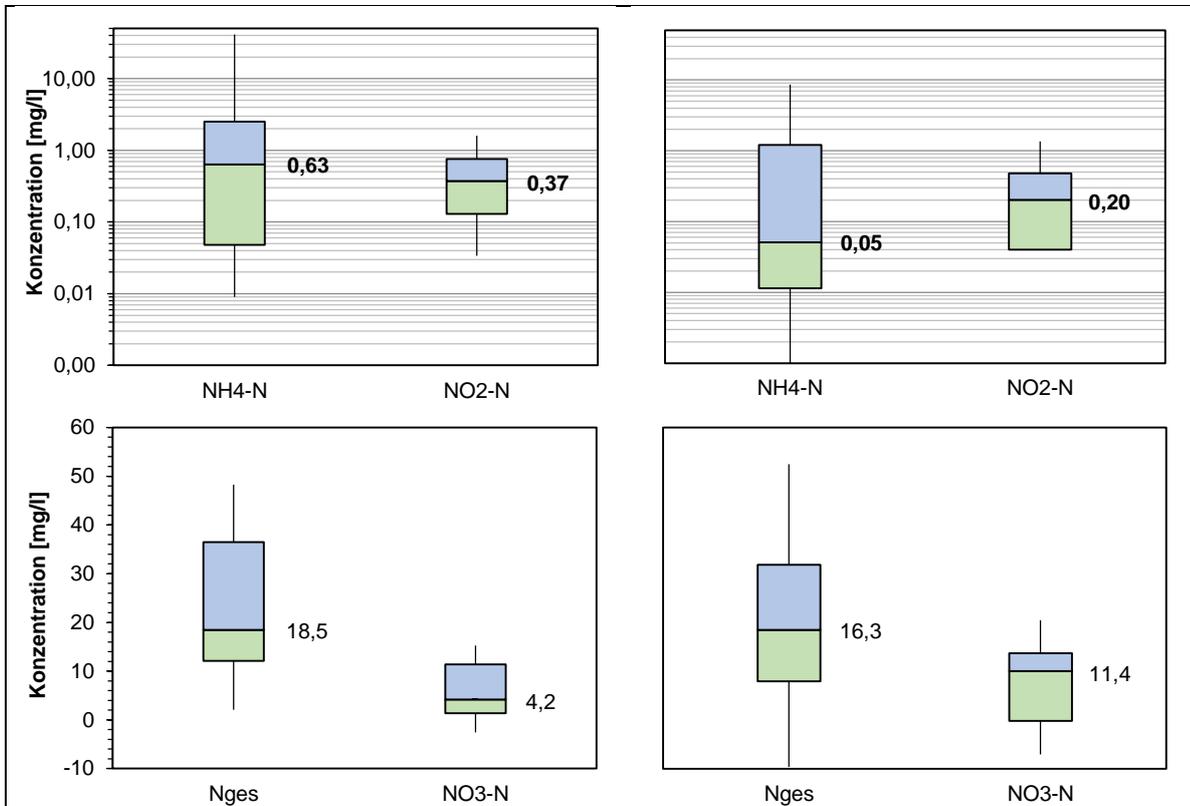


Bild 4.47: Ablaufkonzentrationen von Ammoniumstickstoff, Nitritstickstoff, Gesamtstickstoff und Nitratstickstoff für die Referenzstraße (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 4 (n = 24)

Die Versuchsstraße wies deutlich bessere Ablaufwerte (Mediane) für Ammonium- und Nitrit-Stickstoff auf als die Referenzstraße. Auch für die 85 %-Perzentile erzielte die Versuchsstraße ($\text{NH}_4\text{-N}$: 1,21 mg/l; $\text{NO}_2\text{-N}$: 0,48 mg/l) bessere Ergebnisse als für die Referenzstraße ($\text{NH}_4\text{-N}$: 2,1 mg/l; $\text{NO}_2\text{-N}$: 0,75 mg/l). Im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchsreihen scheint die Nitrifikation im MBR der Referenzstraße verschlechtert, wie die erhöhten $\text{NH}_4\text{-N}$ werte zeigen. Der $\text{NO}_3\text{-N}$ Wert der Referenzstraße ist vermutlich aufgrund der verschlechterten Nitrifikation und einer Verschiebung des Verhältnisses von Kohlenstoff und $\text{NO}_3\text{-N}$ in der Denitrifikation in Richtung des Kohlenstoffs im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchsreihen deutlich niedriger. Die Ablaufwerte der Stickstoffparameter der Versuchsstraße ordnen sich in die Ergebnisse der vorangegangenen Versuchsreihen ein. Aus dem zeitlichen Verlauf der $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_2\text{-N}$ Ablaufwerte, der in Bild 4.48 dargestellt ist, kann ein Teil der hohen $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentrationen im Ablauf beider Straßen erklärt werden.

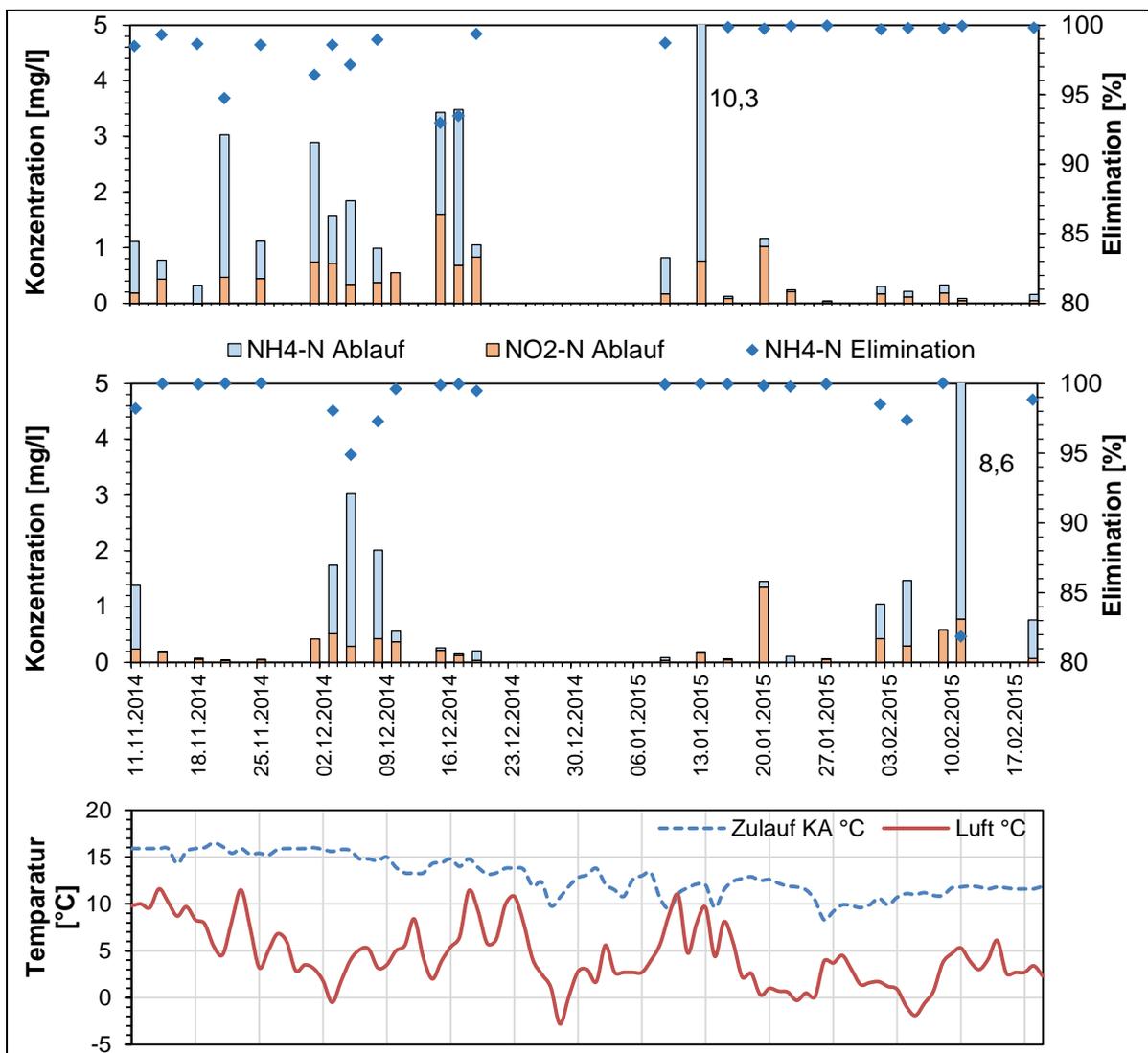


Bild 4.48: Zeitlicher Verlauf der $\text{NH}_4\text{-N}$ -, $\text{NO}_2\text{-N}$ -Konzentration und der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination in der Referenz- (oben) und der Versuchsstraße (unten) sowie Lufttemperatur und Temperatur des Abwassers im Zulauf für Versuchsreihe 4

Die sensiblen Prozesse im Belebungsbecken sind stark temperaturabhängig. Da keine direkte Temperaturmessung im Belebungsbecken installiert war, sind in Bild 4.48 die Temperaturen im Zulauf der Kläranlage Neuss-Süd und die Lufttemperatur im Großraum Neuss als Tagesmittelwerte dargestellt. Die kältere Lufttemperatur bewirkt aufgrund der großen Förderstrecke vom Zulauf der KA Neuss-Süd zum Zulauf der HTK und den langen Aufenthaltszeiten in der Vorklärung und im Belebungsbecken der MBR-Straßen (jeweils freistehende Metallbehälter) vermutlich eine deutliche Absenkung der Wassertemperatur. Die realen Temperaturverhältnisse im Belebungsbecken liegen somit zwischen den dargestellten Temperaturen.

Vom 01.12. bis 09.12.2014 war eine deutliche Absenkung der Lufttemperatur zu beobachten. PINNEKAMP ET AL. (2009) berichteten in einem vorangegangenen Forschungsprojekt von $\text{NH}_4\text{-N}$ Spitzen im Ablauf eines MBR bei Wassertemperaturen kleiner $12\text{ }^\circ\text{C}$. Das „Durchschlagen“ dieser Spitzen im MBR wurde auf eine deutliche Volumenreduktion des MBR im Vergleich zum konventionellen Belebungsverfahren mit Nachklärung und größeren Beckenvolumina zurückgeführt. Auch wenn die mittlere hydraulische Aufenthaltszeit in beiden MBR-Straßen deutlich oberhalb der in Pinnekamp und Friedrich (2006) angegebenen 6 bis 8 Stunden lag (siehe Tabelle 3.2), könnte hier eine Begründung für die $\text{NH}_4\text{-N}$ Spitzen liegen.

Gleichzeitig ist schon vor der Absenkung der Lufttemperatur Anfang Dezember 2014 eine deutlich schlechtere Nitrifikation im Belebungsbecken der Referenzstraße zu beobachten. Aus den in Bild 4.46 dargestellten TR-Werten wird ersichtlich, dass in der Referenzstraße zum betreffenden Zeitpunkt ein TR von $17 - 19\text{ g/l}$ vorlag. Somit war voraussichtlich der Sauerstoffeintrag durch die Belüftung aufgrund des niedrigen Grenzflächenfaktors α im Nitrifikationsbecken unzureichend (vgl. Zusammenhang TR und α -Wert, z. B. in MOLDT, 2001). Hiermit lässt sich eventuell ebenfalls die $\text{NH}_4\text{-N}$ Spitze in der Versuchsstraße am 11.02.2015 (7. KW) erklären, wo der TR bei $15,9\text{ g/l}$ lag.

4.6.2 Filtrationsleistung im MBR

4.6.2.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit

In Bild 4.49 sind der Bruttovolumenstrom, der TMP der Membranen, die dazugehörigen TR-Werte in den Belebungsbecken beider Straßen und die Abwassertemperatur im Zulauf der Kläranlage dargestellt. Für den Zeitraum vom 02.01. bis 27.01.2015 liegen keine Daten vor, da diese nicht auf den installierten Datenloggern gespeichert wurden, möglicherweise da die Stromversorgung der Datenlogger zeitweise ausgefallen war.

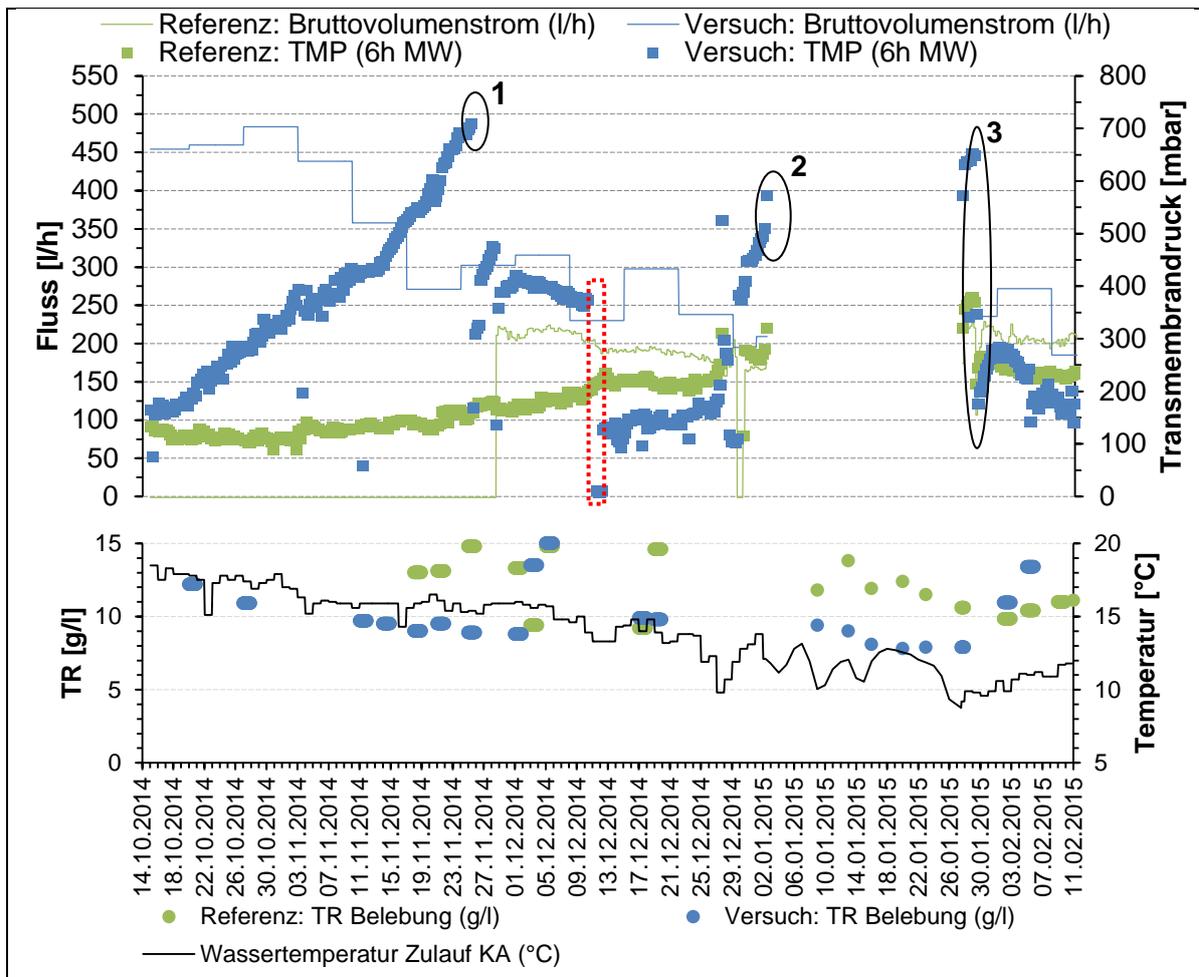


Bild 4.49: Bruttovolumenstrom, Transmembrandruck und TR von Versuchs- und Referenzstraße (Reinigungen sind schwarz und rot markiert) in Versuchsreihe 4

Es wird deutlich, dass ähnlich wie in Versuchsreihe 2 ein starker Anstieg des TMP in der Versuchsstraße zu verzeichnen war. Durch die Reinigung am 25.11.2014 (1) konnte nur eine kurzfristige Verbesserung des TMP erreicht werden. Dieser stieg allerdings innerhalb von 3 Tagen wieder auf über 400 mbar. Dieses Verhalten zeigte sich auch nach weiteren Reinigungen im Januar 2015. Eine Abhängigkeit des TMP vom TR im Belebungsbecken lässt sich ablesen. So konnte eine deutliche Verlangsamung des TMP-Anstiegs im Dezember (03.12. bis 11.12.2014) festgestellt werden. Dabei war der TR im Belebungsbecken zunächst größer als 13 g/l. Der anschließende plötzliche Abfall des TMP ab dem 11.12. (rot umrandeter Bereich) ist durch eine zweitägige Intensivreinigung bis zum 12.12. unter Abschaltung der Permeatpumpe begründet. Dies führte wie schon der Ausfall der Permeatpumpe in Versuchsreihe 2 (vgl. Kapitel 4.4.2.1) zu einer Absenkung des TMP und einem zeitweise geringen Wiederanstieg. Der TMP lag vom 12.12. bis zum 26.12. bei 120 – 180 mbar. Auch zum Ende der Versuchsreihe im Februar 2015 ging mit dem Anstieg des TR auf 11 – 13 g/l ein TMP kleiner 200 mbar einher. In der Referenzstraße konnte der Betrieb bis auf eine Zwischenreinigung (3) im Januar durchgängig bei kleiner 400 mbar TMP aufrechterhalten werden.

In Tabelle 4.17 sind die anhand der Zählerstände ermittelten Nettoflüsse der Versuchsstraße zusammengestellt.

Tabelle 4.17: Nettoflüsse der Versuchsstraße für Versuchsreihe 4

Min	l/h	13,0
15 %	l/h	315,8
Median	l/h	442,9
85 %	l/h	481,5
Max	l/h	708,9
Mittelwert	l/h	425,4
Anzahl		45

Der Permeatvolumenstrom lag im Mittelwert bei 425 l/h und damit etwa 6 % oberhalb des Zielwertes von 400 l/h. Dies wurde in den vorangegangenen Kapiteln zur Versuchsreihe 4 für die Frachtberechnungen im Zulauf des MBR und die darauf basierenden Werte (z. B. B_{TR}) berücksichtigt.

4.6.2.2 Filtrationseigenschaften des belebten Schlammes

Im Laufe der Versuchsreihe 4 konnten für die SFI-Werte die in Bild 4.50 dargestellten Spannweiten ermittelt werden.

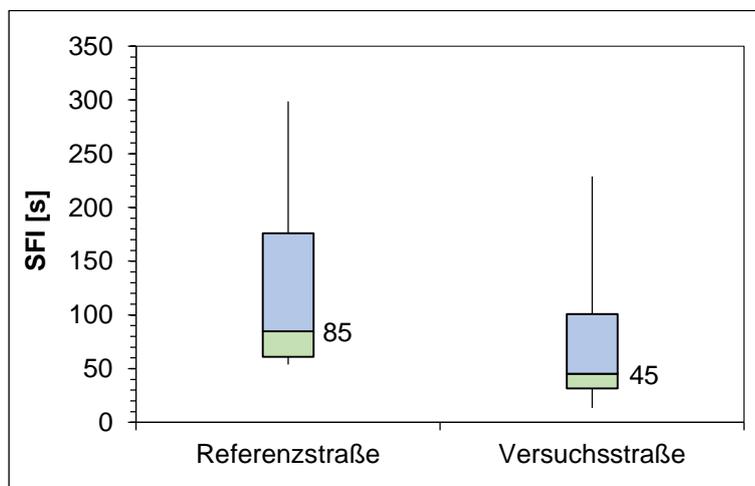


Bild 4.50: Auf den %TR bezogener Schlammfiltrationsindex (SFI) des belebten Schlammes der Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 4

Der auf den %TR bezogene SFI der Referenzstraße wies einen Median von 85 s auf. Alle Werte lagen dabei im Bereich von 54 bis 298 s. In der Versuchsstraße wurde ein Median von 45 s ermittelt, mit einem Messwertbereich von 14 bis 229 s. In dieser Versuchsreihe stellte sich ein ähnliches Bild ein wie in Versuchsreihe 1 und 2, mit dem Unterschied, dass es innerhalb von den SFI-Werten für die Versuchsstraße zu größeren Schwankungen kam. Die zeitliche Darstellung des SFI zeigt in Versuchsreihe 4 keinen Zusammenhang zwischen SFI und dem TMP (siehe Bild 4.51).

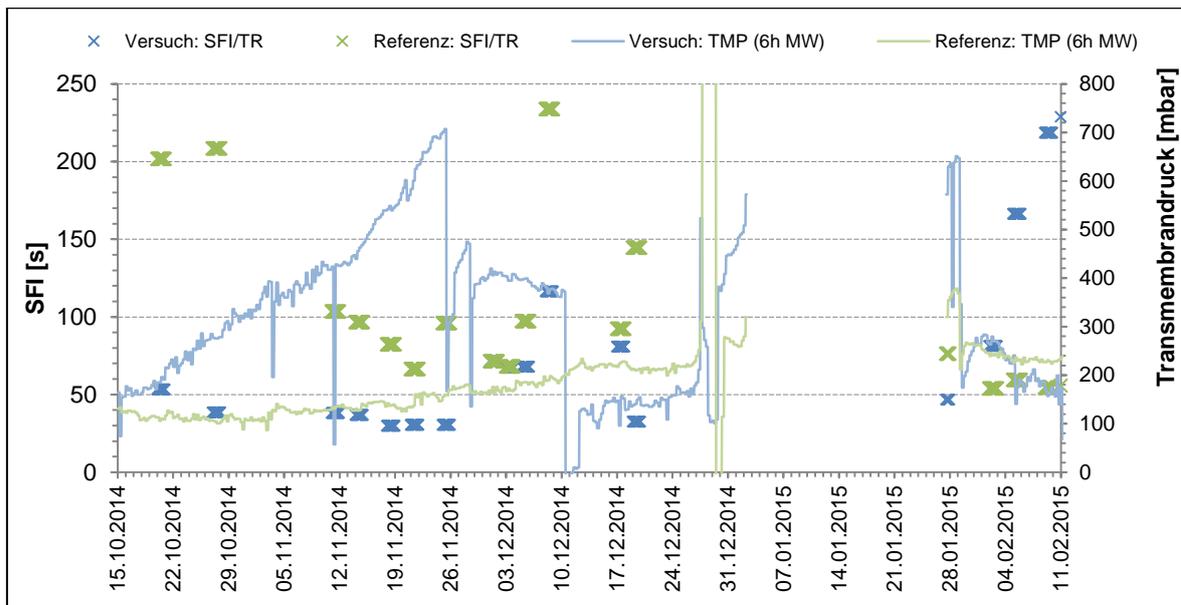


Bild 4.51: Zeitlicher Verlauf des TMP und SFI in der Referenz- und Versuchsstraße für Versuchsreihe 4

Aufgrund der dargestellten Ergebnisse für den SFI ist in den Monaten Oktober bis Dezember 2014 eine bessere Filtrierbarkeit des belebten Schlammes aus der Versuchsstraße im Vergleich zur Referenzstraße anzunehmen. Diese Annahme ist im täglichen Betrieb in Versuchsreihe 4 nicht bestätigt worden. Wie sich zeigt, ist der SFI gegen Ende der Versuchsreihe im Februar 2015 in der Versuchsstraße sogar deutlich erhöht, doch der TMP liegt im Bereich von 150-250 mbar. Die naheliegende Schlussfolgerung ist, dass der SFI als Momentaufnahme der Filtrierbarkeit zum Zeitpunkt der Probennahme geeignet ist, aber die langfristigen Prozesse der Anlagerung polymerer Substanzen an den Membranen und der damit einhergehenden Verblockung der Poren nur ungenügend abbilden kann.

4.6.2.3 Extrazelluläre polymere Substanzen (EPS)

In Versuchsreihe 4 wurde der Gehalt an EPS in Belebtschlammproben bestimmt. Dabei zeigte sich im Mittel eine auf den TR bezogene EPS-Konzentration von 62,7 mg EPS/g TR in der Versuchsstraße (n = 8) und 40,4 mg EPS/g TR in der Referenzstraße (n = 9). In Bild 4.52 sind die zeitlichen Verläufe der EPS-Konzentrationen für Referenz- und Versuchsstraße dem vorherrschenden TMP gegenübergestellt.

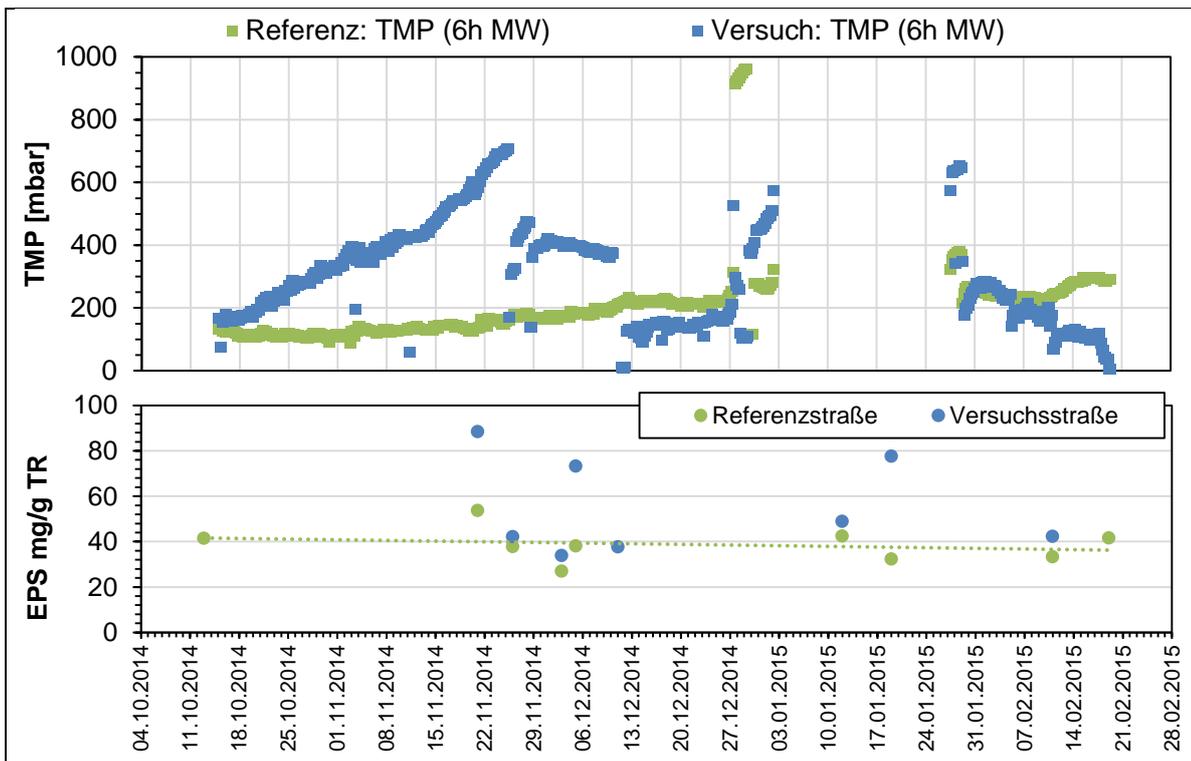


Bild 4.52: Gegenüberstellung des TMP zum EPS-Gehalt des belebten Schlammes in Versuchs- und Referenzstraße in Versuchsreihe 4

Aus der Grafik kann für die Versuchsstraße eine häufig höhere EPS-Konzentration im TR abgelesen werden. Ein direkter Vergleich mit dem TMP ist aufgrund der geringen Probandichte schwierig. Es zeigt sich dennoch, dass zu Zeitpunkten mit geringeren EPS-Gehalten im belebten Schlamm, nahe an den Gehalten in der Referenzstraße (26.11., 3.12., 11.12.2014 und 11.2.2015) ein niedriger TMP, bzw. ein geringer Anstieg vorliegt. Aufgrund der fehlenden TMP-Daten im Januar (siehe Kapitel 4.6.2.1) ist ein direkter Vergleich der EPS-Gehalte mit dem TMP zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Die Onlinemessung zeigt allerdings für den 27.01.2015 einen deutlich erhöhten TMP in der Versuchsstraße, welcher auch bereits am 19.01.2015 vom Betriebspersonal vor Ort festgestellt wurde. Zum Ende der Versuchsreihe stieg der TR im Belebungsbecken der Versuchsstraße, trotz unveränderter Versuchseinstellungen, stark an (Bild 4.46). Dies hatte negative Auswirkungen auf den SFI (Bild 4.51), wirkte sich aber anscheinend dennoch positiv auf die Filtrierbarkeit des Schlammes aus, wie der absinkende TMP zeigt. Dieser ging ebenfalls mit einer gesunkenen EPS-Konzentration in der belebten Schlamm-trockenmasse im Vergleich zum 19.01. einher. Für die Referenzstraße ist über den gesamten Versuchszeitraum ein Schwanken um den Mittelwert festzustellen (siehe Trendlinie). Der TMP stieg hier langsam an, so dass nur eine Zwischenreinigung notwendig wurde.

Zum direkten Vergleich der EPS-Produktion in der Versuchs- und Referenzstraße ist der unterschiedliche ÜSS-Abzug zu beachten, welcher in Bild 4.53 berücksichtigt wurde.

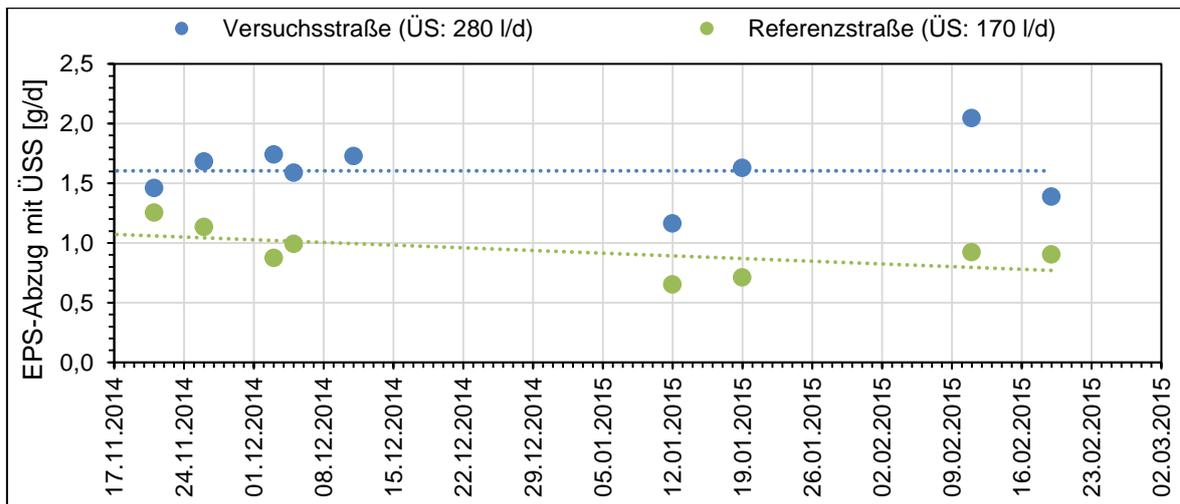


Bild 4.53: EPS-Massenstrom im Überschussschlammabzug

Es zeigte sich, dass der EPS-Massenstrom im ÜSS-Abzug für die Versuchsstraße deutlich oberhalb dem der Referenzstraße lag. Im Mittel wurden in der Versuchsstraße 72,1 % mehr EPS im Überschussschlamm abgezogen. Die EPS-Produktion in der Versuchsstraße war somit gegenüber der Referenzstraße deutlich höher. In der Literatur finden sich vermehrt Ergebnisse, dass sich ein gesenktes Schlammalter bei gleichzeitiger Erhöhung der Schlammbelastung foulingfördernd auswirkt [MELIN ET AL., 2007; MENG ET AL., 2009). Dies wurde mit den vermehrten Gehalten an gebundenen und gelösten EPS bei sinkendem Schlammalter in Verbindung gebracht. Wie Bild 4.44 zeigt, war die Schlammbelastung im MBR der Versuchsstraße gegenüber der Referenzstraße innerhalb der ersten 3 Monate von Versuchsreihe 4 deutlich erhöht. Erst zum Ende der Versuchsreihe im Februar 2015 glichen sich die beiden Straßen aufgrund des gestiegenen TR in der Versuchsstraße und dem damit verbundenen Absinken der Schlammbelastung an. Zu diesem Zeitpunkt sinkt auch der TMP (vgl. Bild 4.49 und Bild 4.52).

Zusätzlich zur versuchsbegleitenden Analytik wurden zum Ende der Versuchsreihe 4 noch die in Kapitel 3.3.3.4 beschriebenen Proben direkt auf der Membran entnommen. Die Verteilung der EPS auf der Membranfläche kann Bild 4.54 entnommen werden.

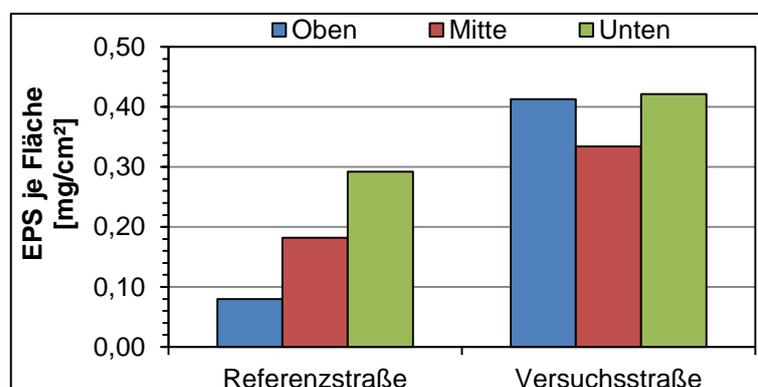


Bild 4.54: Verteilung der EPS an verschiedenen Stellen der Membranfläche

Der flächenspezifische EPS-Gehalt auf den Membranen liegt für die Versuchsstraße unverkennbar weit oberhalb der Referenzstraße. Der implizierte Biofilm auf der Membranplatte der Versuchsstraße ist deutlich homogener. In der Versuchsstraße war hingegen ein Anwachsen des Biofilms vom unteren Teil der Membran nach oben hin zu erkennen. Bei der Untersuchung der Zusammensetzung der EPS (Bild 4.55) konnte in der Referenzstraße zusätzlich die signifikante Steigerung der flächenspezifischen Gehalte an Zuckern und Proteinen, sowie weniger ausgeprägt auch an Uronsäure, vom oberen Teil der Membranplatte nach unten hin festgestellt werden.

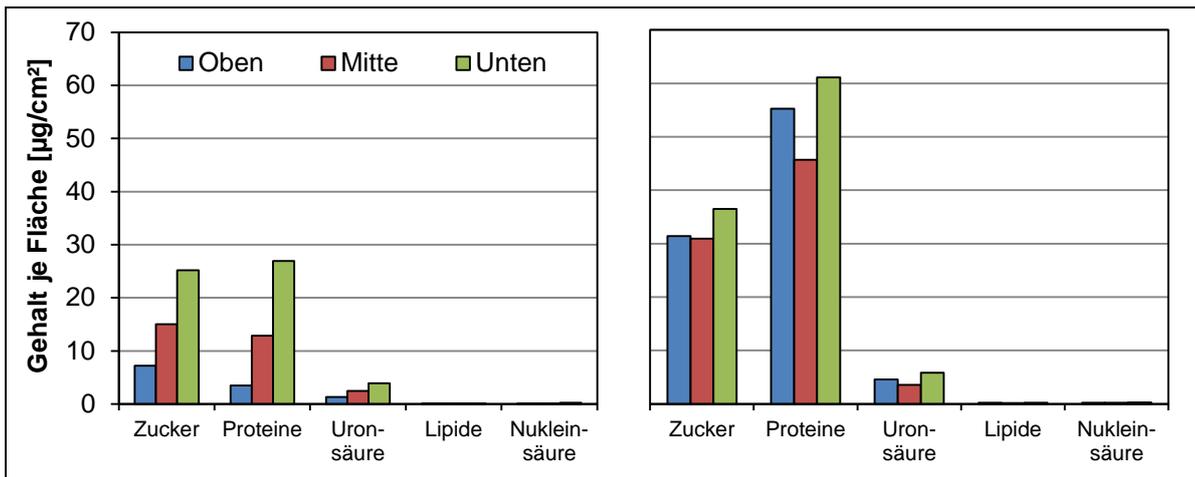


Bild 4.55: Zusammensetzung der EPS auf der Membranoberfläche für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts)

Auch hier lagen die Gehalte für die Versuchsstraße deutlich höher als für die Referenzstraße und waren homogener verteilt. Lipide und Nukleinsäuren lagen für beide Straßen im Vergleich zu den vorgenannten Substanzen in verschwindend geringen Konzentrationen vor. Bei Betrachtung des Verhältnisses von Zuckern zu Proteinen wird deutlich, dass dieses in der Referenzstraße in etwa ausgeglichen ist, während es sich in der Versuchsstraße stark zugunsten der Proteine verschiebt. Zucker sind für Mikroorganismen als Energiequelle besser verfügbar als Proteine und werden daher bevorzugt verstoffwechselt. Aus diesem Umstand kann hier eine qualitative Aussage über das Alter des Biofilms auf beiden Membranen abgeleitet werden, da sich das Verhältnis zwischen Zuckern und Proteinen mit der Zeit in Richtung Proteine verschiebt. (NIELSEN ET AL, 1997) Es kann davon ausgegangen werden, dass der Biofilm in der Versuchsstraße in Versuchsreihe 4 durch die häufigere Membranreinigung nur ungenügend entfernt wurde, während sich in der Referenzstraße eine chemische Reinigung als effektiver erwies.

4.6.3 Gasertrag und Methangehalt in der Faulung

Die Ergebnisse der Gasqualitätsmessung und der –volumenstrommessung für Versuchsreihe 4 sind in Bild 4.56 dargestellt.

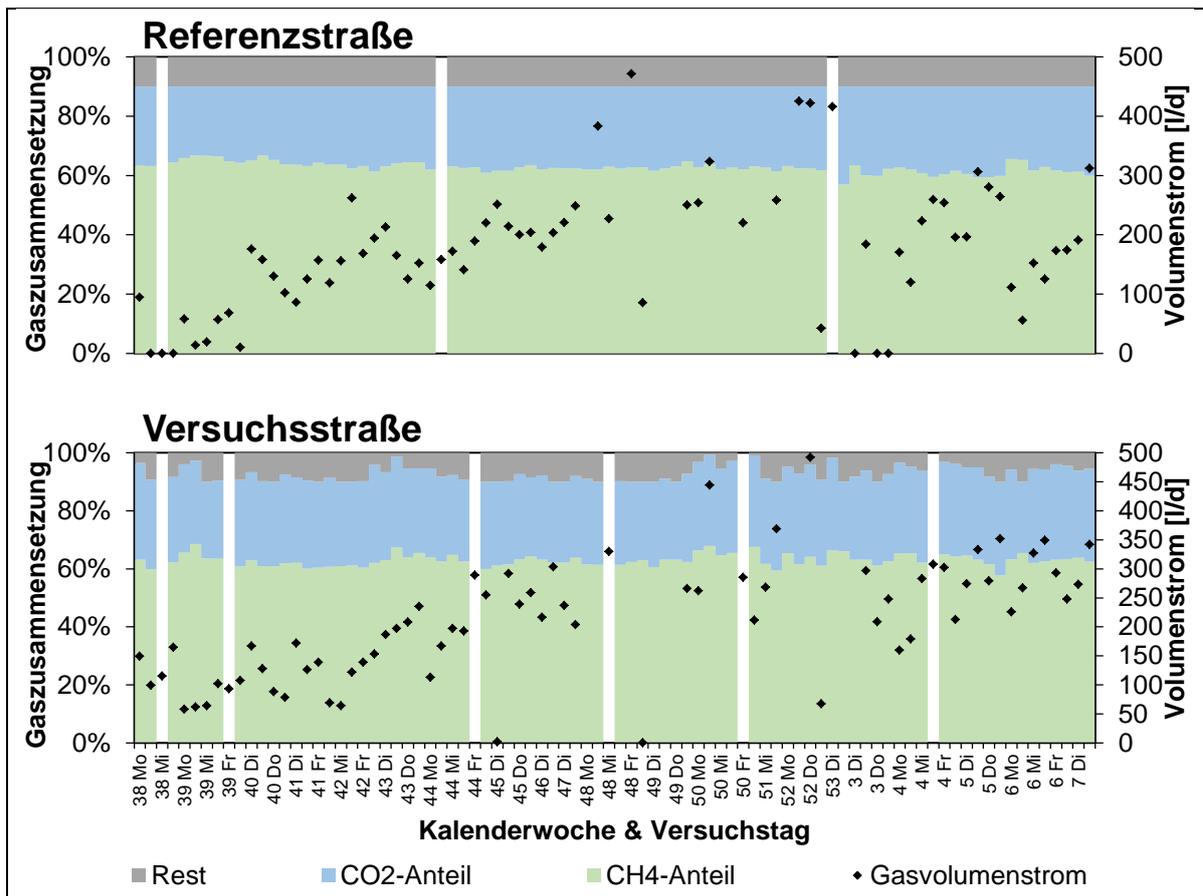


Bild 4.56: Gasvolumenstrom und -zusammensetzung für die Referenz- und Versuchsstraße in Versuchsreihe 4

Bis auf einzelne Ausfälle konnte die Gasqualitätsmessung täglich durchgeführt werden. Das Verhältnis von CH_4 zu CO_2 blieb in beiden Straßen über die Versuchszeit gleichmäßig, wobei ein Restgas-Anteil in der Versuchsstraße von zumeist unterhalb von 10 % vorlag. Die mittlere tägliche Gasproduktion lag in der Referenzstraße bei 186 l/d und in der Versuchsstraße bei 219 l/d.

Die täglichen und spezifischen Gasproduktionen der Faulbehälter sind in Tabelle 4.18 zu sehen. Zudem sind Minimal-, Mittel und Maximal-Werte für die gemessenen CH_4 - und CO_2 -Anteile angegeben.

Tabelle 4.18: Tägliche und spezifische Gaserträge aus der Faulung sowie CH₄ und CO₂-Anteile im Faulgas in Versuchsreihe 4

Straße	Gasproduktion		Gasqualität		
	täglich	spezifisch		% -CH ₄	% -CO ₂
	l/d	l/kg oTR,zu			
Referenz	186	340	Min	56,9	24,4
			Mittel	62,1	27,9
			Max	65,6	33,1
Versuch	219	405	Min	57,7	24,0
			Mittel	63,2	29,8
			Max	67,9	33,7

Für die Referenzstraße wurde in Versuchsreihe 4 ein deutlicher Anstieg der massenspezifischen Gasproduktion auf 340 l Gas/kg oTR,zu verzeichnet. Aus Bild 4.56 geht hervor, dass eine durchgängig hohe Gasproduktion vorliegt und nicht einzelne erhöhte Werte das Ergebnis verfälschen. In der Versuchsstraße wurden 405 l Gas/kg oTR,zu produziert. Die CH₄-Konzentrationen liegen für Versuchs- und Referenzstraße in einem ähnlichen Bereich.

Tabelle 4.19 enthält die mittleren TR- und GV-Werte der einzelnen Massenströme in der Referenz- und Versuchsstraße.

Tabelle 4.19: Mittelwerte zu TR und GV, sowie der zugehörigen Massenströme in beiden Straßen in Versuchsreihe 4

Straße	Ort	TR	GV	M _{oTR}	M _{TR}
		g/l	%	g/d	g/d
Referenz	MBR	13,6	76,4	1.689	2.179
	Input FB (ÜSS)	19,7	77,7	547	704
	Output FB	14,3	14,3	358	511
Versuch	MBR	10,7	75,2	2.234	2.961
	Input FB (PS + ÜSS)	19,3	78,7	541	688
	Output FB	13,9	69,0	345	495
	PS	6,9	76,0	1.126	1.484

In Versuchsreihe 4 lag der M_{oTR} im Input des FB in der Referenz- und in der Versuchsstraße bei jeweils ca. 540 - 550 g/d. Das Massenverhältnis im Input der Faulung der Versuchsstraße wurde zu 32,9 % PS und 67,1 % ÜSS bestimmt (vergleiche Kapitel 3.1.3 und 4.2.4). Der Anteil organischer Trockenmasse betrug 29 % für PS und 71 % für ÜSS. Bei der Betrachtung der real anfallenden Massenströme sollte das Verhältnis 33,4 % PS zu 66,6 % ÜSS bezogen auf die Trockenmasse betragen.

Die Raumbelastung der Faulbehälter ist in Bild 4.57 dargestellt. Die dargestellten grünen und blauen Flächen in den Diagrammen zeigen den Wertebereich vom 10 %-Perzentil bis zum 90 %-Perzentil an.

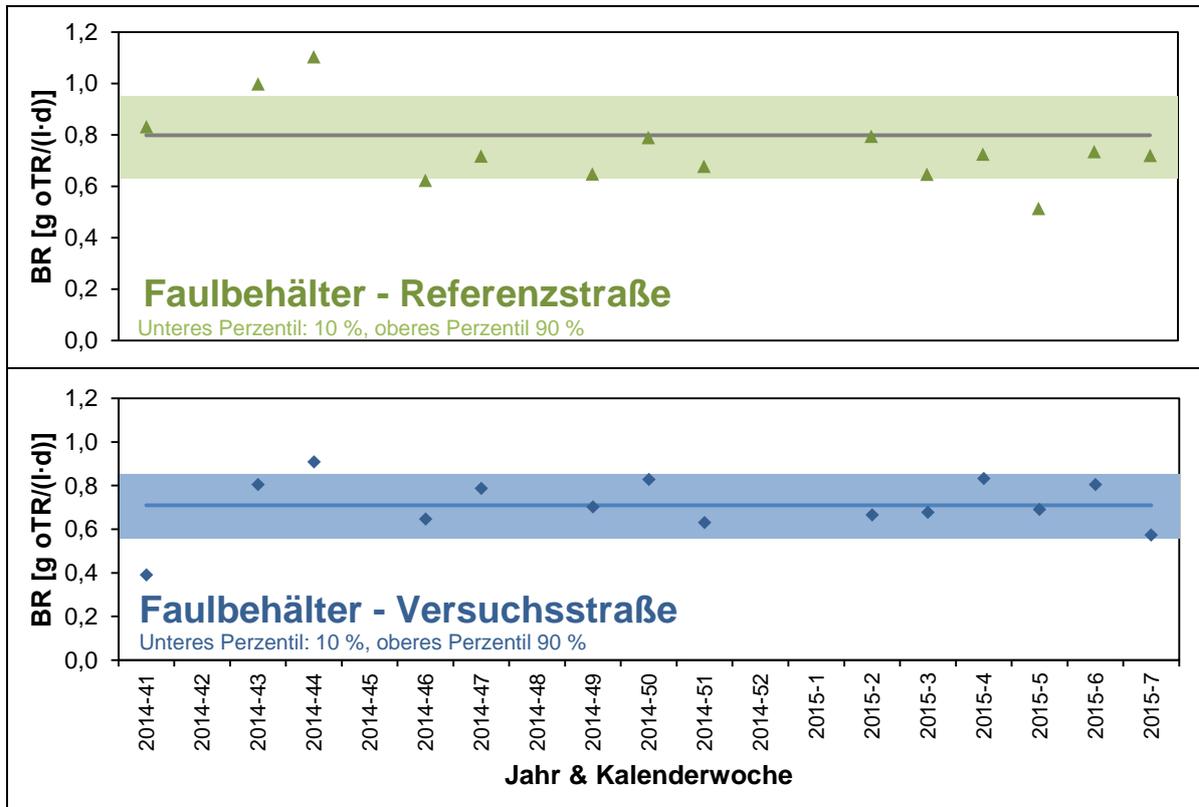


Bild 4.57: Raumbelastung in beiden Faulbehältern in Versuchsreihe 4

Die Raumbelastung des Faulbehälters der Versuchsstraße lag im Mittel bei 0,732 kg oTR/(m³·d) in Versuchsreihe 4. Aufgrund des hohen TR im ÜSS der Referenzstraße und der guten Eindickung auf im Mittel 19,7 g/l im Input des FB lag die Raumbelastung mit 0,781 kg oTR/(m³·d) höher als in der Versuchsstraße. Dies könnte die hohe massenspezifische Gasproduktion zumindest teilweise erklären.

Der rechnerische Abbau an organischer Trockensubstanz nach 21 Tagen Faulzeit betrug 34 - 35 % in der Referenzstraße und 36 - 37 % in der Versuchsstraße. Durch die Mitfäulung des leicht abbaubaren PS sollte für die Mischung eine deutliche Erhöhung des Abbaugrades in der Fäulung der Versuchsstraße erreicht werden, wie dies in Versuchsreihe 3 zu beobachten war. Zusätzlich sollte dieser Effekt aufgrund des niedrigen Schlammalters des Überschussschlammes verstärkt werden. Der beobachtete niedrige Abbau weist hingegen auf eine nicht optimale Fäulung des Schlammes hin. Die bereits hohen Werte für die tägliche Gasproduktion von 219 l/d könnten bei optimalen Fäulbedingungen somit nochmals gesteigert werden.

4.6.4 Entwässerungs- und Absetzeigenschaften im MBR, sowie vor und nach anaerober Stabilisierung

In Bild 4.58 sind die ISV in der Nitrifikationsstufe beider MBR-Straßen sowie die des eingedickten Inputs des Faulbehälters (Referenzstraße: nur ÜSS; Versuchsstraße: ÜSS + PS) und des gefaulten Outputs gegenübergestellt. In Versuchsreihe 4 konnte für die Referenzstraße ein ähnlicher Verlauf der Absetzbarkeit für die verschiedenen Schlammvolumenströme festgestellt werden, wie dies auch in den vorangegangenen Versuchsreihen der Fall war.

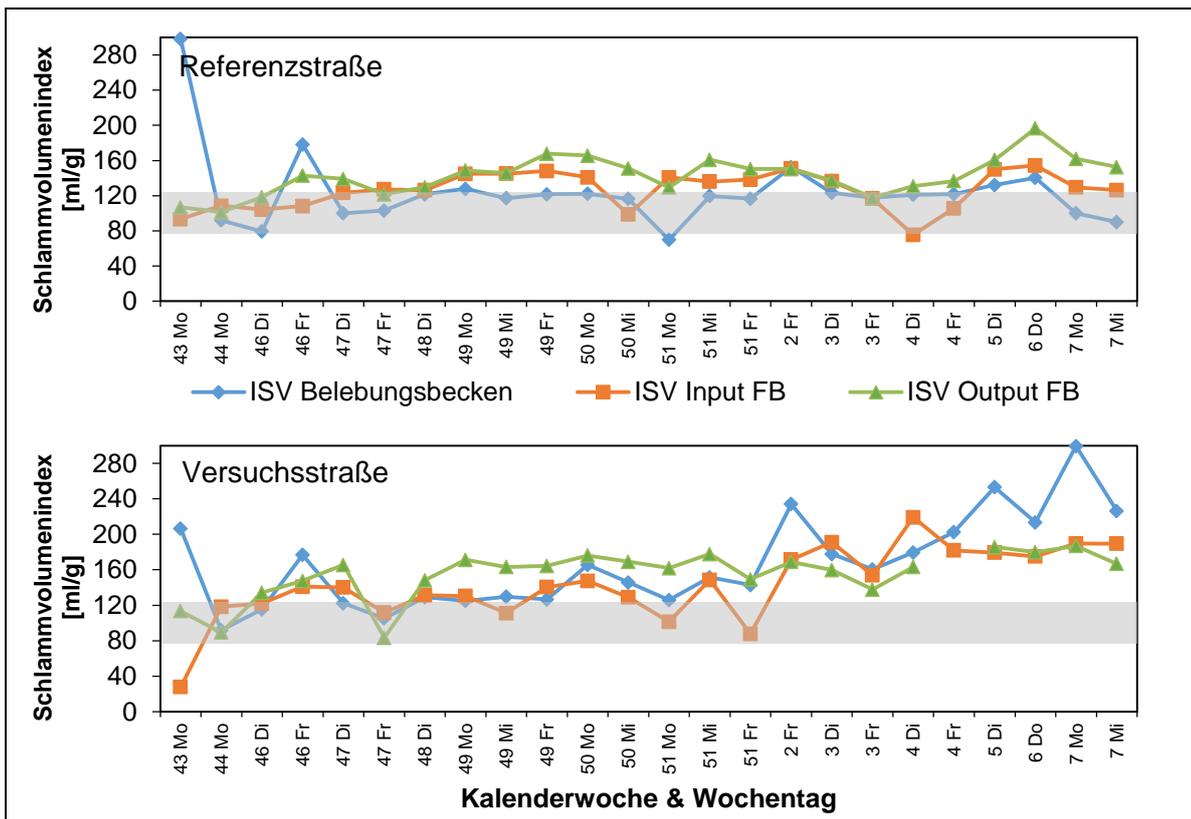


Bild 4.58: Schlammvolumenindex (ISV) in der Belebung und Veränderung durch Eindickung des ÜSS und Einmischen des PS für die Versuchsstraße (Input FB) und Faulung (Output FB) für die Referenz- und die Versuchsstraße in Versuchsreihe 4

In der Versuchsstraße lag zu Beginn von Versuchsreihe 4 ein leicht erhöhter ISV im Belebungsbecken vor, welcher zum Ende der Versuchsreihe deutlich anstieg. Die Eindickbarkeit des ÜSS nahm dementsprechend über die Zeit ab. Dies ist gut aus Bild 4.59 ersichtlich, in welchem die zeitliche Veränderung des ISV im BB der Versuchsstraße der des $TR_{\text{ÜS}}$ im Ablauf des Eindickers gegenübergestellt ist. Mit zunehmendem ISV nimmt die Eindickbarkeit des ÜSS und somit der TR im Ablauf des Eindickers erwartungsgemäß ab.

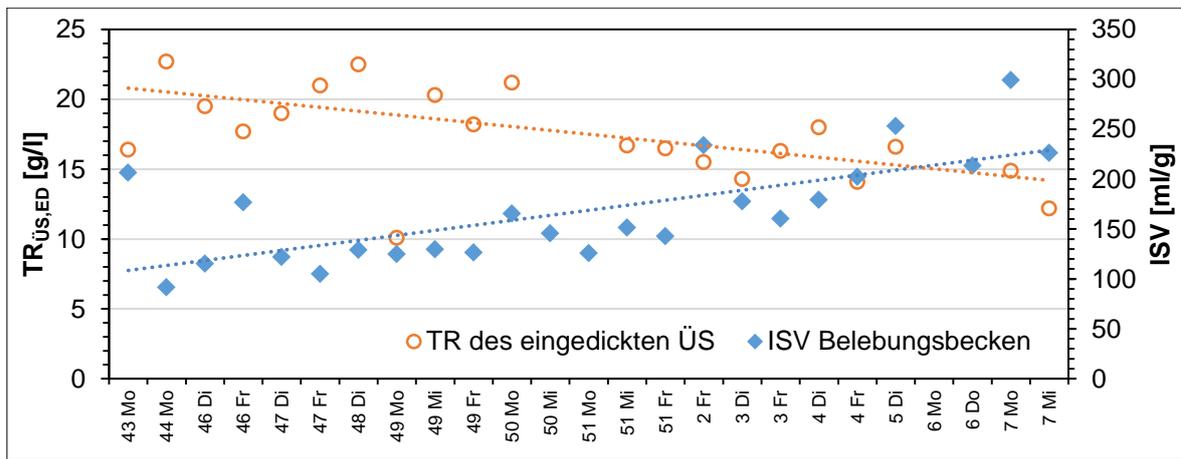


Bild 4.59: Zusammenhang zwischen ISV des frischen ÜSS und TR des eingedickten ÜSS der Versuchsstraße in Versuchsreihe 4

Bild 4.60 zeigt die CST/TR-Werte der einzelnen Schlammströme der Referenz- und der Versuchsstraße.

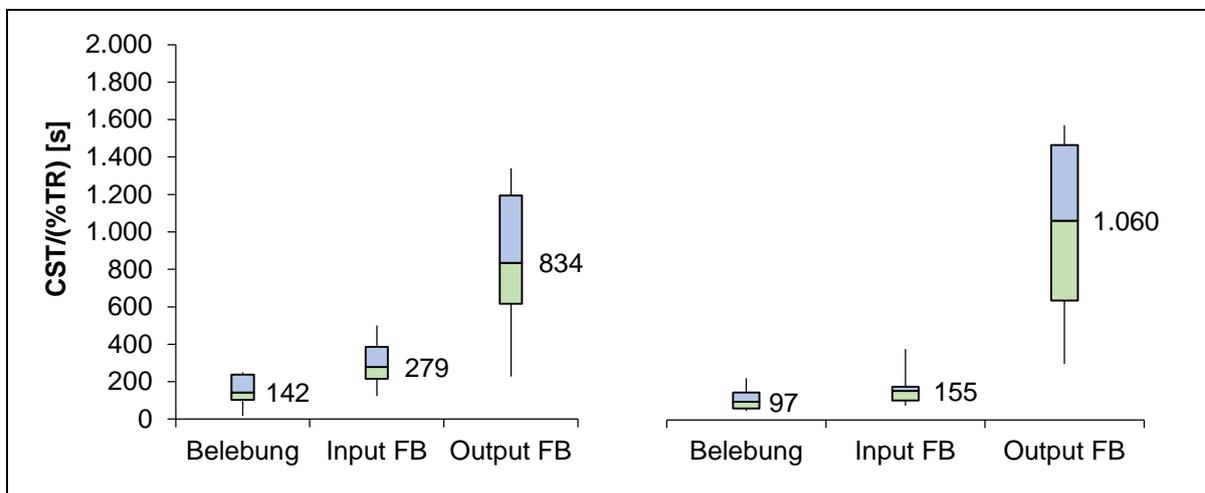


Bild 4.60: Auf den TR normierte Kapillare Fließzeit (CST/TR) der Schlämme für die Referenz- (links) und die Versuchsstraße (rechts) in Versuchsreihe 4

Der CST/TR lag im Belebungsbecken der Referenzstraße im Median bei 142 s und somit im mittelmäßig entwässerbaren Bereich. Der CST/TR der Versuchsstraße zeigte, wenn auch insgesamt niedriger bei 97 s, ebenfalls mittelmäßige Entwässerbarkeit an. Durch die Eindickung verschlechterte sich die Entwässerbarkeit des ÜSS der Referenzstraße erwartungsgemäß und lag im schlecht entwässerbaren Bereich. Der ÜSS der Versuchsstraße, welcher mit PS aus der KA Neuss-Süd gemischt der Faulung zugegeben wurde, war knapp oberhalb der mittelmäßigen Entwässerbarkeit. Durch die Faulung wurde eine deutliche Verschlechterung der Entwässerbarkeit festgestellt, wobei der Output des FB aus der Versuchsstraße deutlich höher lag als der Output der Referenzstraße.

5 Diskussion der Versuchsergebnisse

Um die Eignung des Konzeptes MBR + VK und Faulung bewerten zu können sind neben der grundsätzlichen Machbarkeit auch Fragen der Betriebssicherheit – ausgedrückt als Reinigungsleistung und Filtrationsleistung – und der Wirtschaftlichkeit aufgrund des erreichbaren Gasertrages von Interesse. Nachfolgend werden die Versuchsreihen miteinander verglichen, mit dem Ziel:

- mögliche Veränderungen in der Reinigungsleistung aufgrund des veränderten C:N-Verhältnisses durch den Betrieb des MBR mit Vorklärung und Faulung zu untersuchen,
- eine Aussage im Hinblick auf die im Versuchsbetrieb untersuchten unterschiedlichen Schlammalter hinsichtlich der Reinigungsleistung zu treffen,
- die Betriebssicherheit hinsichtlich der Filtrationsleistung innerhalb des Versuchsbetriebes zu bewerten,
- die massenspezifischen Gaserträge aus ÜSS, PS in l/kg oTR, zu für die Fälle $t_{TS} = 15$ Tage und $t_{TS} = 25$ Tage zu ermitteln und
- die gewonnenen Erkenntnisse in die Ergebnisse zu den großtechnischen Anlagen aus EnReMem Phase 1 einzuordnen.

Die Erkenntnisse der einzelnen Versuchsreihen werden in den anschließenden Unterkapiteln übergreifend im Hinblick auf die hier identifizierten Fragestellungen diskutiert. Die daraus resultierenden Ergebnisse fließen in die Anpassung der Modellanlagen in Kapitel 6 ein.

5.1 Reinigungsleistung im MBR

In Tabelle 5.1 sind die Ablaufwerte aus den einzelnen Versuchsreihen gegenüberstellt. Wie aus der Tabelle entnommen werden kann, lag keine Verschlechterung der Reinigungsleistung im Betrieb mit 15 d Schlammalter vor. Die Versuchsstraße konnte durchgängig gleichwertige oder leicht bessere Ablaufwerte im Vergleich zur Referenzstraße erreichen. Dies wird vor allem in Versuchsreihe 4 für die Ablaufwerte von $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_2\text{-N}$ deutlich. Der niedrige Ablaufwert für $\text{NO}_3\text{-N}$ in der Referenzstraße im Vergleich zur Versuchsstraße ist z. T. auf eine nicht ausreichende Nitrifikation zurückzuführen (Kapitel 4.6.1). Es bleibt somit abschließend festzustellen, dass der Betrieb mit VK und gesenktem Schlammalter, und dabei auch gesenktem TR_{BB} , keine negativen Auswirkungen auf die untersuchten Standardparameter im Ablauf eines MBR erwarten lässt.

Tabelle 5.1: Zusammenstellung der Ablaufwerte (Mediane) und erreichten Eliminationen in allen Versuchsreihen für Referenz- und Versuchsstraße

Versuchsreihe	Parameter	Referenzstraße		Versuchsstraße	
		Ablauf	Reduktion	Ablauf	Reduktion
		<i>mg/l</i>	%	<i>mg/l</i>	%
1	CSB	36,20	94,5	34,70	95,1
	BSB ₅	4,00	98,1	4,00	98,6
	NH ₄ -N	0,08	99,9	0,09	99,8
	NO ₃ -N	9,45		10,30	
	NO ₂ -N	0,11		0,12	
2	CSB	30,40	96,2	28,85	96,4
	BSB ₅	3,00	99,1	3,00	99,1
	NH ₄ -N	0,05	99,9	0,03	99,9
	NO ₃ -N	11,70		10,90	
	NO ₂ -N	0,09		0,09	
3	CSB	36,90	94,5	35,70	94,4
	BSB ₅	3,00	98,8	3,00	99,0
	NH ₄ -N	0,03	99,9	0,04	99,9
	NO ₃ -N	10,25		12,50	
	NO ₂ -N	0,03		0,05	
4	CSB	30,45	95,8	32,60	95,9
	BSB ₅	3,00	98,9	3,00	98,9
	NH ₄ -N	0,48	98,8	0,05	99,8
	NO ₃ -N	4,20		11,44	
	NO ₂ -N	0,37		0,20	

5.2 Filtrationsleistung im MBR

5.2.1 Diskussion der Versuchsergebnisse

Es konnte im Projekt gezeigt werden, dass das Vorschalten einer Vorklärung vor den MBR bei unverändertem Schlammalter keine signifikante Veränderung der Filtrationsleistung mit sich bringt. In Versuchsreihe 1 wurde für den Transmembrandruck in der Referenzstraße ohne Vorklärung und den TMP in der Versuchsstraße ein ähnlicher Anstieg über die Zeit beobachtet. In Versuchsreihe 3 lag die Versuchsstraße über den gesamten Zeitraum ohne Zwischenreinigung bei einem niedrigeren TMP als die Referenzstraße, welche gereinigt werden musste. Der Betrieb eines MBR mit Vorklärung und einem Schlammalter von 25 Tagen ist also aus den Versuchsergebnissen als sicher einzustufen.

Wie bereits in den einzelnen Ergebniskapiteln angesprochen wurde, trat beim Betrieb des MBR mit gesenktem Schlammalter von 15 Tagen (Versuchsreihen 2 und 4 der Versuchs-

straße) verstärkt Fouling auf. In Versuchsreihe 4 wurde dieses Fouling näher analysiert und konnte mit einer erhöhten EPS-Bildung in Verbindung gebracht werden. Es ist anzunehmen, dass eine ähnliche EPS-Bildung in Versuchsreihe 2 auftrat. Der Umstand, dass beide Versuchsreihen im Winter lagen (2013 auf 2014 und 2014 auf 2015) spielt für die insgesamt hohen EPS-Konzentrationen eine erhebliche Rolle, da der EPS-Gehalt bei sinkender Temperatur zunimmt (WANG ET AL., 2010). Der beobachtete zusätzliche Anstieg des EPS-Gehaltes in der Versuchsstraße ist dadurch jedoch nicht ausreichend zu erklären, da die Temperatur keinen vergleichbar starken Einfluss auf die EPS-Bildung in der Referenzstraße ausübte. Aus der geänderten Biozönose im Belebungsbecken bei abgesenktem Schlammalter und niedrigen Temperaturen scheint eine erhöhte EPS-Bildung zu resultieren (vgl. auch MELIN ET AL., 2007). In Versuchsreihe 4 konnte gezeigt werden, dass Fouling bei abgesenktem Schlammalter auch bei höherem TR im MBR auftritt. Somit ist der TR als Steuergröße für die Vermeidung von Membranfouling ungeeignet.

Wie Kapitel 5.3 und 6 aufzeigen werden, ist bei der Installation einer Vorklärung die untersuchte Verfahrensvariante mit $t_{TS} = 15$ Tage, unter Vorbehalt einer verbesserten Foulingkontrolle, im Vergleich zur Variante mit $t_{TS} = 25$ Tagen aufgrund des gesteigerten Gasertrags aus ÜSS energetisch sinnvoller. Nachfolgend werden aus diesem Grund Vorschläge für Kompensationsmöglichkeiten des Membranfoulings im Betrieb aufgezeigt. Diese konnten aufgrund der Ausrichtung dieses Forschungsprojekts auf die Gewinnung verlässlicher Daten zum Gasertrag und der dazu benötigten nahezu konstanten Bedingungen innerhalb der Versuchsreihen nicht umgesetzt und somit nicht überprüft und bewertet werden.

5.2.2 Kompensationsmöglichkeiten

5.2.2.1 Anpassung der Betriebsweise auf Temperaturschwankungen im Jahresgang

Bei geringen Abwassertemperaturen negiert die verstärkte EPS-Bildung die positiven Effekte der erhöhten Faulgasproduktion bei niedrigem Schlammalter, da das auftretende Membranfouling hohe Betriebs- und Ersatzkosten mit sich zieht. Somit wäre eine Einstellung des Schlammalters auf jahreszeitliche Schwankungen der Abwassertemperatur vorzuschlagen, um die EPS-Bildung im Winter auf ein betriebssicheres Maß zu verringern. Da bei den in EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) beschriebenen großtechnischen MBR eine Überdimensionierung der biologischen Stufe im Falle einer Fahrweise mit anaerober Schlammstabilisierung vorliegt (siehe Kapitel 5.4), ist für eine saisonale Anpassung des ÜSS-Abzuges hier genügend Kapazität vorhanden. Der notwendige ÜSS-Abzug der MBR könnte mithilfe dynamischer

Belebtschlamm-Modelle simuliert werden. Die Anpassung sollte zur Kontrolle der kritischen Betriebsparameter zunächst mit einem eng gestaffelten Analyseprogramm begleitet werden. Die Ergebnisse aus dem Projekt (vor allem Versuchsstraße in Reihe 3) lassen erwarten, dass im Falle des Umbaus der bestehenden großtechnischen Anlagen der Wärmebedarf der Faulbehälter im Winter zu jeder Zeit gedeckt werden kann.

Eine andere Möglichkeit der Anpassung an die temperaturabhängige EPS-Bildung stellt eine Absenkung des Flusses im Winter dar. Dabei erhöht sich zwangsläufig die benötigte Membranfläche und dementsprechend die benötigte Belüftungsenergie.

Eine Kombination aus reduziertem Fluss bei erhöhtem Schlammalter könnte die Vorteile beider Kompensationsmöglichkeiten kombinieren und gleichzeitig die negativen Effekte in Form höherer Investitions- und Energiekosten senken. Die Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen saisonalen Betriebsweisen muss im Einzelfall geprüft werden.

5.2.2.2 Simultanfällung von Phosphaten

Innerhalb des Versuchsbetriebes wurde keine Phosphat-Fällung durchgeführt. Verschiedene Quellen geben für den Fall einer Simultanfällung an, dass die im Wasser vorliegenden gelösten EPS ausgefällt und über den Überschussschlamm aus dem Belebungsbecken abgezogen werden. Die durch die Vergrößerung der Schlammflocken bei Zugabe von Fällmitteln auf den Membranen gebildete Deckschicht ist trotz ihrer größeren Dicke weniger kompressibel und dadurch durchlässiger. Mit Fällmitteln auf Eisenbasis wurden dabei leicht bessere Ergebnisse als mit Aluminiumoxiden erzielt. (AHN ET AL., 2006; DONG ET AL., 2007; MISHIMA UND NAKAJIMA, 2009)

Es ist also zu erwarten, dass bei einer großtechnischen Umsetzung des Verfahrens aufgrund der vorhandenen Phosphat-Fällung bessere Filtrationsbedingungen vorliegen, als dies in den halbtechnischen Versuchen der Fall war.

5.2.2.3 Dosierung von Pulveraktivkohle in das Belebungsbecken

Die Zugabe von Pulveraktivkohle (PAK) direkt in die Belebungsbecken wurde in den letzten Jahren vermehrt unter dem Gesichtspunkt der Spurenstoffelimination diskutiert. Dabei gibt es neben dem Ansatz der Dosierung in ein konventionelles Belebungsbecken mit Abtrennung in der Nachklärung und ggf. im Filter (siehe z. B. METZGER, 2010; THOMANN, 2013; ZWICKENPFLUG UND BÖHLER, 2010) auch die Möglichkeit der Dosierung in einen MBR, wie diese auch großtechnisch im durch das MKULNV geförderten Projekt MIKROMEM (PINNEKAMP ET AL., 2012) untersucht wurde. In der ersten Projektphase dieses Projektes konnte dabei eine Verbesserung der Filtrierbarkeit (anhand des TMP) bei PAK-Dosierung festgestellt werden. Auch in anderen Untersuchungen wurde eine

deutliche zeitliche Verzögerung des TMP-Anstiegs bei PAK-Dosierung festgestellt (vgl. Bild 5.1).

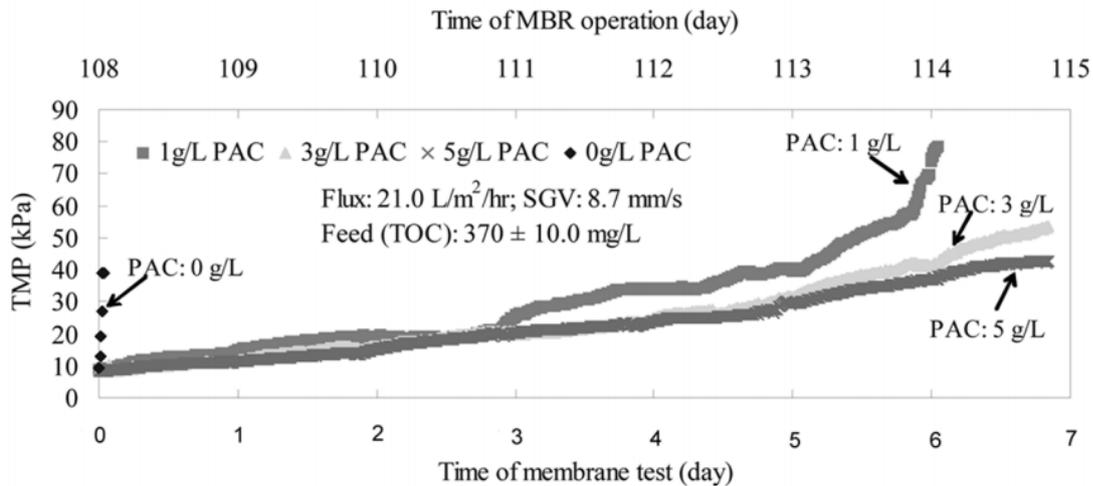


Bild 5.1: Verbesserung des Transmembrandrucks in einem MBR im Labormaßstab bei unterschiedlichen PAK-Dosierungen (vgl. NG ET AL., 2010)

Die von NG ET AL. (2010) untersuchte PAK-Konzentration von 1 g PAK/l belebtem Schlamm entspricht einer Dosierkonzentration von 30 mg PAK/l im Zufluss der MBR Straßen der HtK Neuss und ist auch für die Spurenstoffelimination interessant. Die kumulierten Vorteile der guten Ablaufqualität und Desinfektion im MBR und der Spurenstoffelimination durch die PAK könnten noch durch die gleichzeitige Reduktion des Foulings gesteigert werden. So könnte das Verfahren PAK-MBR von den Investitionskosten konkurrenzfähig zum konventionellen Belebtschlammverfahren mit nachgeschalteter Adsorptionsstufe werden. Kommen zusätzlich die Energieeinsparungen durch die Schlammfäulung hinzu, kann das Verfahren eventuell auch bei den Betriebskosten konkurrieren. Weitere Vorteile ergeben sich durch den aufgrund der enthaltenen Kohle verbesserten Heizwert des Klärschlammes, die sukzessive Verbesserung des ISV des belebten Schlammes im MBR (ZWICKENPFLUG ET AL., 2010) und eine verbesserte Entwässerbarkeit des Faulschlammes (ROTT ET AL., 2009; WERNING, 1994). Zudem stellte WERNING (1994) eine Intensivierung des organischen Stoffumsatzes und eine erhöhte Faulgasproduktion bei Verwendung von PAK als Trägermaterial zur Biomasseanreicherung im Faulbehälter fest. Effektive und wirtschaftliche Dosiermengen wurden hier zu 2 bis 3 g PAK/l Rohschlamm bei einem Trockenrückstand zwischen 4 und 5 % angegeben.

5.3 Spezifischer Gasertrag und Vergleich der Methangehalte während der Versuchsreihen

5.3.1 Bestimmung der Faulgasproduktion bei kompletter Faulung des anfallenden Schlammes

In den einzelnen Versuchsreihen konnte aufgrund der limitierten Faulraumkapazität nur ein repräsentativer Teil des anfallenden Primär- und Überschussschlammes gefault werden. Dies war unwesentlich in den Versuchsreihen 1 und 2, in welchen lediglich der Überschussschlamm gefault wurde und somit die mögliche Faulgasproduktion hochgerechnet werden konnte. Bei gemeinsamer Faulung von PS und ÜSS für die Versuchsstraße in den Versuchsreihen 3 und 4 hat das Massenstromverhältnis zwischen beiden Stoffströmen einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Faulung.

5.3.1.1 Alleinige Faulung des Überschussschlammes

Die gesamte Faulgasproduktion der Versuchsreihen 1 und 2 errechnet sich aus der gemessenen, massenspezifischen Faulgasproduktion und dem insgesamt anfallenden organischen ÜSS-Massenstrom aus dem MBR. Die Ausgangsdaten können den Kapiteln 4.3.3 und 4.4.3 entnommen werden. Tabelle 5.2 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse.

Tabelle 5.2: Übersicht der spezifischen und täglichen Gasproduktion in Versuchsreihe 1 und 2

Membranstraße/ Versuchseinstellung	spezifische Gasproduktion ÜSS		Massenstrom ÜSS		Einwohner -werte <i>E</i>	tägliche Gas- produktion <i>I/d</i>	
	<i>I/kg oTR,zu</i>	<i>I/(E·d)</i>	<i>g TR/d</i>	<i>g oTR/d</i>			
Referenzstraße, Reihe 1 und 2	290 - 310	12 - 14	1.620 - 2.165	1.154 - 1.568	29 - 36	333 - 487	
Versuchs- straße	Reihe 1	264	6,8	1.078	756	29	199
	Reihe 2	307	7,5	1.354	899	37	276

Der ÜSS-Massenstrom in der Referenzstraße in beiden Versuchsreihen unterlag starken Schwankungen (1.154 – 1.568 g oTR/d). Auch bei sehr ähnlicher massenspezifischer Gasproduktion ergeben sich daraus stark unterschiedliche tägliche Gasproduktionen. Zum Teil lässt sich der Unterschied über die angestiegene Frachtbelastung der Versuchsanlage erklären (analog auch in der Versuchsstraße). Saisonale Schwankungen in Abwasserzusammensetzung und Temperatur sind im Versuchsbetrieb nicht vermeidbar.

Durch den Anstieg der spezifischen Gasproduktion nach Absenkung des Schlammalters in der Versuchsstraße in Versuchsreihe 2 ist eine erhöhte tägliche Gasproduktion erreichbar. Dieser Effekt wird durch die zunehmende ÜSS-Produktion bei sinkendem Schlammalter zusätzlich verstärkt. Da allerdings ein Großteil der verfügbaren, leicht abbaubaren Trockenmasse in der Vorklärung abgetrennt wurde, liegen die insgesamt erreichbaren Gasvolumina je Tag dennoch stark hinter der Referenzstraße zurück. Die

Ergebnisse der Referenzstraße liegen im Bereich von 275 – 320 l/kg oTR, zu, welcher in MURL (1999) für Überschussschlamm ohne Vorklä rung und bei einem Schlammalter von 25 Tagen angegeben ist.

5.3.1.2 Anteil des Primärschlammes am Faulgasertrag bei gemeinsamer Faulung von Primär- und Überschussschlamm

Der Anteil des PS an der täglichen Gasproduktion des Mischschlammes wurde rechnerisch aus den Versuchsergebnissen bestimmt, um Hochrechnungen des Gasertrags für eine Mischung von PS und ÜSS in den Versuchsreihen 1 und 2 zu erlauben (siehe Kapitel 5.3.1.3). Zudem fließen die Werte für PS und ÜSS getrennt als Eingangswert in die Modellbetrachtung ein (siehe Kapitel 6). Für die Versuchsreihen 3 und 4 wurde dazu das oTR-Massenverhältnis zwischen dem insgesamt dem Faulbehälter zugegebenen PS und ÜSS errechnet (siehe Kapitel 4.5.3 und 4.6.3) Danach wurde für die zugeführte organische Trockenmasse aus dem ÜSS die Gasproduktion ermittelt. Die spezifischen Gasproduktionen des ÜSS der Versuchsstraße aus den Versuchsreihen 1 und 2 dienen als Referenzwerte für den ÜSS der Versuchsreihen 3 und 4. Aus der Differenz zwischen der gesamten Gasproduktion und der aufgrund des ÜSS entstandenen Gasproduktion wurde die tägliche und die massenspezifische Gasproduktion aus dem PS errechnet. Eine direkte Verwendung der in den Faulversuchen ermittelten spezifischen Gasproduktionen auf den Gesamtmassenstrom an ÜSS und PS, welcher während der Versuche abgezogen wurde, war nicht möglich, da das Verhältnis von ÜSS/PS im Input der Faulung vom Verhältnis ÜSS/PS des Gesamtmassenstromes abwich (siehe Kapitel 4.2.4). Wie Tabelle 4.4 zeigt, ist der Unterschied in Versuchsreihe 4 gering, während in Versuchsreihe 3 eine größere Abweichung vorlag. Zur Übersicht sind in Tabelle 5.3 die Werte der massenspezifischen Gasproduktion für die Teilströme ÜSS und PS sowie die Versuchsergebnisse für die gemeinsame Faulung aus den Versuchen aufgetragen.

Tabelle 5.3: Massenspezifische Gasproduktion für ÜSS, PS und gemeinsame Faulung in den Versuchsreihen 1 bis 4

Membranstraße/ Versuchseinstellung		massenspezifische Gasproduktion		
		Überschussschlamm	Primärschlamm	Gesamt
		<i>l/kg oTR,zu</i>	<i>l/kg oTR,zu</i>	<i>l/kg oTR,zu</i>
Referenzstraße (Reihe 1 – 4)		290 - 330	-	290 - 330
Versuchsstraße	Reihe 1	264	-	264
	Reihe 2	310	-	310
	Reihe 3	264	599,6	394
	Reihe 4	310	599,6	405

5.3.1.3 Berechnung des täglichen und einwohnerspezifischen Gasertrags bei Faulung des insgesamt anfallenden Primär- und Überschussschlammes

Unter Verwendung der in den einzelnen Ergebniskapiteln zu den Versuchsreihen angegebenen Massenströme für ÜSS und PS (siehe auch Tabelle 4.4) ergeben sich die in Tabelle 5.4 dargestellten insgesamt zu erwartenden einwohnerspezifischen und täglichen Gasproduktionen, wenn genügend Faulraumkapazität zur Verfügung gestanden hätte. Hier sind ebenfalls Prognoserechnungen für eine gemeinsame Faulung von ÜSS und PS für die Versuchsreihen 1 bis 2 angegeben (mit * gekennzeichnet), in welchen für die massenspezifische Gasproduktion des PS der Wert von 599,6 $l_{\text{Gas}}/kg \text{ oTR},zu$ aus Versuchsreihe 3 und 4 angenommen wurde.

Tabelle 5.4: Einwohnerspezifische und tägliche Gasproduktion der Versuchsreihen mit Prognosewerten für die Reihen 1 und 2

Straße		EW	einwohnerspezifische Gasproduktion			tägliche Gasproduktion		
			ÜS	PS	Mischung	ÜS	PS	Mischung
		<i>E</i>	<i>l/(E·d)</i>	<i>l/(E·d)</i>	<i>l/(E·d)</i>	<i>l/d</i>	<i>l/d</i>	<i>l/d</i>
Referenzstraße (Reihe 1 – 4)		29 – 36	12 - 13	-	12 - 13	309 - 573	-	309 - 573
Versuchs- straße	Reihe 1	29	6 - 7	12,1*	18 - 19*	199	354*	553*
	Reihe 2	37	7 - 8	12,4*	19 - 20*	276	453*	729*
	Reihe 3	38	6	11 - 12	17 - 18	211	457	669
	Reihe 4	66	10 - 11	10 - 11	20 - 21	691	675	1366

*: Prognosewerte anhand der errechneten massenspezifischen Gasproduktion des PS aus VR 3 und 4

Es wird deutlich, dass der errechnete Anteil des PS an der einwohnerspezifischen Gasproduktion aufgrund des Versuchsbetriebes Schwankungen von 10 -12,4 $l/(E·d)$

unterlag. Die prognostizierte einwohnespezifische Gasproduktion, die durch Mitfaulung des PS ($599,6 I_{\text{Gas}}/\text{kg oTR, zu}$) in den Versuchsreihen 1 und 2 für die Versuchsstraße entstanden wäre, liegt dabei für beide Versuchsreihen in einem sehr ähnlichen Bereich. Dies erklärt sich durch den erfolgten gleichen Betrieb der Vorklä rung in diesen Versuchsreihen. Es ist davon auszugehen, dass die Veränderungen im PS-Abzug ab Versuchsreihe 3 keine starken Auswirkungen auf den Grad der aeroben Stabilisierung im MBR hatten. Bei Zugrundelegung der spezifischen Gasproduktionen für den ÜSS aus den Versuchsreihen 1 und 2 zu ihren jeweils korrespondierenden Versuchsreihen 3 und 4 lassen sich aus dem Mischungsverhältnis von PS/ÜSS jeweils Werte von ca. $600 I_{\text{Gas}}/\text{kg oTR, zu}$ für den PS bestimmen (Tabelle 5.3). Somit ist die ÜSS-Qualität im Hinblick auf den möglichen spezifischen Faulgasertrag von Versuchsreihe 1 und 3, sowie von Versuchsreihe 2 und 4 jeweils vergleichbar.

Für die Auslegung der großtechnischen Modellanlagen in Kapitel 6 finden die massenspezifischen Gasproduktionen für ÜSS und PS aus Tabelle 5.3 Verwendung. Die angefallenen ÜSS- und PS-Massenströme der Versuchsanlage dienen als qualitative Orientierungswerte. Sie werden für die Modellanlagen rechnerisch aus den etablierten Bemessungsverfahren bestimmt.

5.3.2 Auswertung der Methangehalte und Bestimmung des mittleren Heizwertes

Die Veränderungen in der Betriebsweise des MBR und der Faulung resultierten in leichten Veränderungen in der Faulgaszusammensetzung. Dies geht aus Tabelle 5.5 hervor. In der Referenzstraße wurde durchgängig ein mittlerer Anteil von 62,1 – 62,5 Vol.-% CH_4 im Faulgas gemessen. Die Schwankungen lagen zwischen 56,9 und 71,8 Vol.-% CH_4 . In der Versuchsstraße sind ähnliche mittlere Werte von 62,7 – 64 % gemessen worden, in einem Wertebereich von 57,7 – 72,1 %.

Tabelle 5.5: Prozentuale Volumenanteile an CH_4 und CO_2 im Faulgas aller Versuchsreihen

Straße		Versuchsreihe 1		Versuchsreihe 2		Versuchsreihe 3		Versuchsreihe 4	
		%- CH_4	%- CO_2						
Referenz- straße	Min	59,4	25,6	58,7	28,4	57,8	25,4	56,9	24,4
	Mittel	62,5	28,4	62,3	31,4	62,1	28,8	62,1	27,9
	Max	69,5	32,4	66,5	34,7	71,8	32,6	65,6	33,1
Versuchs- straße	Min	58,1	23,7	58,5	21,3	59,0	27,5	57,7	24,0
	Mittel	62,7	27,7	62,9	27,2	64,0	31,3	63,2	29,8
	Max	66,3	31,9	68,7	32,8	72,1	36,5	67,9	33,7

Aufgrund der Messungenauigkeiten (siehe Kapitel 4.2.5) liegen die mittleren CH_4 -Anteile im real anfallenden Faulgas vermutlich leicht höher, während der Volumenstrom etwas

niedriger sein wird. Da der Fehler nicht mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden kann, wird für die Berechnung der Modellanlage der in EnReMem Phase 1 angenommene Heizwert von $H_U = 6,4 \text{ kWh/Nm}^3$ für das Faulgas verwendet. Dies entspräche einem mittleren CH_4 -Anteil von 64 Vol.-% bei Berücksichtigung des Heizwert von Methan, welcher sich bei Normbedingungen (25 °C; 1,013 bar) zu $9,968 \text{ kWh/Nm}^3$ ergibt (BRANDT, 1999). Dies liegt nahe den Werten aus der Versuchsstraße von im Mittel 62,7 - 64 Vol.-%.

5.4 Vergleich zu großtechnischen MBR

In EnReMem Phase 1 wurden mehrere großtechnische MBR hinsichtlich des potentiellen Gasertrages aus Überschussschlamm vergleichsweise betrachtet. Dabei stellte sich heraus, dass das mittlere Schlammalter oberhalb von 40 Tagen lag (Tabelle 5.6). Das Ausgangsschlammalter ist in EnReMem Phase 2 mit 25 Tagen bereits niedrig.

Tabelle 5.6: Vergleich von TR und t_{TS} der Versuchsreihen mit den in EnReMem Phase 1 betrachteten großtechnischen MBR

Kläranlage/ Versuchsreihe	Ohne VK		Mit VK	
	t_{TS}	TR_{MBR}	t_{TS}	TR_{MBR}
	d	g/l	d	g/l
Seelscheid			114 - 160	12,8 - 13,8
Eitorf			41 (konventionell) MBR höher	?
Konzen	55	10,3		
Versuchsreihe 1	25	10,1	25	6,7
Versuchsreihe 2	25	13,5	15	4,9
Versuchsreihe 3	25	9,5	25	7,2
Versuchsreihe 4	25	13,6	15	10,7

Somit ist davon auszugehen, dass im Vergleich zu diesen großtechnischen Anlagen die in EnReMem Phase 2 ermittelte Überschussschlammproduktion höher war und der Stabilisierungsgrad des ÜSS geringer. Die drei großtechnischen MBR sind für eine Betriebsweise mit anaerober Schlammstabilisierung überdimensioniert. Die benötigten Beckenvolumina für rezirkulierten Schlamm fallen bei Absenkung des Schlammalters deutlich geringer aus. Somit ist ein Betrieb nach den untersuchten Varianten mit einer Volumenreduktion der biologischen Stufe verbunden, welche Kosteneinsparungen aufgrund des geringeren Verbrauchs an Belüftungsenergie ermöglicht. Einen guten Überblick über die Möglichkeiten der energetischen Optimierung des Verbrauchs von MBR liefern KREBBER (2014) und PINNEKAMP (2011A).

6 Modellbetrachtung

Im Abschlussbericht „Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen“ (EnReMem) Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) wurde anhand von zwei aus Literaturwerten errechneten Modellanlagen unterschiedlicher Größe eine Energie- und Kostenbetrachtung für die Auslegung von Vorklärung und Faulung bei Membranbelebungsanlagen durchgeführt. Der Aufbau der Modellanlagen kann diesem vorangegangenen Bericht entnommen und nachvollzogen werden und ist nicht Bestandteil dieses Berichts. In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt die Anpassung der Modellanlagen anhand der Erkenntnisse aus den in den vorherigen Kapiteln beschriebenen halbtechnischen Versuchen auf der HtK Neuss des LANUV NRW. Wie auch in Phase 1 wurde die Modellanlage anhand der Arbeitsblätter ATV-DVWK-A 198 und ATV-DVWK-A 131 bemessen. Die einwohner-spezifischen Frachten wurden als 85-Perzentil-Werte zu Grunde gelegt. Die spezifischen Gaserträge aus den Versuchsreihen flossen hingegen jeweils als Mittelwerte ein, da sie entgegen der Frachten im Zulauf der Kläranlage nicht von deren momentaner Auslastung, sondern von der Zusammensetzung des Rohschlammes abhängig sind, welche durch die lange Aufenthaltszeit im Faulbehälter vergleichmäßig wird. Basierend auf diesen Angaben ergeben sich alle weiteren Werte der Berechnung.

6.1 Anpassung der Modellanlagen

Die im Abschlussbericht zu Phase 1 getroffenen Annahmen bezüglich des Gasertrags aus den Schlämmen der Membranbiologie wurden in Anlehnung an Literaturwerte zugrunde gelegt. Durch die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen halbtechnischen Versuche auf der HtK Neuss wurden innerhalb der vier dargestellten Versuchsreihen Messwerte ermittelt, die eine aktualisierte Berechnung der Energie- und Kostenwerte durch die Modellanlagen ermöglichen. Die gemessenen Werte aus den vier vorliegenden Versuchsreihen mit unterschiedlichen Versuchsgrundlagen wurden in die Berechnungstabellen der Modellanlagen eingepflegt, ausgewertet und beurteilt.

Ziel der Anpassung der Modellanlage ist es, eine Aussage darüber treffen zu können, inwiefern sich die Schlammzusammensetzung und das Schlammalter auf den zu erwartenden Gasertrag und die damit einhergehende Energieerzeugung auswirken. Anhand dieser Auswertung können Rückschlüsse darüber gezogen werden, ob bzw. wie schnell der Bau einer MBR-Anlage mit Vorklärung und Faulung amortisiert ist.

Es werden, wie schon in Phase 1, zwei Modellanlagen unterschiedlicher Größe betrachtet. Für die Begründung der ausgewählten KA-Größen wird auf PINNEKAMP (2011B) verwiesen.

- Modellanlage 1: 14.000 angeschlossene Einwohner (Ausbaugröße 20.000 E)
- Modellanlage 2: 100.000 angeschlossene Einwohner (Ausbaugröße 130.000 E)

Die wesentlichen Unterschiede der vier Versuchsreihen wurden in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich erläutert, daher erfolgt an dieser Stelle für die Versuchsreihen nur eine kurze Zusammenfassung:

- Versuchsreihe 1: anaerobe Schlammstabilisierung von Überschussschlamm, Schlammalter im MBR : $t_{TS} = 25$ Tage (VR1)
- Versuchsreihe 2: anaerobe Schlammstabilisierung von Überschussschlamm, Schlammalter im MBR : $t_{TS} = 15$ Tage (VR2)
- Versuchsreihe 3: anaerobe Schlammstabilisierung von Überschussschlamm und Primärschlamm, Schlammalter im MBR : $t_{TS} = 25$ Tage (VR3)
- Versuchsreihe 4: anaerobe Schlammstabilisierung von Überschussschlamm und Primärschlamm, Schlammalter im MBR : $t_{TS} = 15$ Tage (VR4)

Parallel zu den vier vorgenannten Versuchsreihen wurde während der gesamten Versuchsdauer eine Referenzstraße betrachtet. Diese wurde mit einem Schlammalter von 25 Tagen und ohne Vorklärung betrieben. Der Überschussschlamm dieser Referenzstraße wird anaerob stabilisiert. Die Ergebnisse werden in Kapitel 6.2 den Ergebnissen der Versuchsreihen 1-4 gegenübergestellt. Den direkten Vergleich bietet die Referenzstraße aufgrund der gleichen Versuchsbedingungen zu Versuchsreihe 1 (VR1).

Zur Berechnung der anfallenden Gasmenge in der hier vorliegenden Anpassung der Modellbetrachtung wird die gemessene spezifische Gasproduktion für Primärschlamm und Überschussschlamm aus den Versuchsreihen verwendet. Die Frachten an Trockensubstanz hingegen werden analog zu EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) aus Literaturwerten ermittelt, da die angefallenen Mengen von Primärschlamm den Versuchsstraßen aufgrund der zu niedrigen Abtrennung in der Vorklärung nach Auswertung der Versuchsergebnisse aus Kapitel 4.2.3 als nicht repräsentativ zu beurteilen sind.

In nachfolgender Tabelle 6.1 sind die aus den Versuchsreihen eingeflossenen Parameter in die Berechnung zum Gasertrag beispielhaft für die Versuchsreihe 4 (VR4) - farblich „grün“ markiert - dargestellt.

Die ermittelte Gasproduktion (Q_{Gas}) hat einen direkten Einfluss auf die Energieerzeugung durch das Blockheizkraftwerk (BHKW). Dies ist aber nicht der einzige Parameter, der die Ergebnisse der Versuchsreihen beeinflusst.

Da sich durch die angepassten Parameter bspw. des Glühverlustes (GV) von Primär- und Überschussschlamm auch die anfallende Rohschlammmenge (m_{TS}) ändert, betrifft diese

Änderung weiterhin auch den Energieverbrauch der Faulung. Im Rahmen der Modellberechnungen (Anhang A) wurde dieser Aspekt berücksichtigt.

Tabelle 6.1: Beispielhafte Berechnung des Gasertrags anhand der Versuchswerte für Modellanlage 100.000 E, 15 Tage Schlammalter im MBR (Versuchsreihe 4)

		Anschluss
Einwohnerwerte		100.000 [E]
Faulbehältervolumen	V_F	4.300 [m ³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t_{bem}	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t_{mittel}	27 [d]
<u>Gasanfall</u>		
<u>Primärschlamm aus Vorklärung</u>		
TS Anfall Primärschlamm	TS_{PS}	32,0 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	TS_{PS}	3.200 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Primärschlamm	TS_{PS}	0,7 [%]
Glühverlust	GV_{PS}	76,0 [%]
Fracht oTR	oTR_{PS}	2.430,8 [kg _{oTR} /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	t_R	1,0 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
spezifische Gasproduktion PS	$Gas_{,PS}$	599,6 [l/kg_{oTR}]
<u>Schlamm aus BB / MBR</u>		
Schlammanfall		4,6 [l/(E·d)]
TS Anfall ÜSS	$TS_{ÜSS}$	37 [g/(E·d)]
Fracht TS ÜSS	$TS_{ÜSS}$	3.749 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	1,1 [%]
Glühverlust	$GV_{ÜSS}$	75,2 [%]
Fracht oTR	$oTR_{ÜSS}$	2.820 [kg _{oTR} /d]
spezifische Gasproduktion ÜS	$Gas_{,ÜS}$	315,2 [l/kg_{oTR}]
<u>Rohschlamm gemischt und statisch eingedickt</u>		
Fracht TS RS	TS_{RS}	6.949 [kg _{TS} /d]
Fracht oTR RS	oTR_{RS}	5.251 [kg _{oTR} /d]
Rohschlammmenge	m_{TS}	6,9 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	TS_{RS}	4 [%]
Rohschlammvolumenstrom	Q_{RS}	174 [m ³ /d]
Gasausbeute Richtwert	Gas	415 [l/kg _{oTR}]
Gasertrag gesamt	Q_{Gas}	2.346 [m ³ /d]

Aufgrund der Einflüsse aus den angepassten Parametern der Versuchsanlage wurden die Modellanlagen neu berechnet. Aufbauend auf den neu berechneten Modellanlagen konnten nun weitergehende Bewertungskriterien (Energiekosten, CO₂) ermittelt werden.

Die ausführlichen Berechnungen zu den Gaserträgen sowie der Energieerzeugung zu den Versuchsreihen 1 – 4 der Modellanlagen 14.000 E und 100.000 E befinden sich im Anhang A.

6.2 Energiebilanz

In den Modellbetrachtungen in EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) wurde verglichen, welche Auswirkungen die Implementierung einer Vorklärung und Faulung im Gegensatz zur Modellanlage gleicher Größe ohne Vorklärung/Faulung haben.

In EnReMem Phase 2 wird nun eine veränderte Ausgangssituation betrachtet. In den Versuchsreihen 1 und 2 wurde ausschließlich der Überschussschlamm aus den Membranbioreaktoren abgezogen und anaerob stabilisiert. Eine Vorklärung ist zwar vorhanden, jedoch wurde der Primärschlamm nach der Vorklärung aus dem System entnommen und nicht zur anaeroben Stabilisierung der Faulung zugeführt.

In den Versuchsreihen 3 und 4 wurde in den halbtechnischen Versuchen sowohl der anfallende Primärschlamm als auch der Überschussschlamm in der Faulung anaerob stabilisiert und die daraus anfallende Gasmenge gemessen.

Um die Ergebnisse der gewonnenen und verwertbaren Informationen aus den vier Versuchsreihen zu bewerten und in Beziehung zueinander zu setzen wurden diese in die Berechnungstabellen der Modellanlage EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) eingesetzt. Diese Berechnungstabellen für alle Versuchsreihen befinden sich im Anhang A.

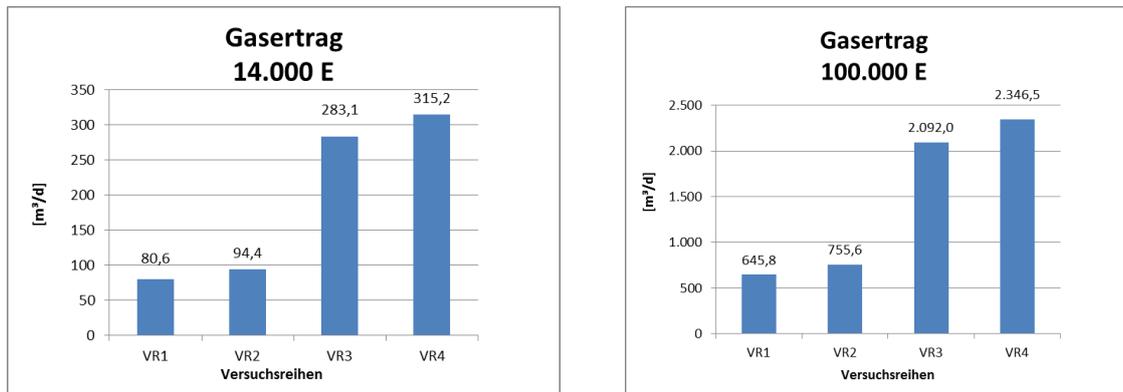
Die zusammengefassten Ergebnisse der Energiebilanz der verschiedenen Varianten werden nachfolgend dargestellt und diskutiert.

Als wesentliche Parameter der Modellbetrachtung werden Energiebedarf, Gasertrag und Energieerzeugung ausgewählt, sowie die daraus ermittelten Werte für den Anteil der Energieerzeugung am Energieverbrauch und Fremdbezug von Energie. Diese Werte werden in der Tabelle 6.2 anhand der in den Versuchsreihen unterschiedlichen Parametern Schlammzusammensetzung und -alter gegenübergestellt:

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Energiebilanz

			14.000 E		100.000 E	
			ÜS	ÜS+PS	ÜS	ÜS+PS
Versuchsreihe 1 ÜS, 25d	Energiebedarf	Wh/m ³	461,8		447,0	
	Gasproduktion	m ³ /d	80,6		645,8	
	Energieerzeugung	Wh/m ³	45,1		53,1	
	Anteil	%	10%		12%	
	Fremdbezug	Wh/m ³	416,7		393,8	
Versuchsreihe 2 ÜS, 15d	Energiebedarf	Wh/m ³	455,5		437,8	
	Gasproduktion	m ³ /d	94,4		755,6	
	Energieerzeugung	Wh/m ³	52,8		62,2	
	Anteil	%	12%		14%	
	Fremdbezug	Wh/m ³	402,7		375,7	
Versuchsreihe 3 ÜS+PS, 25d	Energiebedarf	Wh/m ³		467,5		453,0
	Gasproduktion	m ³ /d		283,1		2092,0
	Energieerzeugung	Wh/m ³		158,3		172,1
	Anteil	%		34%		38%
	Fremdbezug	Wh/m ³		309,2		280,82
Versuchsreihe 4 ÜS+PS, 15d	Energiebedarf	Wh/m ³		461,7		444,4
	Gasproduktion	m ³ /d		315,2		2346,5
	Energieerzeugung	Wh/m ³		176,3		193,1
	Anteil	%		38%		43%
	Fremdbezug	Wh/m ³		285,5		251,3

In Bild 6.1 findet sich nun zunächst die Auswertung der unterschiedlichen Gaserträge in Bezug auf die Versuchsreihen VR1-VR4, getrennt nach Modellanlagengrößen dargestellt.

**Bild 6.1: Gaserträge für alle Versuchsreihen beider Modellanlagen**

In der Modellanlage 14.000 E werden in den Versuchsreihen 1 und 2 zwei Gaserträge von 80,6 m³/d und 94,4 m³/d ermittelt. In den Versuchsreihen 3 und 4 werden 283,1 m³/d und 315,2 m³/d erreicht.

Ein proportional analoges Bild zeigt sich für die Modellanlage 100.000 E. Versuchsreihe 1 und 2 ergeben 645,8 m³/d und 755,6 m³/d. In Versuchsreihe 3 und 4 werden Gasmengen von 2.092 m³/d und 2.346,5 m³/d errechnet.

Aus den vorgenannten Gaserträgen ergibt sich für die Modellanlage 14.000 E aus der Modellbetrachtung gemäß der Versuchsreihen 1 und 2 eine Energieerzeugung von 45,1 Wh/m³ bzw. 52,8 Wh/m³. Dies entspricht einem Eigenanteil der Energieerzeugung am Gesamtenergiebedarf von ca. 10 bzw. 12 %.

In der Modellanlage 100.000 E ergeben sich aus den Ergebnissen der Versuchsreihen 1 und 2 ca. 53,1 Wh/m³ bzw. 62,2 Wh/m³. Dies entspricht ebenfalls einem Eigenanteil der Energieerzeugung am Gesamtenergiebedarf von ca. 12 bzw. 14 %.

Durch Zugabe von Primärschlamm in der Faulung kann eine Energieerzeugung zwischen 158,2 Wh/m³ (14.000 E; VR3) und 193,1 Wh/m³ (100.000 E; VR4) erzielt werden. Dies entspricht einem Eigenanteil der Energieerzeugung am Gesamtenergieverbrauch von ca. 34 bzw. 43 %.

Insgesamt können unter den Versuchsbedingungen der vier Versuchsreihen in den Modellanlagen zwischen maximal 38 % (14.000 E) und 43 % (100.000 E) des Energiebedarfs durchs Eigenerzeugung gedeckt werden.

Analog zu der aufgestellten Arbeitsthese zeigt sich, dass auch die Faulung des reinen Überschussschlammes zur Deckung des Eigenenergiebedarfs beiträgt. Bilanziert man den Energiebedarf, der für die Faulung benötigt wird, bleibt dennoch ein Delta mit positiver Bilanz. Fault man zusätzlich den Primärschlamm, so erhöht sich das Delta aufgrund des hohen Anteils an leicht abbaubaren Substanzen im Primärschlamm.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Unterschiede aufgrund der Variation des Schlammalters in den einzelnen Versuchsreihen (VR1 zu VR2 und VR3 zu VR4) wesentlich geringer ausfallen, als der Einfluss der Schlammzusammensetzung (VR1 zu VR3 und VR2 zu VR4).

Der Anteil des Eigenversorgungsgrades durch die verschiedenen Schlammalter unterscheidet sich bei beiden Anlagengrößen nur geringfügig. Die Differenz für beide Modellanlagen liegt bei 1-2 % (VR1 und VR2). Vergleicht man jedoch bei gleichem Schlammalter den geänderten Eigenversorgungsgrad bei unterschiedlichen Schlammzusammensetzungen, so ergibt sich eine deutlich höhere Differenz für beide Anlagengrößen zu Gunsten der Primärschlammfäulung. Diese liegt zwischen 24 % bei Modellanlage 1 (VR1 und VR3) und 29 % bei Modellanlage 2 bei VR4 und VR2.

Der Unterschied basiert auf dem großen energetischen Einfluss des Primärschlammes, der den Gasertrag der Faulung im Vergleich zum reinen Überschussschlamm (VR1 und VR2) sichtbar steigert.

Referenzstraße

Die Referenzstraße wird während der vier Versuchsreihen mit dauerhaft gleichbleibenden Versuchsbedingungen gefahren. Das Schlammalter im MBR wird zu 25 Tagen gewählt. Eine Vorklärung und einhergehend ein Primärschlammabzug ist in der Referenzstraße nicht vorhanden. Der Überschussschlamm aus dem Membranbioreaktor wird in der Referenzstraße ebenfalls anaerob stabilisiert. Die gemessenen Werte werden in die aus

Phase 1 bestehenden Tabellen zur Gasmengenermittlung eingesetzt. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle 6.3 dargestellt.

Tabelle 6.3: Gas und Energiewerte der Referenzstraße

	Gasmenge m ³ /d	Energie Wh/m ³
14.000 E	106	59
100.000 E	755	62

Ein Vergleich der Referenzstraße lässt sich aufgrund der Versuchseinstellungen nur mit der Versuchsreihe 1 durchführen. Beide Straßen weisen ein Schlammalter von 25 Tagen und eine anaerobe Stabilisierung von ausschließlich Überschussschlamm auf.

Für die Modellanlage 14.000 E ergibt sich in VR1 eine geringere Gasproduktion von 87,5 m³/d als in der Referenzstraße mit 106 m³/d. Auch die Energieerzeugung fällt somit mit 48,9 Wh/m³ geringer aus als die der Referenzstraße mit 59 Wh/m³.

Für die Modellanlage 100.000 E ergibt sich nach VR1 eine Gasproduktion von 645,8 m³/d, der eine Produktion der Referenzstraße von 755 m³/d gegenübersteht. Die daraus resultierende Energieerzeugung beträgt für die Modellanlage 100.000 E ca. 53,1 Wh/m³, die Referenzstraße erreicht einen Ertrag von 62 Wh/m³.

Der Vergleich der Modellanlagen in Versuchsreihe 1 zur Referenzstraße zeigt, dass die Modellergebnisse durchweg unterhalb der Ergebnisse der Referenzstraße liegen. Eine mögliche Erklärung dafür ist die unterschiedliche Beschaffenheit des Überschussschlammes, da in der Referenzstraße Überschussschlamm anaerob stabilisiert wurde, ohne dass Primärschlamm in einer Vorklärung abgezogen wird, in den Versuchsreihe 1 hingegen wird reiner Überschussschlamm nach Primärschlammabzug aus der Vorklärung anaerob stabilisiert (siehe Erklärung in Kapitel 4.3.3).

Als Ergebnis der Energiebilanz lässt sich festhalten, dass erwartungsgemäß durch die gemeinsame Faulung von Überschuss- und Primärschlamm bei einem Schlammalter von 15 d die größte Menge an Energie erzeugt werden kann. Versuchsreihe 4 wird als energetisch günstigste Variante beurteilt.

Innerhalb der Versuchsreihen 2 und 4 ergab sich jedoch das Problem des Membranfouling, was die Frage aufwirft, ob diese Versuchsgrundlagen mit den Membraneigenschaften in der Realität so umsetzbar sind. Dies ist für zukünftige Planungen zu prüfen und gegebenenfalls durch großtechnische Versuchs- bzw. Referenzanlagen mit längerer Betriebserfahrung zu verifizieren.

6.3 CO₂-Bilanzen

Der aus dem Strombedarf auf der Kläranlage resultierende CO₂-Ausstoß kann mittels des CO₂-Ausstoßes des in Deutschland verwendeten Strommixes berechnet werden. In EnReMem Phase 1 wurden hierfür 0,575 kg CO₂/kWh [UMWELTBUNDESAMT, 2010] angesetzt. Neuere Zahlen ergeben für den reinen Strominlandsverbrauch anhand von Hochrechnungen für 2012 einen Wert von 0,601 kg CO₂/kWh [UMWELTBUNDESAMT, 2013]. Dieser Wert ist dem steigenden Anteil an fossilen Energieträgern in der deutschen Stromversorgung geschuldet. Für die Anpassung der Tabellen aus EnReMem Phase 1 wurde nachfolgend aufgrund der aktuellen Situation mit dem Wert von 0,601 kg CO₂/kWh gerechnet. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der CO₂-Emissionen wurde im Bericht zu Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) erläutert, so dass an dieser Stelle darauf verwiesen wird.

Zunächst ist in Tabelle 6.4 die IST-Situation des Berichts Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) bei aerober Stabilisierung ohne VK dargestellt.

Tabelle 6.4: Stromverbrauch und CO₂-Äquivalente bei aerober Stabilisierung

Verbraucher	14.000 E			100.000 E		
	Wh/m ³	kg CO ₂ /m ³	t CO ₂ /a	Wh/m ³	kg CO ₂ /m ³	t CO ₂ /a
Hebewerk	13,63	0,0082	10,8	13,63	0,0082	73,3
Rechen	0,80	0,0005	0,6	0,80	0,0005	4,3
Sandfang	7,84	0,0047	6,2	5,09	0,0031	27,4
Vorklärung						
Belüftung Crossflow	240,59	0,1446	190,3	240,57	0,1446	1.292,9
Rezipumpen intern	5,84	0,0035	4,6	5,84	0,0035	31,4
Rezipumpen Membran	11,68	0,0070	9,2	11,68	0,0070	62,8
Permeatpumpen	7,40	0,0044	5,9	7,40	0,0044	39,8
Belüftung BB	169,99	0,1022	134,4	160,86	0,0967	864,5
Rührwerk	12,67	0,0076	10,0	12,40	0,0075	66,6
Entwässerung	7,77	0,0047	6,1	8,16	0,0049	43,9
Infrastruktur	16,92	0,0102	13,4	17,78	0,0107	95,6
Gesamt	495,13	0,2976	391,6	484,21	0,2910	2.602,4

Die Daten wurden so aus EnReMem Phase 1 übernommen und wie oben beschrieben lediglich um den Faktor für den spezifischen CO₂-Ausstoß angepasst. Der Energiebedarf der 14.000 E und 100.000 E Modellanlagen muss vollständig über den Zukauf von elektrischem Strom abgedeckt werden.

Die Betrachtung der Energieverbräuche mit VK und $t_{TS} = 25$ Tage bei anaerober Stabilisierung des PS und ÜSS (entspricht VR3) zeigt eine Abnahme des spezifischen CO₂-Ausstoßes je m³ behandelten Abwassers (Tabelle 6.5).

Tabelle 6.5: Stromverbrauch und CO₂-Äquivalente bei anaerober Stabilisierung (PS+ÜS) mit VK und t_{TS} = 25 Tage (entspricht VR3)

Mit Vorklärung und t _{TS} = 25 Tage						
Verbraucher	14.000 E			100.000 E		
	Wh/m ³	kg CO ₂ /m ³	t CO ₂ /a	Wh/m ³	kg CO ₂ /m ³	t CO ₂ /a
Hebewerk	13,63	0,0082	10,8	13,63	0,0082	73,3
Rechen	0,80	0,0005	0,6	0,80	0,0005	4,3
Sandfang	7,84	0,0047	6,2	5,09	0,0031	27,4
Vorklärung	4,70	0,0028	3,7	4,70	0,0028	25,3
Belüftung Crossflow	240,57	0,1446	190,2	240,57	0,1446	1.292,9
Rezipumpen intern	5,84	0,0035	4,6	5,84	0,0035	31,4
Rezipumpen Membran	11,68	0,0070	9,2	11,68	0,0070	62,8
Permeatpumpen	7,40	0,0044	5,9	7,40	0,0044	39,8
Belüftung BB	120,71	0,0725	95,5	103,40	0,0621	555,7
Rührwerk	10,63	0,0064	8,4	12,25	0,0074	65,8
Voreindickung	6,76	0,0041	5,3	7,71	0,0046	41,4
Faulung	12,30	0,0074	9,7	13,47	0,0081	72,4
Entwässerung	7,77	0,0047	6,1	8,16	0,0049	43,9
Infrastruktur	16,92	0,0102	13,4	17,78	0,0107	95,6
Gesamt	467,54	0,2810	369,7	452,47	0,2719	2.431,8

So können für die 14.000 E Modellanlage 16,6 g CO₂/m³ gegenüber der IST-Situation (Tabelle 6.4) eingespart werden, was sich zu einer jährlichen Ersparnis von 21,9 t CO₂ summiert. Für die 100.000 E Anlage können bei einer Senkung des CO₂-Ausstoßes um 19,1 g CO₂/m³ insgesamt 170,5 t CO₂/a eingespart werden. Die Einsparungen entstehen größtenteils durch den geringeren Sauerstoffbedarf im Belebungsbecken.

Bei der Absenkung des Schlammalters auf t_{TS} = 15 Tage kann aufgrund der zusätzlich eingesparten Energie für Belüftung und Rührwerk durch die Verringerung des Belebungsbeckenvolumens der CO₂-Ausstoß durch Stromzukäufe abermals gesenkt werden, wie Tabelle 6.6 zeigt. Für die 14.000 E Anlage erhöht sich die CO₂-Einsparung auf 20,1 g CO₂/m³ bzw. 26,8 t CO₂/a und die 100.000 E Anlage auf 24,5 g CO₂/m³ bzw. 218,7 t CO₂/a.

Tabelle 6.6: Stromverbrauch und CO₂-Äquivalente bei anaerober Stabilisierung (PS+ÜS) mit VK und t_{TS} = 15 Tage (entspricht VR4)

Mit Vorklärung und t _{TS} = 15 Tage						
Verbraucher	14.000 E			100.000 E		
	Wh/m ³	kg CO ₂ /m ³	t CO ₂ /a	Wh/m ³	kg CO ₂ /m ³	t CO ₂ /a
Hebewerk	13,63	0,0082	10,8	13,63	0,0082	73,3
Rechen	0,80	0,0005	0,6	0,80	0,0005	4,3
Sandfang	7,84	0,0047	6,2	5,09	0,0031	27,4
Vorklärung	4,70	0,0028	3,7	4,70	0,0028	25,3
Belüftung Crossflow	240,57	0,1446	190,2	240,57	0,1446	1.292,9
Rezipumpen intern	5,84	0,0035	4,6	5,84	0,0035	31,4
Rezipumpen Membran	11,68	0,0070	9,2	11,68	0,0070	62,8
Permeatpumpen	7,40	0,0044	5,9	7,40	0,0044	39,8
Belüftung BB	117,62	0,0707	93,0	98,92	0,0595	531,6
Rührwerk	6,88	0,0041	5,4	7,90	0,0047	42,5
Voreindickung	7,34	0,0044	5,8	7,71	0,0046	41,4
Faulung	12,71	0,0076	10,1	13,33	0,0080	71,6
Entwässerung	7,77	0,0047	6,1	8,16	0,0049	43,9
Infrastruktur	16,92	0,0102	13,4	17,78	0,0107	95,6
Gesamt	461,70	0,2775	365,1	443,51	0,2665	2.383,6

Während sich durch die Verkleinerung des Belebungsbeckens positive Effekte für die CO₂-Bilanz ergeben, kann diese durch die klimaneutrale Verstromung des Klärgases zusätzlich verbessert werden. Tabelle 6.7 zeigt die theoretisch mögliche CO₂-Einsparung bei vollständiger Verstromung des produzierten Klärgases.

Tabelle 6.7: CO₂-Einsparung durch Eigenenergieerzeugung bei anaerober Stabilisierung

		14.000 E		100.000 E	
Schlammalter	Tage	25	15	25	15
Energiegewinn	kWh/a	208.339	231.915	1.523.932	1.653.917
CO ₂ -Einsparung	t CO ₂ /a	125,2	139,4	915,9	994,0

Für die Modellanlage mit 14.000 E ergibt sich eine Einsparung von 125,2 t CO₂/a für t_{TS} = 25 Tage. Durch die Steigerung der Energieproduktion bei Absenkung des Schlammalters kann hier 11,3 % zusätzlich eingespart werden. Bei der Modellanlage mit 100.000 E ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei die Steigerung der Energieproduktion bei t_{TS} = 15 Tage die CO₂-Einsparung nur um 8,5 % erhöht.

Die direkten Methanemissionen in der Schlammbehandlung wurden analog zu EnReMem Phase 1 über den von VROM (2008) angegebenen Emissionsfaktor anhand der CSB-Fracht im Zulauf der Modellanlagen berechnet und ändern sich in ihrer Größe daher nicht (Tabelle 6.8).

Tabelle 6.8: Direkte Methanemissionen aus der Schlammbehandlung bei anaerober Stabilisierung

Schlammalter	d	14.000 E		100.000 E	
		25	15	25	15
CSB-Fracht im Zulauf	kg CSB/d	1.680		12.000	
Emissionsfaktor	kg CH ₄ /kg CSB	0,0015 (VROM, 2008)			
Methanemission pro Tag	kg CH ₄ /d	3		18	
CO ₂ -Äquivalente	kg CO ₂ /kg CH ₄	25			
CO ₂ -Emission pro Tag	kg CO ₂ /d	63		450	
CO ₂ -Emission pro Jahr	t CO ₂ /a	23		164	

Der direkte Vergleich der beiden Betriebsweisen mit VK zur konventionell betriebenen aerob stabilisierenden Anlage zeigt ein deutliches CO₂-Einsparpotential für beide betrachteten Schlammalter (siehe Tabelle 6.9).

Tabelle 6.9: CO₂-Einsparung bei anaerober Stabilisierung im Vergleich zur aeroben Stabilisierung

Gesamtbilanz					
		14.000 E		100.000 E	
Ohne Vorklämung, mit aerober Stabilisierung					
Schlammalter		t _{TS} ≥ 25 Tage		t _{TS} ≥ 25 Tage	
CO ₂ -Ausstoß durch Energiebedarf	t CO ₂ /a	391,6		2.602,4	
Mit Vorklämung und anaerober Stabilisierung					
Schlammalter		25 Tage	15 Tage	25 Tage	15 Tage
CO ₂ -Ausstoß durch Energiebedarf	t CO ₂ /a	369,7	365,1	2.431,8	2.383,6
CO ₂ -Äquival. durch Methanemissionen	t CO ₂ /a	23		164	
CO ₂ -Einsparung durch Energiegewinn	t CO ₂ /a	125,2	139,4	915,8	994,3
Summe (anaerobe Stabilisierung)	t CO ₂ /a	267,6	248,7	1.680,3	1.553,6
Vergleich					
CO ₂ -Einsparung absolut	t CO ₂ /a	-124,0	-142,9	-922,1	-1.048,8
CO ₂ -Einsparung prozentual	%	31,7	36,5	35,4	40,3

In der 14.000 E Modellanlage können somit je nach Schlammalter zwischen 31,7 und 36,5 % CO₂ eingespart werden. Für die 100.000 E Anlage liegt die mögliche Einsparung sogar zwischen 35,4 bis 40,3 %. Aus Sicht des Klimaschutzes ist eine Umrüstung auf den Betrieb mit Vorklämung und anaerober Stabilisierung somit als lohnend anzusehen.

6.4 Kostenschätzung und –vergleichsbetrachtungen

Für die in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Modellanlagen werden eine Kostenschätzung und -vergleichsbetrachtungen, basierend auf einer Investitions- und Betriebskostenbetrachtung zu einem Variantenvergleich der Jahreskosten gemäß den Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen nach LAWA (1994) ermittelt und nach der Energiebilanz so eine Kostenbilanz der Anlagen diskutiert.

6.4.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten werden auf Basis der Auslegungsgröße der Modellanlagen in den beiden Varianten

- 20.000 E mit Vorklärung und Faulung (entspricht 14.000 E Anschlussgröße)
- 130.000 E mit Vorklärung und Faulung (entspricht 100.000 E Anschlussgröße)

betrachtet.

Die Investitionskosten werden je nach Verfahrensstufe in ihrer Höhe aus Phase 1 übernommen. Dabei wurden die in Phase 1 ausgelegten Größen für Faulbehälter beibehalten, auch wenn nach Verwendung der Versuchsergebnisse leichte Abweichungen entstanden sind. Die detaillierten Kostentabellen befinden sich im Anhang B. In der nachfolgenden Tabelle 6.10 sind die Investitionskosten in EUR und umgerechnet als Investitionskosten pro Einwohner summiert dargestellt.

Tabelle 6.10: Investitionskosten beider Modellanlagen nach Versuchsreihen

20.000 E	20.000 E	130.000	130.000
t_{TS} =25 d	t_{TS} =15 d	t_{TS} =25 d	t_{TS} =15 d
12,75 Mio. EUR	12,50 Mio. EUR	41,57 Mio. EUR	40,73 Mio EUR
637,35 EUR/E	624,90 EUR/E	319,75 EUR/E	313,18 EUR/E

Die tatsächlichen Investitionskosten für die kleine Modellanlage sind erwartungsgemäß mit 12,50 Mio. Euro (VR4) geringer als die tatsächlichen Investitionskosten für die große Modellanlage mit 40,73 Mio. Euro (VR4). Spezifisch betrachtet zeigen sich positive Effekte aufgrund der geringen Preise bei größerer Menge, so dass die spezifischen Investitionskosten bei der großen Modellanlage in VR4 (313,18 EUR/E) beinahe halb so hoch sind wie bei der kleinen Modellanlage in VR4 (624,90 EUR/E).

6.4.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten werden auf Basis der tatsächlichen Belastung der Modellanlagen, also 14.000 E und 100.000 E Anschlussgröße berechnet. Es werden die folgenden Kostenblöcke berücksichtigt:

- Personal,
- Betriebsmittel,
- Energie,
- Wartung / Reparatur / Instandhaltung,
- Reststoffentsorgung und
- Sonstiges.

Innerhalb der Betriebskosten werden die Daten der bereits ermittelten Kosten aus EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) übernommen. Die ausschlaggebende Änderung innerhalb der Betriebskosten entsteht jedoch durch die neu berechneten Werte der Energieeigenerzeugung. Diese ändern sich durch die Verwendung der Versuchsergebnisse in den entsprechenden Tabellen (Anhang A).

Durch eine Erhöhung des Gasertrags und die daraus folgende Steigerung der eigenen Energieproduktion verringern sich die Kosten für den Zukauf der Fremdenergie. Der Fremdbezug (Gesamtenergiebedarf der Anlage abzüglich der ermittelten Eigenproduktion) und die zugehörigen Kosten sind in nachfolgender Tabelle 6.11 einander gegenübergestellt. Es wird dabei von einem konstanten Energiepreis von 0,15 EUR/kWh ausgegangen. Innerhalb der Betriebskosten wurden ebenfalls die Abweichungen aufgrund des unterschiedlichen Schlammalters berücksichtigt. Dieses wirkt sich beispielsweise auf die benötigte Belüftungsenergie innerhalb der Belebung aus. Die zusammengefassten Energiezahlen befinden sich im Anhang A.

Tabelle 6.11: Energiebedarf und –kosten (0,15 EUR/kWh)

	Versuchsreihe 1 ÜSS, $t_{TS} = 25d$	Versuchsreihe 2 ÜSS, $t_{TS} = 15d$	Versuchsreihe 3 ÜSS+PS, $t_{TS} = 25d$	Versuchsreihe 4 ÜSS +PS, $t_{TS} = 15d$
14.000 E	416,7 Wh/m ³ 82.246 EUR/a	402,7 Wh/m ³ 79.477 EUR/a	309,2 Wh/m ³ 61.030 EUR/a	285,5 Wh/m ³ 56.341 EUR/a
100.000 E	393,8 Wh/m ³ 528.287 EUR/a	375,7 Wh/m ³ 503.898 EUR/a	280,8 Wh/m ³ 376.687 EUR/a	251,3 Wh/m ³ 337.061 EUR/a

Für die Modellanlage 14.000 E ergibt sich für die Versuchsreihe 1 ein Fremdbezug an Energie von 416,7 Wh/m³. Umgerechnet über die Abwassermenge von 1.315.825 m³/a und die angesetzten Energiekosten von 0,15 EUR/kWh ergeben sich jährliche Energiekosten von ca. 82.246 EUR/a für den Bezug von Fremdenergie. In Versuchsreihe 2 ergeben sich für Modellanlage 1 ähnliche Ergebnisse. Der Energiebedarf beträgt 402,7 Wh/m³, was jährlichen Kosten von 79.477 EUR/a entspricht.

Durch die veränderten Versuchseinstellungen in den Versuchsreihen 3 und 4 und einer deutlich erhöhten Energieerzeugung ergeben sich benötigte Energiemengen von 309,2 Wh/m³ (VR3) bzw. 285,5 Wh/m³ (VR4), was umgerechnet Kosten von 61.030 EUR/a (VR3) und 56.341 EUR/a (VR4) entspricht.

Beim Betrachten der Modellanlage 100.000 E werden in den Versuchsreihen 1 und 2 ca. 393,8 Wh/m³ bzw. 375,7 Wh/m³ an Fremdenergie benötigt. Daraus resultieren Jahreskosten in Höhe von 528.287 EUR/a (VR1) bzw. 503.898 EUR/a (VR2).

Durch die zusätzliche anaerobe Stabilisierung von Primärschlamm in den Versuchsreihen VR3 und VR4 lässt sich der Energiebedarf auf 280,8 Wh/m³ (VR3) bzw. 251,3 Wh/m³ (VR4) senken. Dies entspricht jährlichen Kosten von 376.687 EUR/a (VR3) bzw. 337.061 EUR/a (VR4).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aufgrund des Gasertrags und der entsprechenden Energieerzeugung bei VR4 der Bezug an Fremdenergie am geringsten ist und somit bei Betrachtung der Energiekosten die günstige Variante darstellt.

6.4.3 Zusammenfassung Jahreskosten

In nachfolgender Tabelle 6.12 sind die zu erwartenden Jahreskosten für beide Anlagengrößen und alle vier Versuchsreihen aufgelistet. Dabei werden die Kosten für Energie aus dem vorangegangenen Kapitel 6.2 separat aufgeführt, um ihren Einfluss auf die Gesamtkosten zu verdeutlichen. Die detaillierte Tabelle befindet sich in Anhang B.

Tabelle 6.12: Kostenzusammenstellung alle Versuchsreihen beider Modellanlagen

			14.000 E		100.000 E	
			ÜS	ÜS+PS	ÜS	ÜS+PS
	Jahreswassermenge	m³/a	1.315.825		8.942.500	
Versuchsreihe 1 ÜS, 25d	Investitionskosten als Jahreskosten	EUR/a	946.563		3.086.743	
	Betriebskosten OHNE Energiekosten	EUR/a	462.000		1.616.000	
	Kosten Energie Phase 2	EUR/a	82.246		528.287	
	Gesamt Betriebskosten	EUR/a	544.246		2.144.287	
	bez. auf Abwassermenge	Ct/m³	41,36		23,98	
	Gesamtjahreskosten	EUR/a	1.490.809		5.231.030	
	spezifische Jahreskosten	EUR/m³	1,13		0,58	
	Versuchsreihe 2 ÜS, 15d	Investitionskosten als Jahreskosten	EUR/a	928.073		3.023.253
Betriebskosten OHNE Energiekosten		EUR/a	460.000		1.610.000	
Kosten Energie Phase 2		EUR/a	79.477		503.898	
Gesamt Betriebskosten		EUR/a	539.477		2.113.898	
bez. auf Abwassermenge		Ct/m³	41,00		23,64	
Gesamtjahreskosten		EUR/a	1.467.550		5.137.151	
spezifische Jahreskosten		EUR/m³	1,12		0,57	
Versuchsreihe 3 ÜS+PS, 25d		Investitionskosten als Jahreskosten	EUR/a		946.563	
	Betriebskosten OHNE Energiekosten	EUR/a		462.000		1.616.000
	Kosten Energie Phase 2	EUR/a		61.030		376.687
	Gesamt Betriebskosten	EUR/a		523.030		1.992.687
	bez. auf Abwassermenge	Ct/m³		39,75		22,28
	Gesamtjahreskosten	EUR/a		1.469.593		5.079.430
	spezifische Jahreskosten	EUR/m³		1,12		0,57
	Versuchsreihe 4 ÜS+PS, 15d	Investitionskosten als Jahreskosten	EUR/a		928.073	
Betriebskosten OHNE Energiekosten		EUR/a		460.000		1.610.000
Kosten Energie Phase 2		EUR/a		56.341		337.061
Gesamt Betriebskosten		EUR/a		516.341		1.947.061
bez auf Abwassermenge		Ct/m³		39,24		21,77
Gesamtjahreskosten		EUR/a		1.444.413		4.970.314
spezifische Jahreskosten		EUR/m³		1,10		0,56

Wie bereits in Kapitel 6.2 dargestellt, kann durch die gemeinsame anaerobe Stabilisierung des Primärschlammes und des Überschussschlammes (Versuchsreihen 3 und 4) eine deutlich höhere Gaserzeugung erreicht werden.

Dieses führt zu einer größeren Eigenproduktion an Energie und geringem Fremdbezug, was sich in den Kosten des Energiebezugs deutlich macht. Bereits bei der Energiebilanzierung konnte ermittelt werden, dass der Gewinn an Energie den zusätzlichen Verbrauch übersteigt.

Vergleicht man nun die spezifischen Jahreskosten beider Modellanlagen und aller Versuchsreihen, so lässt sich feststellen, dass für die Modellanlage 14.000 E die spezifischen Jahreskosten für die anaerobe Stabilisierung von Überschussschlamm etwa 1,13 EUR/m³ (VR1) betragen, für die Modellanlage (100.000 E) jedoch nur 0,58 EUR/m³ (VR1).

Für die Versuchsreihen mit anaerober Stabilisierung von Überschussschlamm und zusätzlichem Primärschlamm (VR 3 und VR4) können die spezifischen Jahreskosten für Modellanlage 1 (14.000 E) auf 1,12 EUR/m³ (VR3) bzw. 1,10 EUR/m³ (VR4) leicht verringert werden. Bei Modellanlage 2 (100.000 E) sind Jahreskosten von 0,57 EUR/m³ (VR3) bzw. 0,56 EUR/m³ (VR4) erreichbar.

Als Fazit der Energie- und Kostenbetrachtung lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die Versuchsreihe 4, in der sowohl der aus der Vorklärung abgezogener Primärschlamm, als auch der Überschussschlamm aus den Membranbioreaktoren bei einem Schlammalter von 15 Tagen die höchste Energieerzeugung und die geringsten Gesamtjahreskosten aufweist. Dies trifft für beide Modellanlagen gleichermaßen zu, lediglich die Höhe des positiven Einflusses unterscheidet sich proportional.

6.4.4 Einfluss der Gasausbeute auf die Wirtschaftlichkeit

Im vorangegangenen Kapitel 6.4.3 wurden die Kosten der anaeroben Stabilisierung für die Versuchsreihen der Modellanlagen hergeleitet. Nach der Diskussion der einzelnen Versuchsreihen und deren Einfluss auf den Gasertrag erfolgt nachfolgend eine Untersuchung der Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit der Faulgasausbeute. Dabei wird eine Matrix aufgestellt, die Rückschlüsse darüber zulässt, ab welchem Gasertrag eine Vorklärung und Faulung im Vergleich zur Modellanlage ohne Vorklärung und Faulung (Modellanlage aus Phase 1) wirtschaftlich werden kann. Dies erfolgt iterativ und unabhängig für beide Modellanlagengrößen. Bei dieser Betrachtung stehen den höheren Investitions- und Betriebskosten der Modellanlage mit VK/Faulung gegenüber der Modellanlage ohne VK/Faulung die geringeren Kosten für den niedrigeren Bezug von Fremdenergie gegenüber. Die Umrechnung des täglichen Gasanfalls in Energieerzeugung erfolgt anhand folgender Hilfwerte:

- Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: 0,35
- Heizwert Faulgas: 6,4 kWh/Nm³
- Faktor für Teillastbetrieb: 10%

Der angesetzte Heizwert des Faulgases deckt sich mit den in den Versuchsreihen gemessenen Werten aus Kapitel 5.3.2. Die detaillierte Berechnungstabelle eines BHKW mit den angesetzten Berechnungswerten befindet sich im Anhang A.

Modellanlage 14.000 E

Versuchsreihe 4 mit 15d Schlammalter wird exemplarisch bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung herangezogen, da im Vergleich mit den anderen Versuchsreihen die spezifischen Jahreskosten mit 1,10 EUR/m³ bzw. die Gesamtjahreskosten mit 1.465.229 EUR/a am geringsten sind und somit eine Wirtschaftlichkeit am ehesten erzielt werden kann. Zusätzlich wird auch die Versuchsreihe 3 auf Basis von 25d Schlammalter als Vergleich verwendet.

Vergleicht man die Gesamtjahreskosten der 14.000 E Modellanlage für VR3 und VR4 mit den Gesamtjahreskosten der Modellanlage ohne VK/Faulung aus EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) so erhält man das in Bild 6.2 dargestellte Ergebnis.

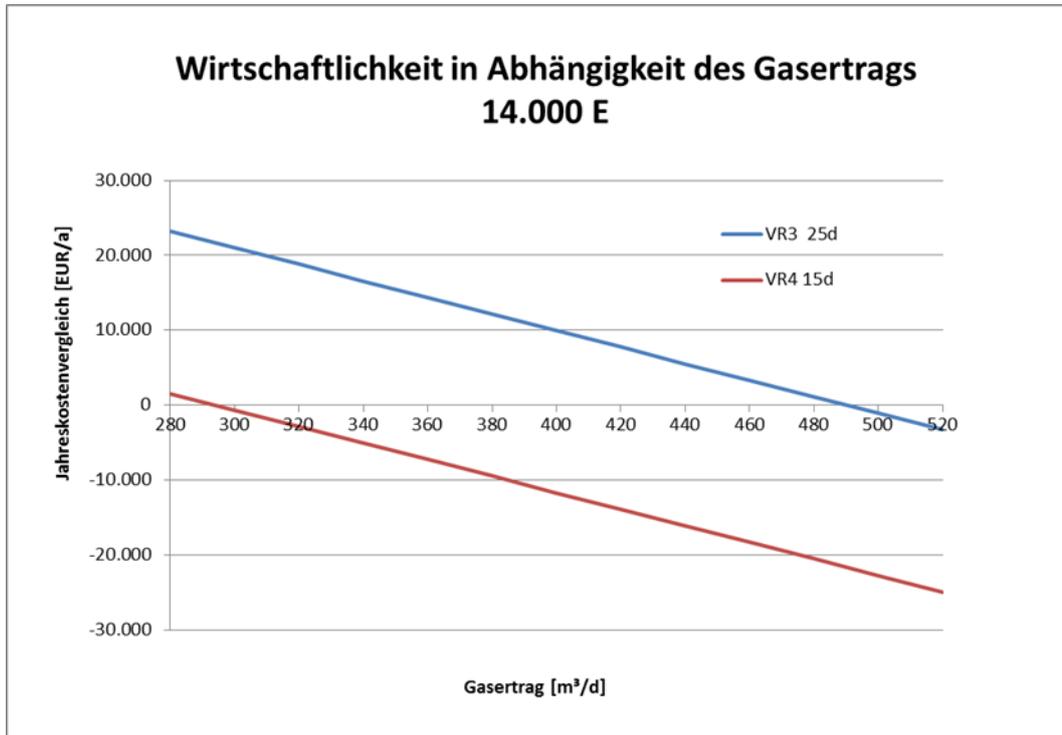


Bild 6.2: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über den Gasertrag, 14.000 E

Es wird in der theoretischen Betrachtung davon ausgegangen, dass bei Unterschreiten der X-Achse, also bei rechnerisch negativen Jahreskosten der break even erreicht ist und eine Wirtschaftlichkeit positiv darstellbar.

Aus Bild 6.2 lässt sich entnehmen, dass sich für Versuchsreihe 4 bei einem theoretischen Gasertrag von ca. 300 m³/d (SOLL) der Übergang zur Wirtschaftlichkeit erreicht wird. Wie in Tabelle 6.2 dargestellt, erzielt die Modellanlage 14.000 E unter Berücksichtigung der Versuchsreihe 4 einen Gasertrag von ca. 315 m³/d bzw. 176 Wh/m³ (IST). Der SOLL-IST Vergleich zeigt, dass für Modellanlage 14.000 E in Versuchsreihe 4 knapp mehr als die benötigte Gasmenge produziert wird. Es besteht ein kleiner Überschuss von ca. 15 m³/d. Die Anlage mit dieser Versuchseinstellung kann zum Vergleich der Modellanlage ohne VK /ohne Faulung als wirtschaftlich bewertet werden.

Im direkten Vergleich steht dazu die Versuchsreihe 3 mit einem Schlammalter von 25d. Durch höhere Investitionskosten (Volumen Belebung), höhere Energiekosten (Belüftung) und geringere Gaserträge (Versuchsergebnisse) ergibt sich, dass erst ab einem Gasertrag von ca. 485 m³/d (SOLL) der Übergang zur Wirtschaftlichkeit erreicht wird. Nach Tabelle 6.2 erzielt die Modellanlage 14.000 E in Versuchsreihe 3 einen Gasertrag von 283,1 m³/d (IST). Der SOLL-IST Vergleich verdeutlicht somit, dass ca. 201,9 m³/d Gas

zu wenig produziert werden, um die Modellanlage unter diesen Voraussetzungen wirtschaftlich werden zu lassen.

Modellanlage 100.000 E

Die gleiche Betrachtung der Faulgasausbeute erfolgt ebenfalls für die Modellanlage mit 100.000 angeschlossenen Einwohnern, ebenfalls für die Versuchsreihen VR3 und VR4. Aus Bild 6.3 lässt sich entnehmen, dass für Versuchsreihe 4 bereits bei einem theoretischen Gasertrag von ca. 360 m³/d (SOLL) der Übergang zur Wirtschaftlichkeit erreicht wird. Versuchsreihe 3 kann ab einem Gasertrag von etwa 1.100 m³/d den Übergang zur Wirtschaftlichkeit erzielen.

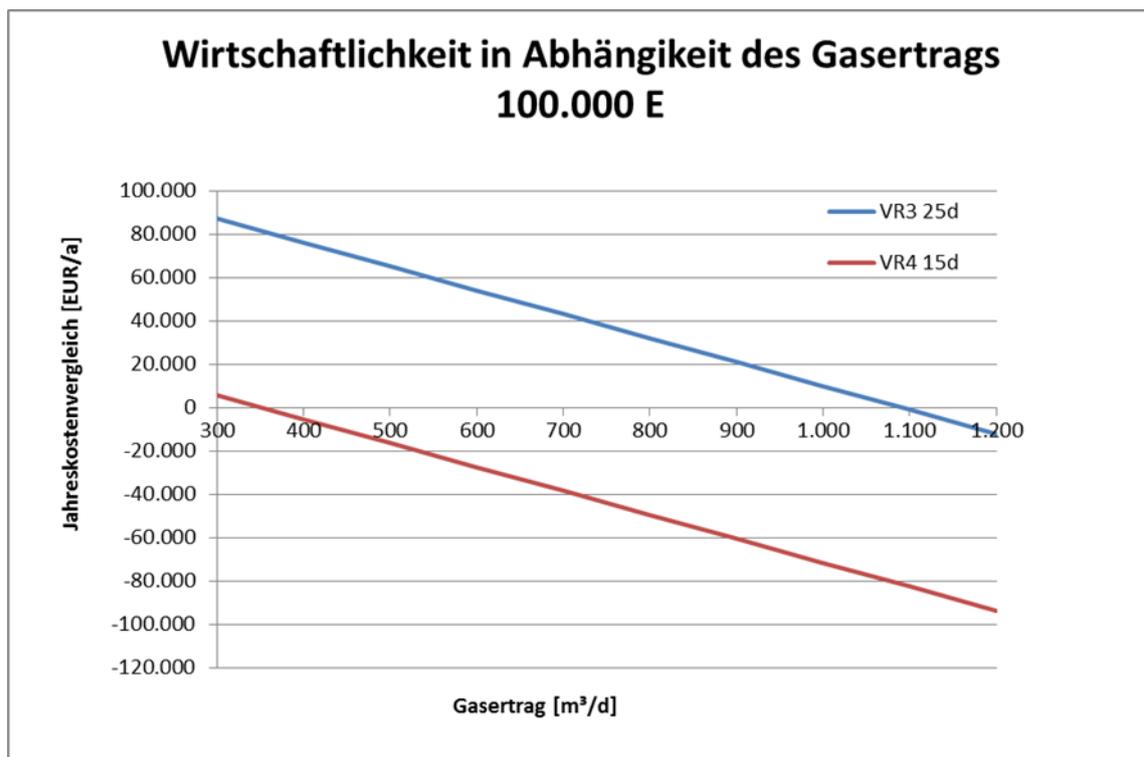


Bild 6.3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über die Faulgasmenge, 100.000 E

Wie in Tabelle 6.2 dargestellt, erzielt die Modellanlage 100.000 E unter Berücksichtigung der Versuchsreihe 4 einen Gasertrag von ca. 2.346 m³/d (IST). Der SOLL-IST Vergleich zeigt, dass für Modellanlage 100.000 E (VR4) ca. 1.986 m³/d Faulgasüberschuss produziert werden, so dass die Anlage im Vergleich zur Modellanlage ohne VK /ohne Faulung aus EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) als wirtschaftlich bewertet werden kann und sogar noch einen Überschuss aufweist.

In Versuchsreihe 3 werden nach Tabelle 6.2 ca. 2.092 m³/d (IST) an Gasertrag erwirtschaftet. Der SOLL-IST Vergleich zeigt, dass auch unter diesen Versuchseinstellungen (25d Schlammalter) ein Gasüberschuss von etwa 992 m³/d besteht.

Für die große Modellanlage (100.000 E) lässt sich somit ableiten, dass für beide Versuchsreihen ein Überschuss an Gas besteht. Selbst mit einer ungünstig betriebenen Faulung und schlechten spezifischen Faulgasausbeute kann eine Wirtschaftlichkeit der Anlage erwartet werden.

6.4.5 Einfluss des Strompreises auf die Wirtschaftlichkeit der Modellanlage

Die Wirtschaftlichkeit der Implementierung einer Vorklärung und Faulung bei der 100.000 E Modellanlage wurde bereits in EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) dargelegt und wird an dieser Stelle nicht nochmals erläutert.

Die 14.000 E Modellanlage erwies sich hingegen in EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) für den Betrieb mit Vorklärung und Faulung nicht als wirtschaftlich. Ein ausschlaggebender Faktor, der die Wirtschaftlichkeit maßgeblich beeinflusst, ist der zu Grunde gelegte Strompreis. Bisher wurde für alle Berechnungen ein Strompreis von 0,15 EUR/kWh konstant angenommen. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft die Kosten für Strom voraussichtlich weiterhin steigen werden. Um eine Aussage darüber treffen zu können, ab welcher Höhe des Strompreises die Modellanlage 14.000 E mit Vorklärung und Faulung wirtschaftlich wird, erfolgt nachfolgend eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Versuchsreihen 3 und 4 anhand variierender Strompreise.

Der Vergleich der Wirtschaftlichkeit des Strompreises bezieht sich im Folgenden auf die Modellanlage ohne VK/Faulung aus EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) und auf die Versuchsreihen der Modellanlage mit anaerober Stabilisierung von Überschussschlamm und Primärschlamm VR3 und VR4. Der Unterschied beider Versuchsreihen liegt im gewählten Schlammalter.

Durch Iteration des Strompreises werden die Energiekosten der Modellanlagen angepasst und miteinander verglichen. Die sonstigen Betriebskosten, sowie auch die Investitionskosten der jeweiligen Modellanlage bleiben für diese Betrachtung konstant. Der Verlauf der Differenz der Jahreskosten zwischen der Modellanlage ohne VK/Faulung (Phase 1) und der Modellanlage 14.000 E mit den Versuchsreihen VR3 und VR4 ist in nachfolgender Bild 6.4 dargestellt.

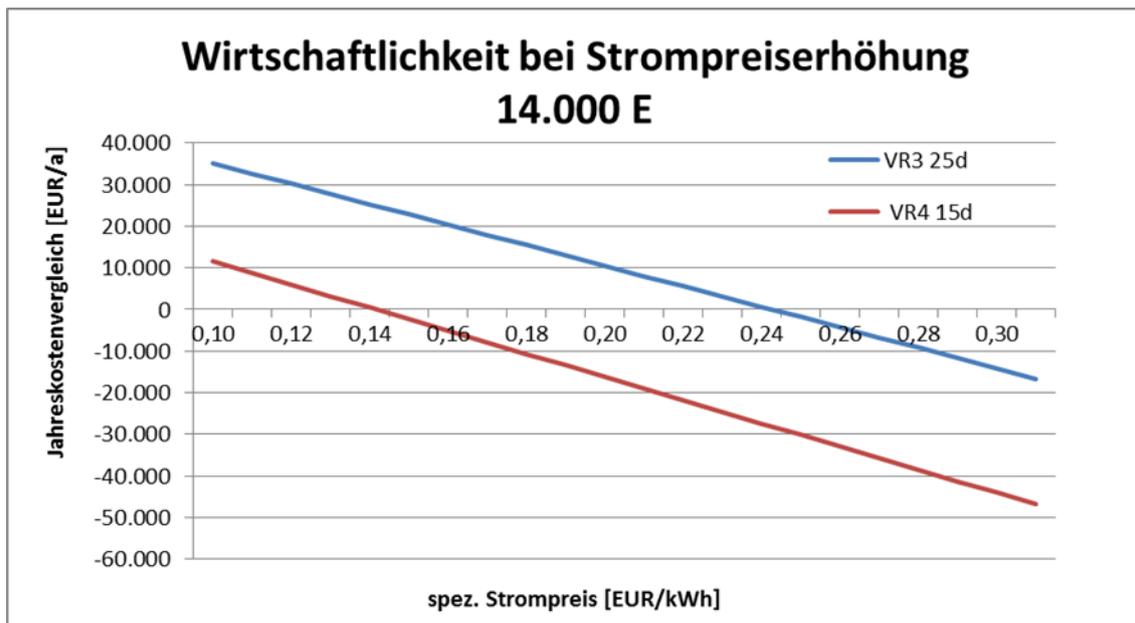


Bild 6.4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über spez. Strompreis, 14.000 E

Analog zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Faulgasausbeute findet die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bei steigenden Strompreisen unter der Annahme statt, dass bei negativen Jahreskosten eine Amortisation eintritt.

Bild 6.4 zeigt, dass bei einem spezifischen Strompreis von etwa 0,25 EUR/kWh der Punkt der Wirtschaftlichkeit für die Modellanlage 14.000 E (mit Vorklärung und Faulung und einem Schlammalter von 25 Tagen) gegenüber der Modellanlage ohne Vorklärung und Faulung erreicht wird. Bei dem zuvor genannten Energiepreis wird die Differenz aus den Gesamtjahreskosten der Modellanlagen negativ. Sollte der spezifische Strompreis theoretisch auf diesen Wert ansteigen, so wäre auch in der Modellbetrachtung eine kleine Anlage von 14.000 E mit Vorklärung und Faulung (VR3) wirtschaftlich.

Die Modellanlage 14.000 E in Versuchsreihe 4 erweist sich wie in Bild 6.4 erkennbar ist, schon bei einem spezifischen Strompreis von 0,15 EUR/kWh als wirtschaftlich. Dies entspricht dem aktuell vorliegenden spezifischen Strompreis.

Es ist an dieser Stelle zu betonen, dass es sich bei der Betrachtung der Modellanlagen um theoretische Berechnungen handelt. Das hier dargestellte Modell ist in der Praxis nicht auf jede Kläranlage ähnlicher Baugröße 1:1 übertragbar. Das hier dargestellte Modell ist nicht auf jede Kläranlage ähnlicher Baugröße 1:1 übertragbar. Es existieren viele unterschiedliche Einflussfaktoren, wie z.B. Abwasserzusammensetzung oder Förderhöhen, die die ermittelten Werte stark beeinflussen können. Die verwendeten Ergebnisse aus den halbtechnischen Versuchen mit unterschiedlichem Schlammalter haben wesentlichen Einfluss auf die erhaltenen Modellergebnisse. Um eine verlässliche Einschätzung für Anlagenbetreiber erstellen zu können, muss jede Anlage individuell bilanziert und überprüft werden.

6.4.6 Reduzierung der Investitionskosten der Faulung

Nicht nur der zu erreichende Gasertrag ist ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit von Faulungsanlagen, sondern auch die Höhe der Investitionskosten. Speziell für kleinere Anlagen soll an dieser Stelle untersucht werden, ob es kostengünstigere Alternativen zu der bisher betrachteten klassischen europäischen Bauform der Faulung gibt.

Die Kosten für den Bau einer herkömmlichen Faulung in Spannbeton und Stahlbauweise wurden in EnReMem Phase 1 (PINNEKAMP, 2011B) in Anlehnung an das ATV Handbuch (ATV, 1995) ermittelt. Dort ergab sich für die 14.000 E Anlage eine Investitionssumme von ca. 707.000 EUR (für $V=800 \text{ m}^3$).

Durch eine schrittweise Anpassung der Investitionssumme und bei gleichbleibend angenommenen Betriebskosten wird iterativ ermittelt, ab welcher Summe sich der Bau einer anaeroben Stabilisierung in Abhängigkeit vom Strompreis wirtschaftlich darstellen lässt.

Bei einer Investitionssumme von ca. 400.000 EUR kann bei aktuellem Strompreis von 0,15 EUR/kWh eine monetäre Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Nachfolgendes Diagramm Bild 6.5 zeigt den Verlauf der Jahreskosten bei einer geschätzten Investitionssumme der Faulung von 400.000 EUR.

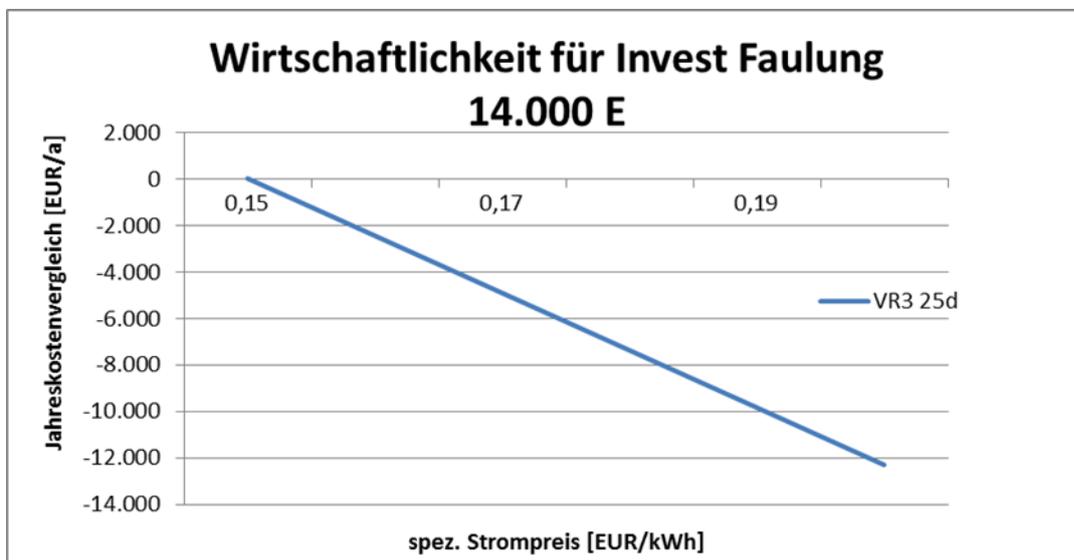


Bild 6.5: Vergleich der Jahreskostendifferenz bei iterierten Investitionskosten der Faulung

Sollten sich die Investitionskosten einer Faulung auf ca. 400.000 EUR reduzieren lassen, so kann eine Wirtschaftlichkeit der kleinen Modellanlage (14.000 E) mit den Ergebnissen der Versuchsreihe 3 bereits für den angenommenen Strompreis von rund 0,15 EUR/kWh erreicht werden. Die Wirtschaftlichkeit der kleinen Modellanlage unter den

Versuchseinstellungen in VR4 mit 15 Tagen Schlammalter wurde bereits in Kapitel 6.4.5 für den aktuellen Strompreis von 0,15 EUR/kWh nachgewiesen.

Nach Literaturrecherche und Anfragen bei Herstellern, besteht z.B. die Möglichkeit, den Faulraum durch ein Fermentersystem mit integrierter Gashaube auszubilden (siehe Bild 6.6).

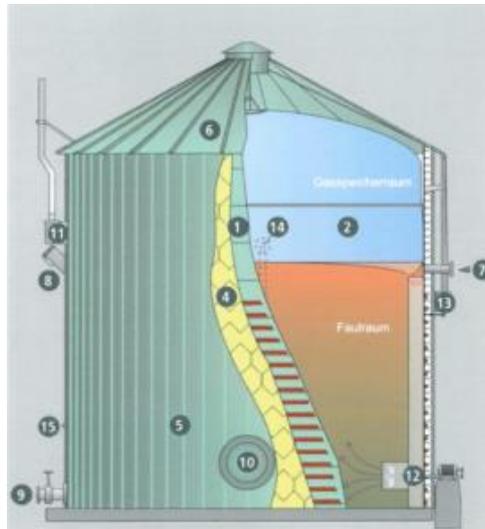


Bild 6.6: Fermentersystem Fa. Lipp als Faulraum

Laut Herstellerangaben der Fa. Lipp kostet der Bau eines Biofermentersystems ($V = 800 \text{ m}^3$) mit integriertem Gasspeicher inklusive Zubehör und Rührwerk ca. 290.000 EUR (Angebot siehe Anhang C). Bauseitige Anpassungen in der Steuerung, sowie evtl. Anpassungen in der Messtechnik kommen hinzu. Dennoch lässt sich abwägen, dass die Investitionssumme von 460.000 EUR in dieser Bauvariante wahrscheinlich nicht überschritten wird. Eine wirtschaftliche Lösung wäre somit möglich. Zur Vergleichbarkeit wurde die gleiche Baugröße wie in Phase 1 gewählt. Aufgrund der Einflüsse der halbtechnischen Versuche wäre bereits ein geringeres Faulvolumen ausreichend, die Kosten würden somit weiter verringert werden können und eine Wirtschaftlichkeit wäre bei dem aktuellen spezifischen Strompreis von 0,15 EUR/kWh gegeben.

Die Auswirkungen eines solchen Biofermenters auf den Gasertrag, die Gasqualität und einhergehend die Höhe des Heizwertes werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass mögliche Abweichungen in der Betriebsweise und der Gaserzeugung entstehen können.

7 Entscheidungsmatrix als Planungshilfe

In Tabelle 7.1 ist die überarbeitete Entscheidungsmatrix zur Gegenüberstellung möglicher Energiebedarfsdaten, Energieerträge und CO₂-Emissionen aus MBR bei verschiedenen Verfahrenskonfigurationen dargestellt.

Tabelle 7.1: Entscheidungsmatrix der Variantenuntersuchung am Beispiel der Modellanlage

Anlagengröße		14.000 E			100.000 E		
		ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung 25 d	mit VK/ Faulung 15 d	ohne VK/ Faulung	mit VK/ Faulung 25 d	mit VK/ Faulung 15 d
Gesamtenergiebedarf	Wh/m ³	495	468	462	484	452	444
Gesamtenergiebedarf	kWh/(E·a)	47	44	43	43	40	40
davon aus Membranstufe	Wh/m ³	260	260	260	260	260	260
davon aus Belebung	Wh/m ³	189	137	130	179	121	113
davon aus Schlammbehandlung	Wh/m ³	8	27	28	8	29	29
Energieertrag aus Faulung	Wh/m ³	0	158	176	0	170	185
Fremdenergiebezug	Wh/m ³	495	309	285	484	282	259
CO ₂ -Emissionen	t CO ₂ /a	392	268	249	2.490	1.680	1.554
Prognose: Wirtschaftlichkeit bei Strompreis (min 0,15 €/kWh)	€/kWh	-	0,25	0,15	-	0,15	0,15

Für die Membranstufe sind das Membrangebläse, die externe Rezirkulationspumpe sowie die Permeatpumpe berücksichtigt. Hier ändert sich durch die Einführung von Vorklärung und anaerober Schlammstabilisierung nichts. Die spezifischen Kosten sind auch für beide Anlagengrößen gleich. Für die Belebung sind die Belüftung im Belebungsbecken, Rührwerke sowie die interne Rezirkulation (vom Nitrifikationsbereich in den Denitrifikationsbereich) berücksichtigt. Dieser Wert wird mit der Einführung einer Vorklärung kleiner, da weniger zu oxidierende Fracht ins Belebungsbecken geleitet wird und somit die Position Belüftung geringer ausfällt. Des Weiteren ist das Belebungsbecken kleiner, was sich auf den Energiebedarf der Rührwerke auswirkt. Durch das Absenken des Schlammalters wird zusätzlich Belüftungsenergie eingespart. Bei der Schlammbehandlung ist ohne anaerobe Stabilisierung eine Zentrifuge berücksichtigt, mit anaerober Stabilisierung ein Eindicker, der Faulbehälter sowie eine Zentrifuge. Bei allen

Anlagen sind zusätzlich der Energiebedarf für die mechanische Reinigung sowie die Infrastruktur zu berücksichtigen. Die CO₂-Bilanz berücksichtigt den Energiebedarf, gegebenenfalls den Energiegewinn sowie die CH₄-Emissionen aus der anaeroben Schlammstabilisierung.

Nach Bewertung der Ergebnisse aus dem Versuchsbetrieb und den Modellrechnungen kann der Fremdenergiebezug der Kläranlagen durch Umstellung auf einen Betrieb mit Vorklämung und anaerober Stabilisierung signifikant gemindert werden. Zudem ergeben sich deutliche Reduktionen der CO₂-Emissionen. Die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur konventionellen Bauweise mit aerober Stabilisierung war für die Modellanlagen 14.000 E und $t_{TS} = 15$ Tage, sowie für beide Varianten der 100.000 E Anlage bereits ab dem niedrigsten betrachteten Strompreis von 0,15 €/kWh erreicht. Für die Variante 14.000 E und $t_{TS} = 25$ Tage wäre ein Strompreis von 0,25 €/kWh notwendig.

Innerhalb des Versuchsbetriebes wurde keine Verschlechterung der Reinigungsleistung beim Betrieb mit VK sowohl für $t_{TS} = 25$ Tage als auch für $t_{TS} = 15$ Tage festgestellt, so dass diese innerhalb der Entscheidungsmatrix nicht als Kriterium aufgeführt wurde. Die Frage des beobachteten Membranfoulings in den Versuchen mit VK und $t_{TS} = 15$ Tage macht eine mögliche großtechnische Umsetzung von weiteren Untersuchungen abhängig. Eine Berücksichtigung der erhöhten Kosten durch eine eventuell notwendige Dosierung zusätzlicher Betriebsmittel zur Membranreinigung oder Konditionierung des belebten Schlammes, sowie durch den steigenden Energiebedarf der Permeatpumpen erfolgte an dieser Stelle nicht.

8 Zusammenfassung und Fazit

Bei der Senkung des Energieverbrauchs von Membranbioreaktoren (MBR) konnten innerhalb der letzten Jahre große Fortschritte erzielt werden (z. B. PINNEKAMP, 2011A; KREBBER, 2014). Zum wirtschaftlichen Betrieb von MBR ist neben den Energieeinsparungen durch eine optimierte Betriebsweise zusätzlich die Betrachtung der möglichen Einsparungen durch Eigenenergieerzeugung von Interesse. Im Rahmen des Projektes EnReMem Phase 2 wurden im halbtechnischen Versuchsbetrieb Daten zur erreichbaren Gasproduktion von Schlämmen aus Membranbioreaktoren gewonnen. Dabei wurde eine Referenzstraße mit 25 Tagen Schlammalter und ohne Vorklärung mit einer Straße mit variablem Schlammalter (15 und 25 Tage) und mit Vorklärung verglichen. Die Ergebnisse der Versuche flossen danach in die in EnReMem Phase 1 erstellten Modellanlagen ein.

In den ersten beiden Versuchsreihen konnten verlässliche Daten zum erreichbaren spezifischen Gasertrag des Überschussschlammes aus der Versuchsstraße gewonnen werden. Dabei lag dieser für 25 Tage Schlammalter bei 264 l/kg oTR_{zu} und für 15 Tage bei 310 l/kg oTR_{zu}. Durch die Senkung des Schlammalters konnte also eine deutliche Steigerung des Gasertrags erreicht werden. In zwei weiteren Versuchsreihen wurde der Gasertrag bei gemeinsamer Faulung des Primär- und Überschussschlammes ermittelt. Hier wurde der Gasertrag aus Primärschlamm zu 600 l/kg oTR_{zu} errechnet. Für die Referenzstraße konnte der spezifische Gasertrag des ÜSS zu 290 – 330 l/kg oTR_{zu} bestimmt werden und lag somit im Bereich der Literaturwerte für aerob stabilisierende Anlagen ohne Vorklärung.

Die Reinigungsleistung der Versuchsstraße mit Vorklärung war gleich, bzw. leicht besser im Vergleich zur Referenzstraße. Es konnte eine geringere Anzahl an NH₄-N Spitzen im Ablauf festgestellt werden. Beide Straßen zeigten die für MBR typischen sehr guten Ablaufwerte. Die Filtrierbarkeit des Schlammes wurde anhand des Schlammfiltrationsindex (SFI) und des Transmembrandrucks bestimmt. Es zeigte sich, dass für die Versuchsstraße mit 15 Tagen Schlammalter Fouling auftrat. Die Ursache konnte dabei in Versuchsreihe 4 auf einen erhöhten Gehalt an extrazellulären polymeren Substanzen zurückgeführt werden. Dies ließ sich zum Teil durch den Versuchsbetrieb bei niedrigen Temperaturen im Winter erklären. Zudem scheint die geänderte Biozönose bei abgesenktem Schlammalter Auswirkungen auf den EPS-Gehalt zu haben. Im Rahmen des Projektes wurden keine Maßnahmen zur gezielten Bekämpfung des Membranfoulings unternommen, um die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse aus der Schlammfäulung mit den Ergebnissen aus der Referenzstraße nicht zu schmälern. Es konnten allerdings

Vorschläge zu möglichen Maßnahmen zur Foulingreduktion anhand einer Literaturrecherche gemacht werden.

Dabei sind im Einzelnen zu nennen:

- Anpassung des Schlammalters und/oder des Permeatflusses im Belebungsbecken an jahreszeitliche Temperaturschwankungen
- Nutzung von Fällmitteln zur Phosphat-Fällung hat positiven Effekt auf Fouling
- Dosierung von PAK zur Verbesserung der Schlammeigenschaften und zur Reduktion der gelösten EPS

Die Ergebnisse der Entwässerungsversuche mittels des Tests der kapillaren Fließzeit (CST) zeigten für die halbtechnischen Versuche ein entgegen der Laborversuche aus EnReMem Phase 1 konträres Bild. Es wurde durchgängig eine Verschlechterung der Entwässerbarkeit des gefaulten Schlammes festgestellt, welche eventuell auf eine nicht vollständige Stabilisierung innerhalb des halbtechnischen Faulbehälters hindeutet.

Die in EnReMem Phase 1 aus Literaturwerten erstellten Modellanlagen mit 14.000 und 100.000 angeschlossenen Einwohnern wurden mithilfe der aus den halbtechnischen Versuchen gewonnenen Daten angepasst. Es erfolgte dabei keine Anpassung der Referenzanlage ohne Vorklärung und Faulung. Die Modellbetrachtung ergab für die Anlagen mit Vorklärung und Faulung durch die Änderung des Schlammalters von 25 Tagen (Versuchsreihe 3) auf 15 Tage (Versuchsreihe 4) Einsparungen in den Investitionskosten aufgrund geringerer Beckenvolumina. Zudem konnten im Belebungsbecken Belüftungsenergie und Energie für die Rezirkulation eingespart werden. Somit ist die Variante mit 15 Tagen Schlammalter sowohl vom Energiebedarf als auch von den Baukosten wirtschaftlicher. Die errechneten Jahreskosten zeigen für die Variante mit 15 Tagen Schlammalter und Vorklärung für beide Modellanlagengrößen wirtschaftliche Vorteile zur Variante ohne Vorklärung und Faulung. Mit 25 Tagen Schlammalter ist die 100.000 E Anlage bei einem angenommenen gegenwärtigen Strompreis von 0,15 €/kWh bereits wirtschaftlich. Für die 14.000 E Anlage konnte gezeigt werden, dass bei einem steigenden Strompreis die Wirtschaftlichkeit bei etwa 0,25 €/kWh erreicht wird. Demgegenüber ist durch eine Anpassung in der Bauweise der Faulung, von der konventionellen Bauweise aus Stahlbeton auf ein Fermentersystem mit integrierter Gashaube aus dem Biogasbereich, auch für 14.000 E bei 25 Tagen Schlammalter bereits ein wirtschaftlicher Betrieb möglich.

Die Ergebnisse der CO₂-Bilanz aus EnReMem Phase 1 konnten aufgrund der angepassten Modellanlagen aktualisiert werden. Es zeigt sich ein deutliches Einsparpotential an CO₂-Äquivalenten im Betrieb mit Vorklärung und Faulung bereits für ein Schlammalter von 25 Tagen. Hier liegen die prozentualen Einsparungen bei 31,7 %

(14.000 E) bzw. 35,4 % (100.000 E) im Vergleich zur Referenzanlage mit ausschließlich aerober Stabilisierung ohne Vorklärung. Durch die Senkung des Schlammalters kann ein zusätzlicher positiver Effekt erzielt werden.

Der Betrieb mit Vorklärung und 25 Tagen Schlammalter ist anhand der durchgeführten Versuche sowohl nach der Reinigungsleistung als auch nach der Betriebssicherheit dem konventionellen Betrieb ohne Vorklärung und mit aerober Stabilisierung gleichwertig. Aufgrund der festgestellten geringeren Anzahl an $\text{NH}_4\text{-N}$ Spitzen im Ablauf kann dieser sogar zusätzliche Betriebssicherheit bieten. Bei einer den Größenverhältnissen der Kläranlage angepassten Bauweise des Faulungsreaktors kann eine Wirtschaftlichkeit der betrachteten Modellanlagen unterhalb der allgemein genannten Wirtschaftlichkeitsgrenze von 20.000 bis 25.000 E für das konventionelle Belebungsverfahren erreicht werden. Eine Anpassung der Modellanlagen mit Vorklärung und Faulung auf 15 Tage Schlammalter in der Belebungsstufe ermöglicht gegenüber 25 Tagen Schlammalter geringe Kosteneinsparungen von 0,02 €/m³ behandeltes Abwasser bei 14.000 E bzw. 0,01 €/m³ für 100.000 E. Dies ist im großen Anteil des Primärschlammes an der Faulgasproduktion begründet.

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen zum energieeffizienten Betrieb großtechnischer MBR und den in diesem Bericht gewonnenen Erkenntnissen zur Möglichkeit der Eigenenergieerzeugung aus Faulgas, ergibt sich weiterer Forschungsbedarf in den nachfolgend genannten Bereichen. Die Ermittlung des maximal möglichen Primärschlammabzuges in der Vorklärung, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der für MBR typischen sehr guten Reinigungsleistung ist ein Schwerpunkt möglicher weiterer Untersuchungen. Innerhalb der Versuche konnte gezeigt werden, dass der Primärschlamm auch bei Membranbioreaktoren den Hauptteil der Gasproduktion liefert.

Von größerer Bedeutung ist die Optimierung des Betriebs der Membranstufe eines Membranbioreaktors mit Vorklärung und Faulung bei 15 Tagen Schlammalter hinsichtlich der Verringerung von Fouling. Aufgrund der Projektergebnisse zeigte sich eine Wirtschaftlichkeit der Schlammfäulung bereits für kommunale MBR mit Ausbaugrößen von 14.000 E bei gleichzeitig energieoptimierter Auslegung. Zur Erreichung eines stabilen und wirtschaftlichen Betriebs kann die Dosierung von Pulveraktivkohle in das Belebungsbecken – zusätzlich zu der dadurch erreichbaren Spurenstoffelimination – Vorteile bieten. Dabei sind vor allem die langfristige Betriebssicherheit des Prozesses, die optimale PAK-Dosierkonzentration zum möglichst wirtschaftlichen Erreichen beider Ziele (Spurenstoffelimination und Foulingreduktion) und mögliche positive Veränderungen im Faulprozess (Steigerung des Umsatzes der Organik, Faulgasertrag) wichtige Forschungsfelder.

Literaturverzeichnis

- AHN, K.-H.; SONG, K.-G.; KIM, Y. (2008): Effect of coagulant addition on membrane fouling and nutrient removal in a submerged membrane bioreactor. *Desalination* 221, S. 467-474
- ATV-DVWK-A 131 (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Arbeitsblatt des ATV-DVWK Regelwerkes, ISBN 3-933707-41-2
- BLUMENKRANTZ, N.; ASBOE-HANSEN, G. (1973): New method for quantitative determination of uronic acids. *Anal. Biochem.* 54(2):484-9.
- BRADFORD, M. M. (1976): A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding, *Anal Biochem*, 72, 248–254
- BRANDT, F. (1999): *Brennstoffe und Verbrennungsrechnung*. Vulkan-Verlag GmbH, 1999, ISBN 380275801-3
- CHABROL, E.; CHARONNET, R. (1937): Une nouvelle réaction pour l'étude des lipides. *Presse Med* 45:1713
- DICHTL, N., KOPP, J. (2001): Kennwerte zur Entwässerbarkeit von Klärschlämmen. In: Dohmann, M. (Hrsg.): *Gewässerschutz, Wasser, Abwasser 184, Begeleitband zur 34. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 14. – 16.03.2001 in Aachen*, ISBN 3-932590-77-5
- DIN 19552 (2002): Kläranlagen - Rundbecken - Absetzbecken mit Schild- und Saugräumer und Eindicker; Bauformen, Hauptmaße, Ausrüstungen
- DIN EN 12255-4 (2002): Kläranlagen - Teil 4: Vorklärung. Deutsche Fassung EN 12255-4:2002
- DONG, B.-Z.; CHEN, Y.; GAO, N.-Y.; FAN, J.-C. (2007): Effect of coagulation pretreatment on the fouling of ultrafiltration membrane. *Journal of Environmental Sciences* 19, S. 278–283
- DUBOIS, M.; GILLES, K.; HAMILTON, J.; REBERS, P.; & SMITH, F. (1956): Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356.
- DWA-A 216 (2013): Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Entwurf (April 2013), Arbeitsblatt des DWA Regelwerkes, ISBN 978-3-942964-87-6
- DWA-M 368 (2014): Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Merkblatt des DWA Regelwerkes, ISBN 978-3-944328-60-7
- GRETZSCHEL, O. (2011): Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz - NAWaS - Modul 2: Weitergehende Untersuchungen. Kaiserslautern, Rheinland-Pfalz.
- HABERKERN, B.; MAIER, W.; SCHNEIDER, U. (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Text 11/08, Umweltbundesamt (Hrsg.), ISSN 1862-4804, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3347.pdf> (Zugriff: 15.5.2015)

- IMHOFF, K.; IMHOFF, K. R. ET AL (2006): Taschenbuch der Stadtentwässerung. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München, 30. Auflage, ISBN: 3-8356-3094-6
- KAPP, H.; BAHRS, D. (1994) Stabilisierungskennwerte für biologische Stabilisierungsverfahren: Arbeitsbericht der ATV/BDE/VKS, Arbeitsgruppe 3.1.1, Korrespondenz Abwasser (41) S. 455-460
- KREBBER, K. (2014): Optimierung der Energiebilanz von Membranbioreaktoren. GWA Band 235, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Dissertation Aachen 2014, ISBN 978-3-938996-41-6
- LESCHBER, R.; LOLL, U. ET AL. (1996): ATV Handbuch Klärschlamm. 4. Aufl. Berlin: Ernst, ISBN 3-433-00909-0
- MALMS, S.; KREBBER, S.; PALMOWSKI, L.; HERR, J.; PINNEKAMP, J. (2014): Entwicklungspotenzial der Membranverfahren. GWA Band 234, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, ISSN 0342-6068
- MELIN, T.; LYKO, S.; BATSCH, A.; BAUER, T.; WINTGENS, T.; AL-HALBOUNI, D.; HOLLENDER, J.; GRINWIS, S.; SCHÜRMAN, B.; TACKE, D.; DRENSLA, K.; JANOT, A. (2007): Strategien zur Foulingkontrolle bei Membranbelebungsanlagen in der kommunalen Abwasserbehandlung. Abschlussberichtes für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- MENG, F.; CHAE, S.-R.; DREWS, A.; KRAUME, M.; SHIN, H.-S.; YANG, F. (2009): Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. Water Research (43), S. 1489–1512, doi:10.1016/j.watres.2008.12.044
- METZGER, S. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, zugleich Dissertation der TU Berlin, ISBN-13: 978-8356-3231-8
- MISHIMA, I.; NAKAJIMA, J. (2009): Control of membrane fouling in membrane bioreactor process by coagulant addition. Water science and technology 59 (7), S. 1255–1262. DOI: 10.2166/wst.2009.090.t
- MOLDT, C. (2001): Bestimmung des Grenzflächenfaktors α bei Belebtschlämmen unterschiedlichen Trockensubstanzgehaltes in einer Versuchsanlage. Diplomarbeit an der FH Braunschweig/Wolfenbüttel, <http://www.ibfo.de/Diplomarbeiten/Cornelius/Diplomarbeit.pdf> (Aufruf: 15.5.2015)
- MURL (1999): Energie in Kläranlagen- Handbuch, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen
- N. N. (o. J.): Stichwort: Abbaubarkeit. WasserWissen.de, <http://www.wasserwissen.de/abwasserlexikon/a/abbaubarkeit.htm> (Abruf 29.05.2015)
- NG, C. A.; SUN, D.; ZHANG, J.; WU, B.; FANE, A. G. (2010): Mechanisms of Fouling Control in Membrane Bioreactors by the Addition of Powdered Activated Carbon, Separation Science and Technology, 45:7, 873-889, DOI: 10.1080/01496391003667138
- NIELSEN, P. H.; JAHN, A.; PALMGREN, R. (1997): Conceptual model for production and composition of exopolymers in biofilms. Water Science and Technology (36), 9-11

- PINNEKAMP, J.; Friedrich, H.; LANGE, M.; BOLLE, F.-W.; SCHILLING, S.; BAUMGARTEN, S. (2006): Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen – Band 1: Membrantechnik für die Abwasserreinigung. FiW Verlag, 2003, ISBN: 3-939377-00-7
- PINNEKAMP, J.; THIEMIG, C.; BRANDT, K.-H.; KÜHN, W.; BRÜß, U. ; GRÖMPING, M.; SCHLÖSSER, F. (2009): Untersuchungen zum Membransystem der Firma A3 als Membranbelebungsverfahren auf der KA Xanten-Vynen der LINEG im technischen Maßstab - Teil 3: Begleitendes Untersuchungsprogramm. Abschlussbericht an das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht_A3.pdf (Zugriff April 2015)
- PINNEKAMP, J.; VELTMANN, K.; PALMOWSKI, L. (2011A): Prozessoptimierung von Membranbelebungsanlagen (ProM), Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (bisher unveröffentlicht)
- PINNEKAMP, J.; VELTMANN, K.; PALMOWSKI, L.; MAUER, C.; Simsheuser, C.; SCHMITZ, U.; ECKERS, S.; RIßE, H.; GREDIGK-HOFFMANN, S. (2011B): Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen - Phase 1, Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- PINNEKAMP, J.; WESSLING, M.; YÜCE, S.; HERR, J.; MALMS, S.; SCHUMACHER, D.; LÖWENBERG, J.; HOCHSTRAT, R.; HOMMES, G.; PANGLISCH, S.; TATZEL, A.; WEBER, M.; LEIßE, D.; DRENSLA, K.; JANOT, A.; KÜHN, W. (2012): Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen durch den Einsatz der Membrantechnik (MIKROMEM) – Phase 1. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- ROEDIGER, H.; ROEDIGER, M.; KAPP, H. (1990): Anaerobe alkalische Schlammfäulung. 4. Aufl. München: Oldenbourg
- ROTT, U.; MENZEL, U.; SCHÖLPPLE, S. (2009): Kostengünstige und flexible Behandlung von problematischen Abwässern am Beispiel von Deponiesickerwasser. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Bildung und Forschung, http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/02WA0702_-_Abschlussbericht.pdf (Zugriff: Mai 2015)
- THIEMIG, C. (2011): Die Bedeutung der Filtrationseigenschaften von belebten Schlämmen beim Betrieb von Membranbioreaktoren. Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Dissertation Aachen 2011, ISBN 978-3-938996-32-4
- THOMANN, M. (2013): Versuchsaufbau und erzielte Resultate beim Großversuch. Vortrag am 15. November 2013 in Wetzikon. Im Internet unter: http://www.umtec.ch/fileadmin/user_upload/umtec.hsr.ch/Dokumente/News/131115_Versuchsaufbau_und_erzielte_Resultate_beim_Grossversuch_Thomann.pdf. (Zugriff: 23.03.2014)
- UMWELTBUNDESAMT (2010): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009. Berlin

- UMWELTBUNDESAMT (2013): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012
- VROM (2008): Op weg naar een klimaneutrale waterketen. Studie im Auftrag des Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, ISBN 978.90.5773.411.3
- WANG, Z.; WU, Z.; TANG, S. (2010): Impact of Temperature Seasonal Change on Sludge Characteristics and Membrane Fouling in a Submerged Membrane Bioreactor, *Separation Science and Technology*, 45:7, 920-927, DOI: 10.1080/01496391003656974
- WERNING, J. (1994): Einstufige und zweistufige anaerobe Verfahrenstechnik zur biologischen Klärschlammstabilisierung mit Biomasseanreicherung. Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. M. Dohmann, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Dissertation Aachen 1994, ISSN 0342-6068
- ZWICKENPFLUG, B.; BÖHLER, M.; STERKELE, B.; JOSS, A.; SIEGRIST, H.; TRABER, J.; GUJER, W.; BEHL, M.; DORUSCH, F.; HOLLENDER, J.; TERNES, T. UND FINK, G. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Abschlussbericht im Internet unter: http://www.eawag.ch/forschung/eng/projects/Projects_Wastewater/strategie_micropol/pak_eawag/Abschlussbericht_MicroPoll_PAK.pdf. (Zugriff: 23.03.2014).

Anhang

Anhang A: Modellanlagen

Tabelle A.1: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage - Gasanfall

		Anschluss
Einwohnerwerte		14.000 [E]
Faulbehältervolumen	V_F	800 [m ³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t_{bem}	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t_{mittel}	27 [d]
<u>Gasanfall</u>		
<u>Primärschlamm aus Vorklärung</u>		
TS Anfall Primärschlamm	TS_{PS}	0 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	TS_{PS}	0 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Primärschlamm	TS_{PS}	0,0 [%]
Glühverlust	GV_{PS}	0,0 [%]
Fracht oTR	oTR_{PS}	0,0 [kg _{oTR} /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	t_R	1,1 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
spezifische Gasproduktion PS	$Gas_{,PS}$	0,0 [l/kg _{oTR}]
<u>Schlamm aus BB / MBR</u>		
Schlammanfall		5,3 [l/(E·d)]
TS Anfall ÜSS	$TS_{ÜSS}$	31 [g/(E·d)]
Fracht TS ÜSS	$TS_{ÜSS}$	439 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	0,7 [%]
Glühverlust	$GV_{ÜSS}$	69,7 [%]
Fracht oTR	$oTR_{ÜSS}$	306 [kg _{oTR} /d]
spezifische Gasproduktion ÜS	$Gas_{,ÜS}$	263,6 [l/kg _{oTR}]
<u>Rohschlamm gemischt und statisch eingedickt</u>		
Fracht TS RS	TS_{RS}	439 [kg _{TS} /d]
Fracht oTR RS	oTR_{RS}	306 [kg _{oTR} /d]
Rohschlammmenge	m_{TS}	0,4 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	TS_{RS}	4 [%]
Rohschlammvolumenstrom	Q_{RS}	11 [m ³ /d]
Gasausbeute Richtwert	Gas	415 [l/kg _{oTR}]
Gasertrag gesamt	Q_{Gas}	81 [m ³ /d]

Tabelle A.2: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage - Stromerzeugung BHKW

		Anschluss
Einwohnerwerte	EW	14.000 [E]
Gasproduktion Faulung, Tagesmittelwert	Q_{Gas}	81 [m ³ /d]
eletrischer Wirkungsgrad BHKW	η_{el}	0,35 [-]
thermischer Wirkungsgrad BHKW	η_{th}	0,49 [-]
Heizwert Faulgas	H_{U}	6,4 [kWh/Nm ³]
mittlere elektische Leistung	$P_{\text{el.mitt}}$	8 [kW]
Faktor Leistungsverminderung Teillastbetrieb	η_{Teillast}	10 [%]
Energieerzeugung	$Q_{\text{el,d}}$	163 [kWh/d]
Wärmeerzeugung aus BHKW pro Jahr	$Q_{\text{W,a}}$	92,3 [MWh/a]
Energieerzeugung pro Jahr	$Q_{\text{el,a}}$	59.331 [kWh/a]
Energieerzeugung spezifisch	$Q_{\text{el,a}}$	0,045 [kWh/m ³]

Tabelle A.3: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage - gesamter Energiebedarf

Verbraucher	Modellanlage 14.000 E	
Hebwerke	13,63	[Wh/m ³]
Rechen	0,80	[Wh/m ³]
Sandfang	7,84	[Wh/m ³]
Vorklärung	4,70	[Wh/m ³]
Belüftung Crossflow	240,57	[Wh/m ³]
Rezipumpen intern	5,84	[Wh/m ³]
Rezipumpen Membran	11,68	[Wh/m ³]
Permeatpumpen	7,40	[Wh/m ³]
Belüftung BB	120,71	[Wh/m ³]
Rührwerke	10,63	[Wh/m ³]
Voreindickung	7,23	[Wh/m ³]
Faulung	6,08	[Wh/m ³]
Entwässerung	7,77	[Wh/m ³]
Infrastruktur	16,92	[Wh/m ³]
Summe:	461,79	[Wh/m³]

Tabelle A.4: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage - Gasanfall

		Anschluss
Einwohnerwerte		14.000 [E]
Faulbehältervolumen	V_F	800 [m ³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t_{bem}	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t_{mittel}	27 [d]
<u>Gasanfall</u>		
<u>Primärschlamm aus Vorklärung</u>		
TS Anfall Primärschlamm	TS_{PS}	0 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	TS_{PS}	0 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Primärschlamm	TS_{PS}	0,0 [%]
Glühverlust	GV_{PS}	0,0 [%]
Fracht oTR	oTR_{PS}	0,0 [kg _{oTR} /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	t_R	1,1 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
spezifische Gasproduktion PS	$Gas_{,PS}$	0,0 [l/kg _{oTR}]
<u>Schlamm aus BB / MBR</u>		
Schlammanfall		4,6 [l/(E·d)]
TS Anfall ÜSS	$TS_{ÜSS}$	33 [g/(E·d)]
Fracht TS ÜSS	$TS_{ÜSS}$	469 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	0,5 [%]
Glühverlust	$GV_{ÜSS}$	65,7 [%]
Fracht oTR	$oTR_{ÜSS}$	308 [kg _{oTR} /d]
spezifische Gasproduktion ÜS	$Gas_{,ÜS}$	306,9 [l/kg _{oTR}]
<u>Rohschlamm gemischt und statisch eingedickt</u>		
Fracht TS RS	TS_{RS}	469 [kg _{TS} /d]
Fracht oTR RS	oTR_{RS}	308 [kg _{oTR} /d]
Rohschlammmenge	m_{TS}	0,47 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	TS_{RS}	4 [%]
Rohschlammvolumenstrom	Q_{RS}	12 [m ³ /d]
Gasausbeute Richtwert	Gas	415 [l/kg _{oTR}]
Gasertrag gesamt	Q_{Gas}	94 [m ³ /d]

Tabelle A.5: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage – Stromerzeugung BHKW

		Anschluss
Einwohnerwerte	EW	14.000 [E]
Gasproduktion Faulung, Tagesmittelwert	Q_{Gas}	94 [m ³ /d]
elektrischer Wirkungsgrad BHKW	η_{el}	0,35 [-]
thermischer Wirkungsgrad BHKW	η_{th}	0,49 [-]
Heizwert Faulgas	H_{U}	6,4 [kWh/Nm ³]
mittlere elektrische Leistung	$P_{\text{el.mitt}}$	9 [kW]
Faktor Leistungsverminderung Teillastbetrieb	η_{Teillast}	10 [%]
Energieerzeugung	$Q_{\text{el,d}}$	190 [kWh/d]
Wärmeerzeugung aus BHKW pro Jahr	$Q_{\text{W,a}}$	108,1 [MWh/a]
Energieerzeugung pro Jahr	$Q_{\text{el,a}}$	69.495 [kWh/a]
Energieerzeugung spezifisch	$Q_{\text{el,a}}$	0,053 [kWh/m ³]

Tabelle A.6: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage - gesamter Energiebedarf

Verbraucher	Modellanlage 14.000 E	
Hebewerke	13,63	[Wh/m ³]
Rechen	0,80	[Wh/m ³]
Sandfang	7,84	[Wh/m ³]
Vorklärung	4,70	[Wh/m ³]
Belüftung Crossflow	240,57	[Wh/m ³]
Rezipumpen intern	5,84	[Wh/m ³]
Rezipumpen Membran	11,68	[Wh/m ³]
Permeatpumpen	7,40	[Wh/m ³]
Belüftung BB	117,62	[Wh/m ³]
Rührwerke	6,88	[Wh/m ³]
Voreindickung	7,34	[Wh/m ³]
Faulung	6,50	[Wh/m ³]
Entwässerung	7,77	[Wh/m ³]
Infrastruktur	16,92	[Wh/m ³]
Summe:	455,49	[Wh/m³]

Tabelle A.7: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage – Gasanfall

		Anschluss
Einwohnerwerte		14.000 [E]
Faulbehältervolumen	V_F	800 [m ³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t_{bem}	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t_{mittel}	27 [d]
<u>Gasanfall</u>		
<u>Primärschlamm aus Vorklärung</u>		
TS Anfall Primärschlamm	TS_{PS}	32 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	TS_{PS}	448 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Primärschlamm	TS_{PS}	1,4 [%]
Glühverlust	GV_{PS}	75,4 [%]
Fracht oTR	oTR_{PS}	338,0 [kg _{oTR} /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	t_R	1,1 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
spezifische Gasproduktion PS	$Gas_{,PS}$	599,6 [l/kg _{oTR}]
<u>Schlamm aus BB / MBR</u>		
Schlammanfall		5,3 [l/(E·d)]
TS Anfall ÜSS	$TS_{ÜSS}$	31 [g/(E·d)]
Fracht TS ÜSS	$TS_{ÜSS}$	439 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	0,7 [%]
Glühverlust	$GV_{ÜSS}$	69,6 [%]
Fracht oTR	$oTR_{ÜSS}$	305 [kg _{oTR} /d]
spezifische Gasproduktion ÜS	$Gas_{,ÜS}$	263,6 [l/kg _{oTR}]
<u>Rohschlamm gemischt und statisch eingedickt</u>		
Fracht TS RS	TS_{RS}	887 [kg _{TS} /d]
Fracht oTR RS	oTR_{RS}	643 [kg _{oTR} /d]
Rohschlammmenge	m_{TS}	0,9 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	TS_{RS}	4 [%]
Rohschlammvolumenstrom	Q_{RS}	22 [m ³ /d]
Gasausbeute Richtwert	Gas	415 [l/kg _{oTR}]
Gasertrag gesamt	Q_{Gas}	283 [m ³ /d]

Tabelle A.8: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage – Stromerzeugung BHKW

		Anschluss
Einwohnerwerte	EW	14.000 [E]
Gasproduktion Faulung, Tagesmittelwert	Q_{Gas}	283 [m ³ /d]
eletrischer Wirkungsgrad BHKW	η_{el}	0,35 [-]
thermischer Wirkungsgrad BHKW	η_{th}	0,49 [-]
Heizwert Faulgas	H_{U}	6,4 [kWh/Nm ³]
mittlere elektische Leistung	$P_{\text{el.mitt}}$	26 [kW]
Faktor Leistungsverminderung Teillastbetrieb	η_{Teillast}	10 [%]
Energieerzeugung	$Q_{\text{el,d}}$	571 [kWh/d]
Wärmeerzeugung aus BHKW pro Jahr	$Q_{\text{W,a}}$	324,1 [MWh/a]
Energieerzeugung pro Jahr	$Q_{\text{el,a}}$	208.339 [kWh/a]
Energieerzeugung spezifisch	$Q_{\text{el,a}}$	0,158 [kWh/m ³]

Tabelle A.9: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage - gesamter Energiebedarf

Verbraucher	Modellanlage 14.000 E	
Hebewerke	13,63	[Wh/m ³]
Rechen	0,80	[Wh/m ³]
Sandfang	7,84	[Wh/m ³]
Vorklärung	4,70	[Wh/m ³]
Belüftung Crossflow	240,57	[Wh/m ³]
Rezipumpen intern	5,84	[Wh/m ³]
Rezipumpen Membran	11,68	[Wh/m ³]
Permeatpumpen	7,40	[Wh/m ³]
Belüftung BB	120,71	[Wh/m ³]
Rührwerke	10,63	[Wh/m ³]
Voreindickung	6,76	[Wh/m ³]
Faulung	12,30	[Wh/m ³]
Entwässerung	7,77	[Wh/m ³]
Infrastruktur	16,92	[Wh/m ³]
Summe:	467,54	[Wh/m³]

Tabelle A.10: 14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage – Gasanfall

		Anschluss
Einwohnerwerte		14.000 [E]
Faulbehältervolumen	V_F	800 [m ³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t_{bem}	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t_{mittel}	27 [d]
<u>Gasanfall</u>		
<u>Primärschlamm aus Vorklärung</u>		
TS Anfall Primärschlamm	TS_{PS}	32 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	TS_{PS}	448 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Primärschlamm	TS_{PS}	0,7 [%]
Glühverlust	GV_{PS}	76,0 [%]
Fracht oTR	oTR_{PS}	340,3 [kg _{oTR} /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	t_R	1,1 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
spezifische Gasproduktion PS	$Gas_{,PS}$	599,6 [l/kg _{oTR}]
<u>Schlamm aus BB / MBR</u>		
Schlammanfall		4,6 [l/(E·d)]
TS Anfall ÜSS	$TS_{ÜSS}$	33 [g/(E·d)]
Fracht TS ÜSS	$TS_{ÜSS}$	469 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	1,1 [%]
Glühverlust	$GV_{ÜSS}$	75,2 [%]
Fracht oTR	$oTR_{ÜSS}$	353 [kg _{oTR} /d]
spezifische Gasproduktion ÜS	$Gas_{,ÜS}$	315,2 [l/kg _{oTR}]
<u>Rohschlamm gemischt und statisch eingedickt</u>		
Fracht TS RS	TS_{RS}	917 [kg _{TS} /d]
Fracht oTR RS	oTR_{RS}	693 [kg _{oTR} /d]
Rohschlammmenge	m_{TS}	0,92 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	TS_{RS}	4 [%]
Rohschlammvolumenstrom	Q_{RS}	23 [m ³ /d]
Gasausbeute Richtwert	Gas	415 [l/kg _{oTR}]
Gasertrag gesamt	Q_{Gas}	315 [m ³ /d]

Tabelle A.11:14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage – Stromerzeugung BHKW

		Anschluss
Einwohnerwerte	EW	14.000 [E]
Gasproduktion Faulung, Tagesmittelwert	Q_{Gas}	315 [m ³ /d]
eletrischer Wirkungsgrad BHKW	η_{el}	0,35 [-]
thermischer Wirkungsgrad BHKW	η_{th}	0,49 [-]
Heizwert Faulgas	H_{U}	6,4 [kWh/Nm ³]
mittlere elektische Leistung	$P_{\text{el.mitt}}$	29 [kW]
Faktor Leistungsverminderung Teillastbetrieb	η_{Teillast}	10 [%]
Energieerzeugung	$Q_{\text{el,d}}$	635 [kWh/d]
Wärmeerzeugung aus BHKW pro Jahr	$Q_{\text{W,a}}$	360,8 [MWh/a]
Energieerzeugung pro Jahr	$Q_{\text{el,a}}$	231.915 [kWh/a]
Energieerzeugung spezifisch	$Q_{\text{el,a}}$	0,176 [kWh/m ³]

Tabelle A.12:14.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage - gesamter Energiebedarf

Verbraucher	Modellanlage 14.000 E	
Hebewerke	13,63	[Wh/m ³]
Rechen	0,80	[Wh/m ³]
Sandfang	7,84	[Wh/m ³]
Vorklärung	4,70	[Wh/m ³]
Belüftung Crossflow	240,57	[Wh/m ³]
Rezipumpen intern	5,84	[Wh/m ³]
Rezipumpen Membran	11,68	[Wh/m ³]
Permeatpumpen	7,40	[Wh/m ³]
Belüftung BB	117,62	[Wh/m ³]
Rührwerke	6,88	[Wh/m ³]
Voreindickung	7,34	[Wh/m ³]
Faulung	12,71	[Wh/m ³]
Entwässerung	7,77	[Wh/m ³]
Infrastruktur	16,92	[Wh/m ³]
Summe:	461,70	[Wh/m³]

Tabelle A.13: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage – Gasanfall

		Anschluss
Einwohnerwerte		100.000 [E]
Faulbehältervolumen	V_F	4.300 [m ³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t_{bem}	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t_{mittel}	27 [d]
<u>Gasanfall</u>		
<u>Primärschlamm aus Vorklärung</u>		
TS Anfall Primärschlamm	TS_{PS}	0 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	TS_{PS}	0 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Primärschlamm	TS_{PS}	0,0 [%]
Glühverlust	GV_{PS}	0,0 [%]
Fracht oTR	oTR_{PS}	0,0 [kg _{oTR} /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	t_R	1,0 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
spezifische Gasproduktion PS	$Gas_{,PS}$	0,0 [l/kg _{oTR}]
<u>Schlamm aus BB / MBR</u>		
Schlammanfall		5,3 [l/(E·d)]
TS Anfall ÜSS	$TS_{ÜSS}$	35 [g/(E·d)]
Fracht TS ÜSS	$TS_{ÜSS}$	3.514 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	0,7 [%]
Glühverlust	$GV_{ÜSS}$	69,7 [%]
Fracht oTR	$oTR_{ÜSS}$	2.450 [kg _{oTR} /d]
spezifische Gasproduktion ÜS	$Gas_{,ÜS}$	263,6 [l/kg _{oTR}]
<u>Rohschlamm gemischt und statisch eingedickt</u>		
Fracht TS RS	TS_{RS}	3.514 [kg _{TS} /d]
Fracht oTR RS	oTR_{RS}	2.450 [kg _{oTR} /d]
Rohschlammmenge	m_{TS}	3,5 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	TS_{RS}	4 [%]
Rohschlammvolumenstrom	Q_{RS}	88 [m ³ /d]
Gasausbeute Richtwert	Gas	264 [l/kg _{oTR}]
Gasertrag gesamt	Q_{Gas}	646 [m ³ /d]

Tabelle A.14: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage – Stromerzeugung BHKW

		Anschluss
Einwohnerwerte	E	100.000 [E]
Gasproduktion Faulung, Tagesmittelwert	Q_{Gas}	646 [m ³ /d]
elektrischer Wirkungsgrad BHKW	η_{el}	0,35 [-]
thermischer Wirkungsgrad BHKW	η_{th}	0,49 [-]
Heizwert Faulgas	H_{U}	6,4 [kWh/Nm ³]
mittlere elektrische Leistung	$P_{\text{el.mitt}}$	60 [kW]
Faktor Leistungsverminderung Teillastbetrieb	η_{Teillast}	10 [%]
Energieerzeugung	$Q_{\text{el,d}}$	1.302 [kWh/d]
Wärmeerzeugung aus BHKW pro Jahr	$Q_{\text{W,a}}$	739 [MWh/a]
Energieerzeugung pro Jahr	$Q_{\text{el,a}}$	475.212 [kWh/a]
Energieerzeugung spezifisch	$Q_{\text{el,a}}$	0,053 [kWh/m ³]

Tabelle A.15: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 1 – 25 Tage - gesamter Energiebedarf

Verbraucher	Modellanlage 100.000 E	
Hebwerke	13,63	[Wh/m ³]
Rechen	0,80	[Wh/m ³]
Sandfang	5,09	[Wh/m ³]
Vorklärung	4,70	[Wh/m ³]
Belüftung Crossflow	240,57	[Wh/m ³]
Rezipumpen intern	5,84	[Wh/m ³]
Rezipumpen Membran	11,68	[Wh/m ³]
Permeatpumpen	7,40	[Wh/m ³]
Belüftung BB	103,40	[Wh/m ³]
Rührwerke	12,25	[Wh/m ³]
Voreindickung	8,52	[Wh/m ³]
Faulung	7,17	[Wh/m ³]
Entwässerung	8,16	[Wh/m ³]
Infrastruktur	17,78	[Wh/m ³]
Summe:	446,98	[Wh/m³]

Tabelle A.16: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage – Gasanfall

		Anschluss
Einwohnerwerte		100.000 [E]
Faulbehältervolumen	V_F	4.300 [m ³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t_{bem}	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t_{mittel}	27 [d]
<u>Gasanfall</u>		
<u>Primärschlamm aus Vorklärung</u>		
TS Anfall Primärschlamm	TS_{PS}	0,0 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	TS_{PS}	0 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Primärschlamm	TS_{PS}	0,0 [%]
Glühverlust	GV_{PS}	0,0 [%]
Fracht oTR	oTR_{PS}	0,0 [kg _{oTR} /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	t_R	0,0 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
spezifische Gasproduktion PS	$Gas_{,PS}$	599,6 [l/kg _{oTR}]
<u>Schlamm aus BB / MBR</u>		
Schlammanfall		9,3 [l/(E·d)]
TS Anfall ÜSS	$TS_{ÜSS}$	37 [g/(E·d)]
Fracht TS ÜSS	$TS_{ÜSS}$	3.749 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	0,5 [%]
Glühverlust	$GV_{ÜSS}$	65,7 [%]
Fracht oTR	$oTR_{ÜSS}$	2.462 [kg _{oTR} /d]
spezifische Gasproduktion ÜS	$Gas_{,ÜS}$	306,9 [l/kg _{oTR}]
<u>Rohschlamm gemischt und statisch eingedickt</u>		
Fracht TS RS	TS_{RS}	3.749 [kg _{TS} /d]
Fracht oTR RS	oTR_{RS}	2.462 [kg _{oTR} /d]
Rohschlammmenge	m_{TS}	3,7 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	TS_{RS}	4 [%]
Rohschlammvolumenstrom	Q_{RS}	94 [m ³ /d]
Gasausbeute Richtwert	Gas	307 [l/kg _{oTR}]
Gasertrag gesamt	Q_{Gas}	756 [m ³ /d]

Tabelle A.17: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage – Stromerzeugung BHKW

		Anschluss
Einwohnerwerte	E	100.000 [E]
Gasproduktion Faulung, Tagesmittelwert	Q_{Gas}	756 [m ³ /d]
elektrischer Wirkungsgrad BHKW	η_{el}	0,35 [-]
thermischer Wirkungsgrad BHKW	η_{th}	0,49 [-]
Heizwert Faulgas	H_{U}	6,4 [kWh/Nm ³]
mittlere elektische Leistung	$P_{\text{el.mitt}}$	71 [kW]
Faktor Leistungsverminderung Teillastbetrieb	η_{Teillast}	10 [%]
Energieerzeugung	$Q_{\text{el,d}}$	1.523 [kWh/d]
Wärmeerzeugung aus BHKW pro Jahr	$Q_{\text{W,a}}$	865 [MWh/a]
Energieerzeugung pro Jahr	$Q_{\text{el,a}}$	555.978 [kWh/a]
Energieerzeugung spezifisch	$Q_{\text{el,a}}$	0,0622 [kWh/m ³]

Tabelle A.18: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 2 – 15 Tage - gesamter Energiebedarf

Verbraucher	Modellanlage 100.000 E	
Hebwerke	13,63	[Wh/m ³]
Rechen	0,80	[Wh/m ³]
Sandfang	5,09	[Wh/m ³]
Vorklärung	4,70	[Wh/m ³]
Belüftung Crossflow	240,57	[Wh/m ³]
Rezipumpen intern	5,84	[Wh/m ³]
Rezipumpen Membran	11,68	[Wh/m ³]
Permeatpumpen	7,40	[Wh/m ³]
Belüftung BB	98,92	[Wh/m ³]
Rührwerke	7,90	[Wh/m ³]
Voreindickung	7,71	[Wh/m ³]
Faulung	7,65	[Wh/m ³]
Entwässerung	8,16	[Wh/m ³]
Infrastruktur	17,78	[Wh/m ³]
Summe:	437,83	[Wh/m³]

Tabelle A.19:100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage – Gasanfall

		Anschluss
Einwohnerwerte		100.000 [E]
Faulbehältervolumen	V_F	4.300 [m ³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t_{bem}	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t_{mittel}	27 [d]
<u>Gasanfall</u>		
<u>Primärschlamm aus Vorklärung</u>		
TS Anfall Primärschlamm	TS_{PS}	32 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	TS_{PS}	3.200 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Primärschlamm	TS_{PS}	1,4 [%]
Glühverlust	GV_{PS}	75,4 [%]
Fracht oTR	oTR_{PS}	2.414,3 [kg _{oTR} /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	t_R	1,0 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
spezifische Gasproduktion PS	$Gas_{,PS}$	599,6 [l/kg _{oTR}]
<u>Schlamm aus BB / MBR</u>		
Schlammanfall		5,3 [l/(E·d)]
TS Anfall ÜSS	$TS_{ÜSS}$	35 [g/(E·d)]
Fracht TS ÜSS	$TS_{ÜSS}$	3.513 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	0,7 [%]
Glühverlust	$GV_{ÜSS}$	69,6 [%]
Fracht oTR	$oTR_{ÜSS}$	2.444 [kg _{oTR} /d]
spezifische Gasproduktion ÜS	$Gas_{,ÜS}$	263,6 [l/kg _{oTR}]
<u>Rohschlamm gemischt und statisch eingedickt</u>		
Fracht TS RS	TS_{RS}	6.713 [kg _{TS} /d]
Fracht oTR RS	oTR_{RS}	4.858 [kg _{oTR} /d]
Rohschlammmenge	m_{TS}	6,7 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	TS_{RS}	4 [%]
Rohschlammvolumenstrom	Q_{RS}	168 [m ³ /d]
Gasausbeute Richtwert	Gas	415 [l/kg _{oTR}]
Gasertrag gesamt	Q_{Gas}	2.092 [m ³ /d]

Tabelle A.20: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage – Stromerzeugung BHKW

		Anschluss
Einwohnerwerte	E	100.000 [E]
Gasproduktion Faulung, Tagesmittelwert	Q_{Gas}	2.092 [m ³ /d]
elektrischer Wirkungsgrad BHKW	η_{el}	0,35 [-]
thermischer Wirkungsgrad BHKW	η_{th}	0,49 [-]
Heizwert Faulgas	H_{U}	6,4 [kWh/Nm ³]
mittlere elektrische Leistung	$P_{\text{el.mitt}}$	195 [kW]
Faktor Leistungsverminderung Teillastbetrieb	η_{Teillast}	10 [%]
Energieerzeugung	$Q_{\text{el,d}}$	4.218 [kWh/d]
Wärmeerzeugung aus BHKW pro Jahr	$Q_{\text{W,a}}$	2.395 [MWh/a]
Energieerzeugung pro Jahr	$Q_{\text{el,a}}$	1.539.394 [kWh/a]
Energieerzeugung spezifisch	$Q_{\text{el,a}}$	0,172 [kWh/m ³]

Tabelle A.21: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 3 – 25 Tage - gesamter Energiebedarf

Verbraucher	Modellanlage 100.000 E	
Hebwerke	13,63	[Wh/m ³]
Rechen	0,80	[Wh/m ³]
Sandfang	5,09	[Wh/m ³]
Vorklärung	4,70	[Wh/m ³]
Belüftung Crossflow	240,57	[Wh/m ³]
Rezipumpen intern	5,84	[Wh/m ³]
Rezipumpen Membran	11,68	[Wh/m ³]
Permeatpumpen	7,40	[Wh/m ³]
Belüftung BB	103,40	[Wh/m ³]
Rührwerke	12,25	[Wh/m ³]
Voreindickung	7,97	[Wh/m ³]
Faulung	13,70	[Wh/m ³]
Entwässerung	8,16	[Wh/m ³]
Infrastruktur	17,78	[Wh/m ³]
Summe:	452,96	[Wh/m³]

Tabelle A.22: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage – Gasanfall

		Anschluss
Einwohnerwerte		100.000 [E]
Faulbehältervolumen	V_F	4.300 [m ³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t_{bem}	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t_{mittel}	27 [d]
<u>Gasanfall</u>		
<u>Primärschlamm aus Vorklärung</u>		
TS Anfall Primärschlamm	TS_{PS}	32,0 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	TS_{PS}	3.200 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Primärschlamm	TS_{PS}	0,7 [%]
Glühverlust	GV_{PS}	76,0 [%]
Fracht oTR	oTR_{PS}	2.430,8 [kg _{oTR} /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	t_R	1,0 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
spezifische Gasproduktion PS	$Gas_{,PS}$	599,6 [l/kg _{oTR}]
<u>Schlamm aus BB / MBR</u>		
Schlammanfall		4,6 [l/(E·d)]
TS Anfall ÜSS	$TS_{ÜSS}$	37 [g/(E·d)]
Fracht TS ÜSS	$TS_{ÜSS}$	3.749 [kg _{TS} /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	1,1 [%]
Glühverlust	$GV_{ÜSS}$	75,2 [%]
Fracht oTR	$oTR_{ÜSS}$	2.820 [kg _{oTR} /d]
spezifische Gasproduktion ÜS	$Gas_{,ÜS}$	315,2 [l/kg _{oTR}]
<u>Rohschlamm gemischt und statisch eingedickt</u>		
Fracht TS RS	TS_{RS}	6.949 [kg _{TS} /d]
Fracht oTR RS	oTR_{RS}	5.251 [kg _{oTR} /d]
Rohschlammmenge	m_{TS}	6,9 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	TS_{RS}	4 [%]
Rohschlammvolumenstrom	Q_{RS}	174 [m ³ /d]
Gasausbeute Richtwert	Gas	415 [l/kg _{oTR}]
Gasertrag gesamt	Q_{Gas}	2.346 [m ³ /d]

Tabelle A.23: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage – Stromerzeugung BHKW

		Anschluss
Einwohnerwerte	E	100.000 [E]
Gasproduktion Faulung, Tagesmittelwert	Q_{Gas}	2.346 [m ³ /d]
elektrischer Wirkungsgrad BHKW	η_{el}	0,35 [-]
thermischer Wirkungsgrad BHKW	η_{th}	0,49 [-]
Heizwert Faulgas	H_{U}	6,4 [kWh/Nm ³]
mittlere elektische Leistung	$P_{\text{el.mitt}}$	219 [kW]
Faktor Leistungsverminderung Teillastbetrieb	η_{Teillast}	10 [%]
Energieerzeugung	$Q_{\text{el,d}}$	4.730 [kWh/d]
Wärmeerzeugung aus BHKW pro Jahr	$Q_{\text{W,a}}$	2.686 [MWh/a]
Energieerzeugung pro Jahr	$Q_{\text{el,a}}$	1.726.627 [kWh/a]
Energieerzeugung spezifisch	$Q_{\text{el,a}}$	0,1931 [kWh/m ³]

Tabelle A.24: 100.000 E Modellanlage - Versuchsreihe 4 – 15 Tage - gesamter Energiebedarf

Verbraucher	Modellanlage 100.000 E	
Hebewerke	13,63	[Wh/m ³]
Rechen	0,80	[Wh/m ³]
Sandfang	5,09	[Wh/m ³]
Vorklärung	4,70	[Wh/m ³]
Belüftung Crossflow	240,57	[Wh/m ³]
Rezipumpen intern	5,84	[Wh/m ³]
Rezipumpen Membran	11,68	[Wh/m ³]
Permeatpumpen	7,40	[Wh/m ³]
Belüftung BB	98,92	[Wh/m ³]
Rührwerke	7,90	[Wh/m ³]
Voreindickung	7,71	[Wh/m ³]
Faulung	14,18	[Wh/m ³]
Entwässerung	8,16	[Wh/m ³]
Infrastruktur	17,78	[Wh/m ³]
Summe:	444,36	[Wh/m³]

Anhang B: Kosten nach Lawa

Tabelle B.1: Kosten 14.000 E Anlage nach Lawa

EnReMem Vergleich der Modellkläranlagen Kostenvergleichsrechnung											
Durchschnittliche Nutzungsdauern nach den LAWA-Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen (2005):											
Inbetriebnahme Anlagenenergieerweiterung: 2014 Untersuchungszeitraum / Planungshorizont : 10 Jahre Bezugszeitpunkt D/FAKE : 0 Jahre Nutzungsdauer Bautechnik: 40 Jahre Nutzungsdauer M-Technik + E-/MSR-Technik: 15 Jahre Nutzungsdauer Membranen : 10 Jahre Realzinssatz i : 3,0 % p.a. Reale jährliche Preissteigerungsraten für die laufenden Energiekosten: 0,0 % p.a. Reale jährliche Preissteigerungsraten für alle übrigen Kosten: 0,0 % p.a. Die Investitionskosten werden zum Bezugszeitpunkt betrachtet. Alle Kosten netto											
Eingangsdaten		Versuchsreihe 1 Modellkläranlage 14.000 EW		Versuchsreihe 2 Modellkläranlage 14.000 EW		Versuchsreihe 3 Modellkläranlage 14.000 EW		Versuchsreihe 4 Modellkläranlage 14.000 EW			
		EP	GP	EP	GP	EP	GP	EP	GP		
Kosten Sanierung der ÜSS-Eindickung											
Menge											
A) Investitionen											
A1.1 Bautechnik											
		4.971.330 €		4.874.220 €		4.971.330 €		4.874.220 €			
A1.2 Maschinenteknik ohne Membranen											
		3.441.690 €		3.374.460 €		3.441.690 €		3.374.460 €			
A1.3 E-/MSR-Technik											
		1.657.110 €		1.624.740 €		1.657.110 €		1.624.740 €			
A1.4 Membranen											
		2.549.400 €		2.499.600 €		2.549.400 €		2.499.600 €			
A1.5 Nebenkosten											
		127.470 €		124.980 €		127.470 €		124.980 €			
Summe Investitionskosten:		12.747.000 €		12.498.000 €		12.747.000 €		12.498.000 €			
B) Laufende Kosten											
B1.1 Wartung, Instandsetzung											
		127.000 €		125.000 €		127.000 €		125.000 €			
B1.2 Personal											
		117.000 €		117.000 €		117.000 €		117.000 €			
B1.3 Energie											
		82.246 €		79.477 €		81.030 €		78.341 €			
B1.4 Betriebsmittel											
		41.000 €		41.000 €		41.000 €		41.000 €			
B1.5 Entsorgung											
		172.000 €		172.000 €		172.000 €		172.000 €			
B1.6 Sonstiges											
		5.000 €		5.000 €		5.000 €		5.000 €			
Summe Laufende Kosten:		544.246 €		539.477 €		523.030 €		516.341 €			
Aufbereitung der Kosten		Umrechnungs-faktor *)		Investitions-kosten [€ netto]		Jahreskosten [€ netto]		Investitions-kosten [€ netto]		Jahreskosten [€ netto]	
A) Investitionskosten IK											
		KFAKR									
A1.1 Bautechnik											
		0,0433		4.971.330 €		215.072 €		4.874.220 €		210.870 €	
A1.2 Maschinenteknik ohne Membranen											
		0,0838		3.441.690 €		288.299 €		3.374.460 €		282.667 €	
A1.3 E-/MSR-Technik											
		0,0838		1.657.110 €		136.810 €		1.624.740 €		136.099 €	
A1.4 Membranen											
		0,1172		2.549.400 €		298.867 €		2.499.600 €		293.029 €	
A1.5 Nebenkosten											
		0,0433		127.470 €		5.515 €		124.980 €		5.407 €	
Summe Investitionskosten:				12.747.000 €		5.515 €		12.498.000 €		5.407 €	
Jahreskosten JK				1.490.809 €		1.467.550 €		1.469.593 €		1.444.413 €	

Tabelle B.2: Kosten 100.000 E Anlage nach Lawa

EnReMem Vergleich der Modellkläranlagen Kostenvergleichsrechnung											
Durchschnittliche Nutzungsdauern nach den LAWA-Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen (2005):											
Inbetriebnahme Anlagenenergieerweiterung: 2014 Untersuchungszeitraum / Planungshorizont : 10 Jahre Bezugszeitpunkt D/FAKE : 0 Jahre Nutzungsdauer Bautechnik: 40 Jahre Nutzungsdauer M-Technik + E-/MSR-Technik: 15 Jahre Nutzungsdauer Membranen : 10 Jahre Realzinssatz i : 3,0 % p.a. Reale jährliche Preissteigerungsraten für die laufenden Energiekosten: 0,0 % p.a. Reale jährliche Preissteigerungsraten für alle übrigen Kosten: 0,0 % p.a. Die Investitionskosten werden zum Bezugszeitpunkt betrachtet. Alle Kosten netto											
Eingangsdaten		Versuchsreihe 1 Modellkläranlage 100.000 EW		Versuchsreihe 2 Modellkläranlage 100.000 EW		Versuchsreihe 3 Modellkläranlage 100.000 EW		Versuchsreihe 4 Modellkläranlage 100.000 EW			
		EP	GP	EP	GP	EP	GP	EP	GP		
Kosten Sanierung der ÜSS-Eindickung											
Menge											
A) Investitionen											
A1.1 Bautechnik											
		16.211.520 €		15.878.070 €		16.211.520 €		15.878.070 €			
A1.2 Maschinenteknik ohne Membranen											
		11.223.360 €		10.992.510 €		11.223.360 €		10.992.510 €			
A1.3 E-/MSR-Technik											
		5.403.840 €		5.292.690 €		5.403.840 €		5.292.690 €			
A1.4 Membranen											
		8.313.600 €		8.142.600 €		8.313.600 €		8.142.600 €			
A1.5 Nebenkosten											
		415.680 €		407.130 €		415.680 €		407.130 €			
Summe Investitionskosten:		41.568.000 €		40.713.000 €		41.568.000 €		40.713.000 €			
B) Laufende Kosten											
B1.1 Wartung, Instandsetzung											
		291.000 €		285.000 €		291.000 €		285.000 €			
B1.2 Personal											
		393.000 €		393.000 €		393.000 €		393.000 €			
B1.3 Energie											
		528.287 €		503.687 €		528.287 €		503.687 €			
B1.4 Betriebsmittel											
		160.000 €		160.000 €		160.000 €		160.000 €			
B1.5 Entsorgung											
		750.000 €		750.000 €		750.000 €		750.000 €			
B1.6 Sonstiges											
		22.000 €		22.000 €		22.000 €		22.000 €			
Summe Laufende Kosten:		2.144.287 €		2.113.898 €		1.992.687 €		1.947.061 €			
Aufbereitung der Kosten		Umrechnungs-faktor *)		Investitions-kosten [€ netto]		Jahreskosten [€ netto]		Investitions-kosten [€ netto]		Jahreskosten [€ netto]	
A) Investitionskosten IK											
		KFAKR									
A1.1 Bautechnik											
		0,0433		16.211.520 €		701.349 €		15.878.070 €		686.923 €	
A1.2 Maschinenteknik ohne Membranen											
		0,0838		11.223.360 €		940.142 €		10.992.510 €		920.805 €	
A1.3 E-/MSR-Technik											
		0,0838		5.403.840 €		452.661 €		5.292.690 €		443.351 €	
A1.4 Membranen											
		0,1172		8.313.600 €		954.561 €		8.142.600 €		954.561 €	
A1.5 Nebenkosten											
		0,0433		415.680 €		17.983 €		407.130 €		17.613 €	
Summe Investitionskosten:				41.568.000 €		17.983 €		40.713.000 €		17.613 €	
Jahreskosten JK				5.231.030 €		5.137.151 €		5.079.430 €		4.970.314 €	

Anhang C: Angebot Biogasfermenter

Behälter und Systemlösungen Tanks and System Solutions



Angebot Nr. : 5147

Seite: 1
Sachb.:

Pos.	Bezeichnung	Menge	EP / Euro	GP / Euro
1.0	LIPP- Biogasfermenter mit integriertem Gasspeicher im Modular-System, komplett, bestehend aus folgenden Komponenten und Zubehör:	1,00 St.	287.950,00	287.950,00

LIPP- Behälter

als Biogas- Reaktor aus Edelstahl 'Verinox',
Auflagewerkstoff 1.4571 für flüssiges,
pumpfähiges Medium, als oberirdischer,
zylindrischer Behälter

Behälterdurchmesser:	12,00 m
Behälterhöhe:	14,20 m
Füllhöhe:	10,90 m
Faulvolumen:	ca. 800 m ³
Betriebstemperatur im mesophilen Bereich:	30 - 42°C

weiteres Zubehör:

- Integrierte Gas- Speicherhaube ca. 300 m³
- Dach in Sparrenbauweise und Blecheindeckung.
Dach ist komplett hinterlüftet.
- Zulauf aus Edelstahl Stutzeneinbau DN 150,
Liefergrenze ist Schweißflansch nach DIN 2576
- Überlaufkasten am Behältermantel montiert, mit
Füllstandsregulierung. Kasten mit aufklappbarem
Deckel zur Reinigung. Anschluss für
bauseitige Schlammableitung ins Endlager
- Entleerrohr aus Edelstahl DN 150, außen mit
Anfahrerschutz und Doppelverschluss in verzinktem
Stahl
- Mannloch DN 800, hinter der Fassade eingebaut,
außen mit Hinweisschild versehen
- Gasentnahmestutzen Stutzeneinbau DN 150,
höchstmöglich montiert. Liefergrenze ist
Schweißflansch nach DIN 2576
- Drucksicherung mechanisch: mit am Gassack
montierten Zugfedern
- Drucksicherung hydraulisch: mit Wasservorlage
- 1 St. Simplex-Pumpsystem, bestehend aus Landia
Pumpe 18,5 kW

Behälter und Systemlösungen Tanks and System Solutions



UNIQUE.WORLDWIDE

Angebot Nr. : 5147

Seite: 2
Sachb.: K. Irrgang / rt

Pos.	Bezeichnung	Menge	EP / Euro	GP / Euro
------	-------------	-------	-----------	-----------

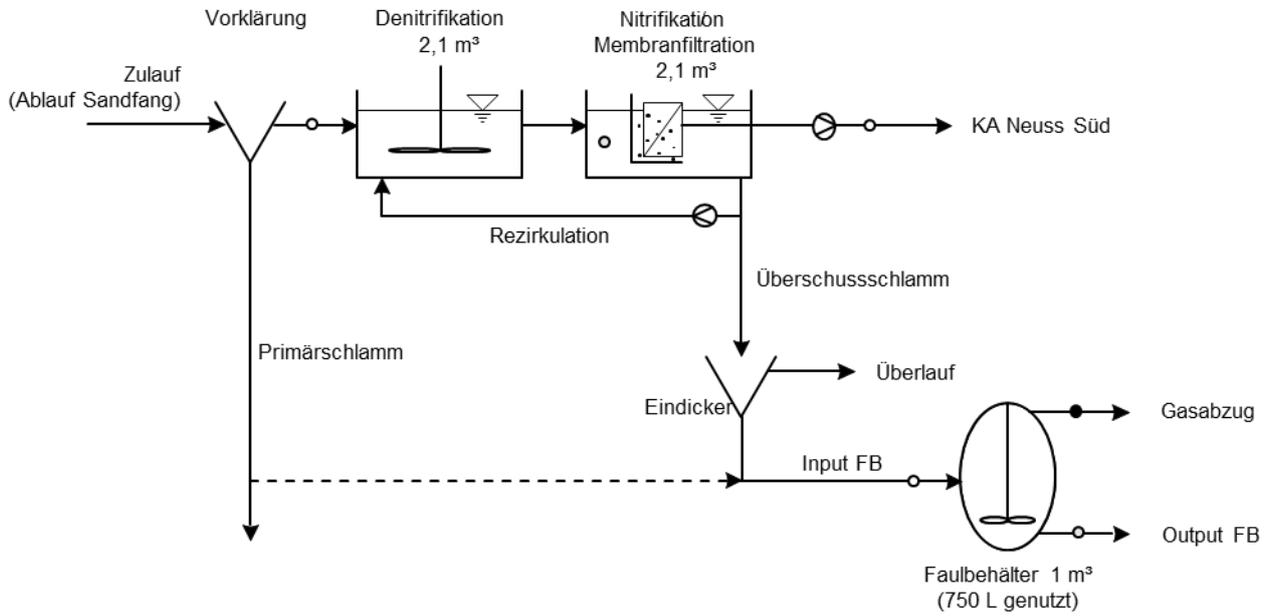
- 1 Stück Propellerrührwerk 18,5 kW, Hersteller Suma o. ähnlich, montiert unten an Behälterwand
 - 1 Stück Fallschacht, eingebaut im Behälterinnern.
 - Aufstiegsleiter mit Podest (1m x 0,5 m)
 - Gasinhaltsanzeige aus PE-Rohr mit innengeführtem Gewicht und Anzeige für Gasinhalt
 - 2 Stück Anschlüsse für Temperaturmessung, im Heizschacht eingebaut
 - Schauglasarmatur Ø 200 mm mit Reinigungsvorrichtung
 - Außenverkleidung inkl. Isolierung
- Behälter: mit 200 mm aluminiumkaschierter Mineralwolle isoliert und mit Stahl verz. Trapezblechverkleidet, lackiert im RAL-Farbtönen 6011 (grün)Fassade ist komplett hinterlüftet und gegen Eindringen von Ungeziefer und Vögeln geschützt.
- Dach: ausgelegt mit ca. 80 mm starken PU-Schaumplatten.

inkl. Montage ab OK Sohlplatte, einschl. Abdichtung zwischen Fundamentplatte und Behälterwand, inkl. olivgrüner Außenlackierung, inkl. Fundamentunterlagen und statischer Berechnung (als freistehender Behälter), ohne Fundamentplatte.

WEITERE BEDINGUNGEN ENTNEHMEN SIE BITTE BELIEGENDEM ANSCHREIBEN.

Anhang D: Darstellung der Versuchsanlagen

Versuchsstraße



Referenzstraße

