



Zur Erlangung des Grades eines Master of Engineering (M. Eng.)

Von Herrn Tim Reinecke

geboren am: 09.12.1990

in: Leipzig

vorgelegte Abschlussarbeit:

Thema: Erprobung eines Verfahrens zur Leistungssteigerung bei der Co-Vergärung und Analyse der Auswirkungen auf die Entwässerbarkeit (KA-Rosental)

Erstprüfer: Prof. Dr. Hilke Würdemann

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Peter Wirth

Merseburg, 4. Dezember 2015

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Literaturstellen angefertigt habe.

Tim Reinecke

Ort, Datum

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Hilke Würdemann, Herrn Prof. Dr. Michael Winkler und Herrn Dipl.-Ing. Peter Wirth dafür bedanken, meine Masterarbeit zu diesem interessanten Thema erstellen zu können, außerdem auch für die gute wissenschaftliche Betreuung.

Bei den Schichtmitarbeitern der Kläranlage Rosental möchte ich mich für das Übernehmen der Beschickung der Reaktoren an Wochenenden und Feiertagen bedanken.

Dr. Anne Kleyböcker sei gedankt für nützliche Hinweise zur Durchführung der Versuche und bei der photometrischen Analyse.

Heiko Hartmann danke ich für seine Schlosserarbeiten an der Versuchsanlage und den Schlammmentnahmestellen.

Ebenfalls bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Labors der Kläranlage Rosental für die Analysen der Proben und die Unterstützung während der Laborarbeit.

Abschließend danke ich meiner Familie und Freunden für die Unterstützung und Abwechslung während des gesamten Studiums.

Kurzfassung

Für die vorliegende Arbeit wurden Versuche zur Untersuchung der Wirksamkeit einer elektrokinetischen Desintegration durchgeführt, welche in das Rohrsystem direkt vor einem Bioreaktor eingebunden ist. Hierbei war das Ziel zu ermitteln, ob es zu Verbesserungen im Biogasprozess und der Entwässerbarkeit des resultierenden Faulschlammes kommt.

Für die Versuche wurde eine Technikumsanlage verwendet, die aus vier Reaktoren mit jeweils 200 l Volumen besteht. Zwei der Reaktoren wurden mit elektrokinetisch desintegriertem Rohschlamm beschickt, während die anderen beiden mit unbehandeltem Rohschlamm beschickt wurden. Über eine Versuchszeit von 56 Tagen, was ca. zwei Verweilzeiten entspricht, ergab sich zwischen den beiden Varianten kein bedeutender Unterschied in der Gesamtgasproduktion.

Auch bei der Entwässerbarkeit, welche mit einem CST-Messgerät eingeschätzt wurde, lag der Einfluss der elektrokinetischen Behandlung offenbar unter der Nachweisgrenze.

Im Anschluss an die Untersuchung der Wirkung der Desintegration wurde ein Frühwarnindikator als Parameter zur Prozesssteuerung getestet, welcher eine bevorstehende Übersäuerung in einem Bioreaktor frühzeitig anzeigen soll. Dieser Frühwarnindikator entspricht dem Quotienten aus der Konzentration organischer Säuren zu der Konzentration von Calcium. Dem gegenübergestellt wurde der FOS/TAC-Indikator.

Um mit Sicherheit das Anschlagen der Indikatoren beobachten zu können, wurde eine Versäuerung vorsätzlich herbeigeführt, indem die Raumbelastung schrittweise bis $14,8 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erhöht wurde.

Mit sprunghaft ansteigenden Werten deutete der FWI bevorstehende Übersäuerungen bis zu zwei Tage eher an als der FOS/TAC-Wert. Als Stabilisierungsmaßnahme wurde in diesem Fall mit Zugabe von Calciumoxid gegengesteuert, womit eine Übersäuerung bis zu einer gewissen Höhe der Raumbelastung verhindert werden konnte.

Besonders nach Zugabe großer Mengen Calciumoxid trat eine Aggregatbildung auf. Offenbar führte das zugesetzte Calcium zur Ausfällung von organischen Säuren und Phosphat.

Abstract

One of the aims of the investigations was to figure out how well the electrokinetic disintegration works. A laboratory plant with four bioreactors was used for the investigations. Two of the bioreactors were fed with treated sewage sludge and the other two bioreactors were fed with untreated sewage sludge. After 56 days the total amount of biogas of each bioreactor were compared. As result there was no significant difference in the amount of biogas production between the two variants. Furthermore the dewaterability of the digested sludges was compared with a CST measuring device, but the limit of detection was too high.

The second matter of this study was to test an early warning indicator (EWI) as control parameter for process stabilization. This EWI equals the quotient of the concentration of organic acids to the concentration of calcium. The organic loading rate (OLR) was raised up to $14,8 \text{ kg VS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ to get an over-acidification, that could be indicated. It was shown that the EWI can indicate an over-acidification up to two days earlier than the FOS/TAC-indicator. In the case of an indicated over-acidification, calcium oxide (CaO) was added to the reactor to stabilize the biogas process. When high amounts of CaO was used in a reactor, a formation of aggregates was noticed. Obviously the added calcium caused the precipitation of organic acids and phosphate.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Stand der Technik und Wissenschaft	3
2.1 Anaerober Abbauprozess organischer Stoffe	3
2.1.1 Stufen des Prozesses	3
2.1.2 Milieubedingungen	4
2.1.3 Überwachungsparameter	5
2.2 Optimierung des Biogasprozesses durch Desintegration	6
2.2.1 Nutzen und Unterteilung	6
2.2.2 Elektrokinetische Desintegration	7
3. Material und Methoden	9
3.1 Versuchsaufbau	9
3.2 Untersuchung der Wirkung der Desintegration	11
3.3 Erprobung des Frühwarnindikators	12
3.4 Labormesswerte	13
3.4.1 Trockensubstanz und organische Trockensubstanz	13
3.4.2 pH-Wert und FOS/TAC-Wert	14
3.4.3 Photometrische Analyse	14
3.4.4 Entwässerbarkeit (CST)	14
4. Ergebnisse und Diskussion	16
4.1 Untersuchung der Wirkung der Desintegration	16
4.1.1 Untersuchung der Wirkung der Desintegration auf den spezifischen Biogasertrag	16
4.1.2 Vergleich der Entwässerbarkeit der verschiedenen Varianten	18
4.1.3 Auswirkung der Desintegration auf die Flockenstruktur	19
4.2 Frühwarnindikator	21
4.2.1 organische Säuren	21
4.2.2 Calcium	23
4.2.3 Phosphat.....	25
4.2.4 Ammonium.....	27
4.2.5 FOS/TAC-Wert und FWI.....	29
4.3 Steigerung der Raumbelastung zur Optimierung der Raum-Zeit-Ausbeute	32
4.3.1 Auswirkung der Steigerung der Raumbelastung auf den spezifischen Biogasertrag	33
4.3.2 Aggregatbildung	36
5. Zusammenfassende Diskussion	37
5.1 Untersuchung der Wirkung der Desintegration	37
5.2 Einfluss der Aggregate	38
5.3 Frühwarnindikator	41
6. Zusammenfassung	44
7. Handlungsempfehlungen	45
Anhang	I
Literaturverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VII
Gleichungsverzeichnis	VII

Abkürzungsverzeichnis

B _R	Raumbelastung
CaO	Calciumoxid
CST	Kapillare Fließzeit (engl. capillare suction time)
EWI	early warning indicator (dt. Frühwarnindikator)
FWI	Frühwarnindikator
FOS	flüchtige organische Säuren
spez.	spezifisch
Stabw.	Standardabweichung
TAC	totales anorganisches Carbonat
TS	Trockensubstanz
OLR	organic loading rate
org.	organisch
oTS	organische Trockensubstanz
PS	Primärschlamm
REM	Rasterelektronenmikroskop
VS	organische Trockensubstanz
VWZ	Verweilzeit
ÜSS	Überschussschlamm

1. Einleitung und Zielsetzung

Große moderne Kläranlagen sind durch die Integration einer anaeroben Klärschlammbehandlung in Biogasreaktoren und der anschließenden Methanumsetzung in Blockheizkraftwerken in der Lage einen großen Teil des eigenen Wärme- und Energiebedarfs zu decken. Um die Wirtschaftlichkeit bestehender Anlagen noch zu erhöhen und die anaerobe Klärschlammbehandlung auch für kleinere Kläranlagen sinnvoll zu machen, ist es wichtig Optimierungsmöglichkeiten auszuschöpfen und weiterzuentwickeln.

Eine Optimierungsmöglichkeit besteht in der Desintegration des Klärschlammes. In der Kläranlage Rosental in Leipzig, in der die Versuche dieser Arbeit durchgeführt wurden, kommt eine elektrokinetische Desintegration zum Einsatz.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es die Auswirkung des elektrokinetischen Desintegrationsverfahrens auf den Biogasprozess der Kläranlage Rosental herauszuarbeiten. Neben stabileren Prozessabläufen und reduzierter Schaumbildung wird vom Hersteller dieser Desintegrationsanlage als Hauptvorteil die Steigerung der Biogasproduktion genannt, da diese maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit beiträgt. Daher und weil es am eindeutigsten bestimmt werden kann, wurde der spezifische Biogasertrag als Parameter zur Beurteilung der Wirkung der elektrokinetischen Desintegration gewählt. Des Weiteren stellt der Hersteller eine verbesserte Entwässerbarkeit des resultierenden Faulschlammes in Aussicht, welche zur Reduzierung der Entsorgungskosten beitragen könnte. Bei Entsorgungskosten von circa 35 - 70 €/t und einem jährlichen Faulschlammanfall von 35000 t/a kann schon eine kleine Verringerung des Wassergehalts im Faulschlamm zu einer merklichen Einsparung führen. Zur Untersuchung des Effekts auf die Entwässerbarkeit, wurde die Entwässerbarkeit mittels CST-Messgerät bestimmt. Um einen Einblick in die Wirkung der elektrokinetischen Behandlung auf die Schlammstruktur zu gewinnen, wurden mikroskopische Aufnahmen des desintegrierten und des unbehandelten Überschussschlammes aufgenommen.

Ein weiterer maßgeblicher Faktor, der zum wirtschaftlichen Betrieb einer Biogasanlage beiträgt, ist die Überwachung der Milieubedingungen im Reaktor. Kommt es im Reaktor aufgrund von Verfahrensfehlern zu einer Übersäuerung, wird der Biogasprozess stark beeinträchtigt und kann komplett zum Erliegen kommen [Mudrack 1994]. Die Wahrscheinlichkeit einer Übersäuerung steigt mit Steigerung der Raumbelastung stark an. Dieser Umstand führt dazu, dass Biogasreaktoren oftmals mit sehr geringen Raumbelastungen gefahren werden, was zu suboptimalen Raum-Zeit-Ausbeuten führt. Daher wird zur

1. Einleitung und Zielsetzung

Überwachung häufig der sogenannte FOS/TAC-Wert bestimmt, welcher rechtzeitig auf eine drohende Übersäuerung hinweisen soll. Untersuchungen von Kleyböcker (2012) haben gezeigt, dass ein Indikator, bestehend aus dem Quotienten der Konzentration an organischen Säuren durch den Calciumgehalt, frühzeitiger auf eine Übersäuerung hinweisen kann. Dieser Frühwarnindikator soll in dieser Arbeit getestet werden.

Zu folgenden Fragestellungen wurden Versuche durchgeführt:

- Wie stark ist die Wirkung der elektrokinetischen Desintegration auf den Biogasertrag und die Entwässerbarkeit?
- Zeigt der Frühwarnindikator eine Übersäuerung frühzeitiger an als der FOS/TAC-Wert?
- Wie gut lässt sich der Biogasprozess mit Calciumoxid-Zugabe stabilisieren?
- Wie hoch kann die Raumbelastung gesteigert werden, ohne dass es zu einer Übersäuerung kommt?
- Welchen Einfluss hat die Steigerung der Raumbelastung auf den spezifischen Biogasertrag?
- Welchen Einfluss haben die gebildeten Aggregate auf den Biogasprozess?

2. Stand der Technik und Wissenschaft

2.1 Anaerober Abbauprozess organischer Stoffe

Der anaerobe Abbauprozess organischer Stoffe wird auch als Fermentation bezeichnet und ist ein Abbauweg, bei dem Biogas entsteht, welches etwa aus zwei Dritteln Methan, einem Drittel Kohlenstoffdioxid und aus Spuren anderer Stoffe zusammengesetzt ist [Kaltschmitt 2009]. Als Substrat können verschiedene organische Stoffe dienen, z.B. Klärschlamm, Fette, Gülle, Bioabfall oder Pflanzen. Die Substrate werden in einen Fermenter bzw. Bioreaktor eingebracht, wo organische Stoffe unter anaeroben Bedingungen durch Mikroorganismen in Methan und Kohlenstoffdioxid umgewandelt werden.

Dieser anaerobe Abbauprozess organischer Stoffe lässt sich in vier Phasen einteilen: Hydrolyse, Acidogenese (Versäuerung), Acetogenese (Essigsäurebildung) und Methanogenese (Methanbildung).

2.1.1 Stufen des Prozesses

Im ersten Schritt, der Hydrolyse, werden Fette, Proteine, Kohlenhydrate und Polysaccharide, zu ihren monomeren Grundbausteinen und anderen löslichen Abbauprodukten gespalten. Dabei entstehen unter anderen Fettsäuren, Monosaccharide und Peptide. Bestimmte anaerobe Mikroorganismen wirken auf diese Reaktionen katalysierend, wobei deren Enzyme die Edukte hydrolysieren. Häufig ist dieser Reaktionsschritt durch die Komplexität des Substrates geschwindigkeitsbestimmend [Watter 2015].

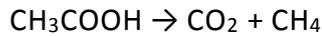
Zeitgleich zur Hydrolyse findet die Acidogenese (Versäuerung) statt. Dabei werden monomere Stoffe und andere Stoffwechselprodukte in niedere Fett- und Carbonsäuren und in kurzkettige Alkohole, wie z. B. Ethanol, umgesetzt. Außerdem wird auch Wasserstoff abgespalten. Durch diese Reaktionen werden schon bis zu 20% des Gesamtanteils an Essigsäure synthetisiert.

Die dritte Stufe des anaeroben Abbaus biogener Substanzen stellt die Acetogenese (Essigsäurebildung) dar, in welcher der größte Teil der Essigsäure gebildet wird.

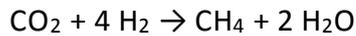
Acetogene setzen hierbei die zuvor bei der Hydrolyse und Acidogenese gebildeten Fett- und Carbonsäuren sowie niedere Alkohole hauptsächlich zu Essigsäure und dessen gelöstem Salz, dem namensgebendem Acetat um.

2. Stand der Technik und Wissenschaft

In der entscheidenden Phase, der Methanogenese, wandeln Methanbakterien entsprechend der folgenden Formeln Essigsäure zu Methan um, außerdem entstehen als Nebenprodukt Kohlenstoffdioxid und Ammoniak, welches sich im Wasser bindet. [Hosang/Bischof 1998]



Das entstandene Kohlenstoffdioxid dient teilweise wieder als Edukt:



2.1.2 Milieubedingungen

pH-Wert und Puffer

Der optimale pH-Wert ist bei den verschiedenen Teilprozessen und für verschiedene Substrate unterschiedlich, liegt aber bei den meisten Anwendungen im Bereich von 6,5 bis 7,5 [Bischofsberger et al.2005].

Kommt es zur Hemmung der mikrobiellen Prozesse, die Essigsäure abbauen, kann es zur Anreicherung von Säure im Reaktor kommen, wodurch der pH-Wert sinkt und der Biogasprozess weiter beeinträchtigt wird. Daher sollte solch ein Fall durch geeignete Maßnahmen verhindert werden. Ein System aus Puffern steht einer pH-Wert-Änderung gegenüber. So liegt das entstandene Kohlenstoffdioxid gelöst vor und puffert im Neutralbereich.

Hemmstoffe

Einige Stoffe können die Reproduktion der Mikroorganismen stören oder eine Nebenreaktion fördern. So kann es zum Beispiel bei der Verwendung von Rapsöl als Co-Substrat zur Anreicherung von Hemmstoffen kommen. Rapsöl, welches aus langkettige Fettsäuren besteht, wirkt in zu hoher Konzentration hemmend. Zudem entsteht bei der Rapsölherstellung als Nebenprodukt eine kleine Menge Glycerinsulfat, was in großen Mengen zu einer zu starken Schwefelwasserstoffproduktion führen kann. Daher ist durch regelmäßige Analysen zu prüfen, ob die Konzentrationen an Schwermetallen, chlorierten Kohlenwasserstoffen und anderen potentiellen Störstoffen im Substrat bzw. dem Co-Substrat und im Reaktor zu hoch sind [DWA 2008a]. Eine Liste hemmender Stoffe und deren zugehörigen toxischen Konzentrationen finden sich u.a. bei Mudrack (1994).

Temperatur

Die höchste Stoffwechselaktivität zeigen mesophile Bakterien in einem Temperaturbereich von 30°C bis 37°C. Hält man den Reaktor bei dieser Temperatur, ergeben sich gegenüber unbeheizten Fermentationen erhebliche Verbesserungen des Abbaugrades, der Verweilzeit und damit auch der Reaktorgröße [ATV 1996]. Die Temperatur sollte dabei um nicht mehr als 3 K schwanken, da mesophile Bakterien von einer Temperaturschwankung beeinflusst werden und sich erst an eine Temperatur anpassen müssen. Um eine bessere Hygienisierung und Entwässerbarkeit zu erreichen, kann man Bioreaktoren auch thermophil in einem Bereich von 40°C bis 60°C betreiben. In diesem Bereich zeigen thermophile Bakterien ihre höchste Stoffwechselaktivität, wodurch die Verweilzeit verkürzt werden kann. Dabei entstehen allerdings etwa doppelt so hohe Energiekosten und die Investitionskosten z.B. für die Dämmung steigen. Außerdem sind die Bakterien in diesem Temperaturbereich noch anfälliger gegen eine Temperaturschwankung, die höchstens bei 1 K liegen sollte, was zu höheren Ansprüchen in der Regelungstechnik führt.

2.1.3 Überwachungsparameter

Die Möglichkeiten den biologischen Abbauprozess zu überwachen sind sehr begrenzt. Es gibt kein wirtschaftliches Messverfahren, welches die notwendigen Parameter online bzw. kontinuierlich erfassen kann [Kaltschmitt 2009]. Als diskontinuierliche Überwachungsmethode kommt der FOS/TAC-Wert zum Einsatz. Dieser Wert stellt bei Lösungen mit einem pH-Wert über 5 den Quotienten der Konzentration an flüchtigen organischen Säuren (FOS) und dem totalen anorganischen Carbonat (TAC) dar, welche beide titrimetrisch bestimmt werden. Die Konzentration anorganischer Carbonate wird dabei aus der Menge an Schwefelsäure berechnet, die bei der Titration einer Probe für das Erreichen eines pH-Wertes von 5 notwendig ist. Aus der Menge, die zur weiteren Titration bis zum pH-Wert 4,4 erforderlich ist, wird die Konzentration der organischen Säuren berechnet. [Voß et al. 2009]

Je nach verwendetem (Co-)Substrat kann der normale Bereich des FOS/TAC-Wertes variieren. Ein einzelner Wert ist daher nicht aussagekräftig, weshalb ein Einzelwert immer im Kontext des Verlaufes dieses Parameters gesehen werden sollte [Effenberger 2011]. Bei der verwendeten Technikumsanlage befand sich der unkritische Bereich bei 0,139. Steigt dieser

Wert stark an, sollten Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, da es sonst zu einer Hemmung des Prozesses kommen kann [Zak 2012].

Als Alternative zum FOS/TAC-Wert kann ein anderer Frühwarnindikator (FWI) bestimmt werden. In dieser Arbeit stellt der FWI den Quotienten aus der Konzentration organischer Säuren (als Essigsäureäquivalent) und der Gesamtkonzentration anorganischer Carbonate dar. Im Gegensatz zum FOS/TAC-Wert werden die notwendigen Konzentrationen nicht durch Titration sondern photometrisch ermittelt. Außerdem wird beim FWI nicht die Pufferwirkung des Schlammes bestimmt, sondern die Verfügbarkeit des Calciums als eine Art Flockungsmittel zur Festlegung langkettiger Fettsäuren.

2.2 Optimierung des Biogasprozesses durch Desintegration

2.2.1 Nutzen und Unterteilung

Als Desintegration von Klärschlamm bezeichnet man die Zerstörung von lebenden und toten Zellstrukturen sowie von Schlammflocken, um Zellinhaltsstoffe freizusetzen und die Schlammstruktur aufzulockern [DWA 2015]. Auf diese Weise ist die organische Trockensubstanz des Klärschlammes leichter für die Bakterien im Bioreaktor zugänglich. Daraus resultieren ein höherer Abbaugrad und weniger Faulschlamm nach der Fermentation. Außerdem soll es zu verminderter Schaumbildung und einem reduzierten Flockungsmittelbedarf kommen.

Grundsätzlich kann eine Desintegration auf unterschiedlichen Wegen erfolgen: physikalisch, mechanisch, chemisch und biologisch.

Bei der biologischen Desintegration werden dem Klärschlamm Enzyme zugesetzt, welche biochemisch zur Zersetzung von organischem Material führen. Chemisch desintegrieren lassen sich Klärschlämme durch Zugabe von Säuren, Basen oder Oxidationsmitteln wie Ozon. Für die mechanische Desintegration wurde eine Vielzahl an Geräten entwickelt, die alle gemein haben, dass die Zellen und Flocken physikalisch beansprucht werden. So werden in der Biotechnologie und auch bei großen verfahrenstechnischen Anlagen speziell angepasste Mühlen, Zentrifugen, Pressen und Homogenisatoren eingesetzt.

Die für diese Arbeit genutzte elektrokinetische Desintegration gehört zu den physikalischen Desintegrationsmethoden, zu der auch die Desintegration durch Erhitzen gezählt wird.

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Für den Einsatz bei Klärschlamm bietet sich die gewählte Behandlungsart an, da weder hohe Drücke noch hohe Temperaturen erzeugt werden müssen, keine Verschleißteile zum Einsatz kommen und keine Zusätze (Säure, Enzyme, ...) zugekauft werden müssen. Die Betriebskosten sind daher äußerst gering und auch die Investitionskosten fall nicht hoch aus.

2.2.2 Elektrokinetische Desintegration

Bei der elektrokinetischen Desintegration wird der zu desintegrierende Schlamm durch ein Rohr geleitet, in dem sich eine längliche Elektrode befindet. Bei der im Klärwerk Rosental eingesetzten Desintegrationseinheit (Abb. 1) kommen vier direkt hintereinander geschaltete Elektroden zum Einsatz, welche jede 1,5 m lang ist und jeweils einen Leistungsbedarf von 35 W hat.



Abb. 1: Desintegrationseinheit "BioCrack" der Firma Vogelsang [Vogelsang 2015a]

Zwischen der Elektrode und der geerdeten Rohrwand wird eine Spannung von bis zu 100 kV aufgebaut. Durch das elektrische Spannungsfeld bilden sich in den Flocken und Zellen positive und negative Pole (Abb. 2), welche zu Kräften und Verschiebungen in den Membranen führen. Dadurch entstehen Risse und die Zellmembran bzw. -wand reißt auf, wodurch Zellinhaltsstoffe in das Schlammwasser freigesetzt werden. Da mechanische Entwässerungsmaschinen, wie Zentrifugen, kaum Zellinnenwasser entfernen können, ist hierdurch eine Verbesserung der Entwässerbarkeit möglich. Die Nährstoffe und organischen Stoffe des Zellinhalts können von Mikroorganismen in einem Bioreaktor zur Reproduktion und damit zur Methanerzeugung

2. Stand der Technik und Wissenschaft

genutzt werden, ohne dass erst die relativ stabilen Zellwände zersetzt werden müssen. Dies soll zu einer gesteigerten Biogasproduktion führen. [Kopplow 2004]

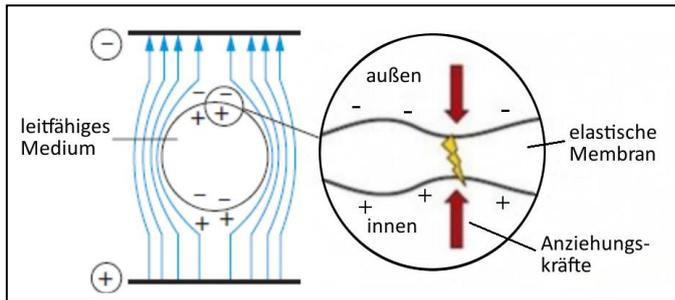


Abb. 2: Prinzip der elektrokinetischen Desintegration [Kopplow 2004]

3. Material und Methoden

3.1 Versuchsaufbau

Die Versuche für diese Arbeit wurden an einer Technikumsanlage auf dem Gelände der Kläranlage Rosental durchgeführt (Abb. 3, Abb. 4). Die Technikumsanlage besteht aus vier einstufigen, vollaufmischenden Bioreaktoren mit jeweils 200 l Volumen. Die Durchmischung erfolgt durch eine Exzentrerschneckenpumpe (AFJ20.1B von Johstadt), die den Reaktorinhalt an der spitzzulaufenden Unterseite abpumpt und an der Oberseite wieder zuführt. Mittels Frequenzumrichter kann die Pumpe stufenlos auf ein Fördervolumen bis zu 450 l/h eingestellt werden. Direkt vor dem Einlass zur Pumpe befindet sich ein Dreiwegehahn, der zwischen den beiden Stellungen Reaktor zu Pumpe und Trichter zu Pumpe umschaltbar ist. Der Trichter, welcher für die tägliche Beschickung genutzt wird, ist über ein T-Stück mit dem Dreiwegehahn verbunden und hat ein Volumen von etwa 15 l. Die dritte Öffnung des T-Stücks ist mit einem Hahn verschlossen, der bei der Reinigung zur Entleerung des Trichters geöffnet werden kann. An der Druckseite der Pumpe vor dem Einlass zum Reaktor ist über ein T-Stück ein weiteres T-Stück montiert. An einem der zusätzlichen Anschlüsse befindet sich ein Hahn, der zur täglichen Entnahme von Faulschlamm geöffnet werden kann. An dem anderen Anschluss befindet sich ebenfalls ein Hahn. Dieser ist über ein viertes T-Stück an der Füllstandsanzeige angeschlossen. Die Füllstandsanzeige besteht aus einem durchsichtigen Rohr, welches an der Unterseite des Reaktors und am Deckel angeschlossen ist und dient der Sicherstellung einer konstanten Füllhöhe im Reaktor. Am Deckel ist ebenfalls ein Rohr angebracht, über das das entstandene Biogas in eine Schaumfalle geleitet wird. Die Schaumfalle besteht aus einem 80 l-Fass, in das das Rohr vom Biogasreaktor mehrere Dezimeter hineinreicht. Zur Überwachung der Füllhöhe mit Schaum ist auch hier zwischen Deckel und Boden eine Füllstandsanzeige, bestehend aus einem durchsichtigen Rohr, angebracht. Am Boden befindet sich nochmals ein Hahn zum Entleeren. Vom Deckel aus führt ein Rohr zur Gasuhr, an welches über zwei T-Stücke mit Hähnen eine Gasmaus angeschlossen werden kann. Bei der Gasuhr handelt es sich um ein Trommel-Gaszähler TG 1 der Dr.-Ing. Ritter Apparatebau GmbH, welche bis auf 0,01 l genau abgelesen werden kann.

3. Material und Methoden



Abb. 3: Übersicht über die Technikumsanlage

Die Bioreaktoren selbst werden über einen isolierten Doppelmantel mit einem Thermostat auf 37°C geheizt. Außer der Füllstandsanzeige und der zugehörigen Verbindungsschläuche sind alle Rohre des Reaktors isoliert.

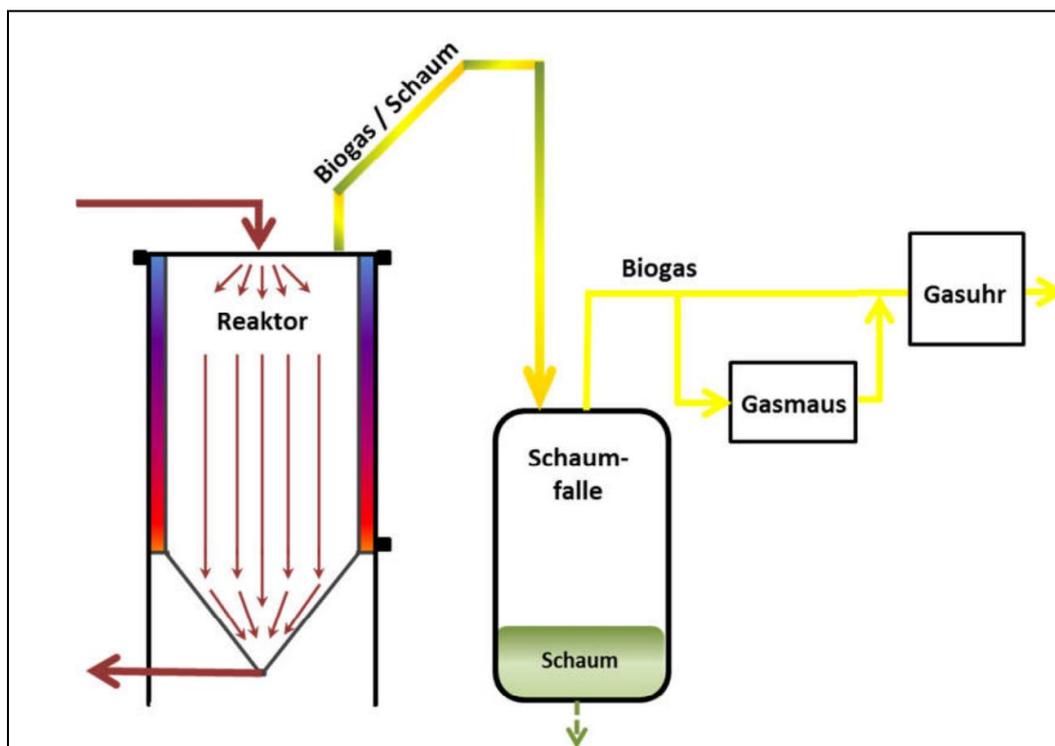


Abb. 4: schematische Darstellung eines Reaktors der Technikumsanlage [Voigt, Döring]

3.2 Untersuchung der Wirkung der Desintegration

Für die Untersuchung der Wirkung der elektrokinetischen Desintegration wurde die im letzten Abschnitt beschriebene Technikumsanlage mit vier Bioreaktoren betrieben. Zu Beginn des Versuches wurden alle vier Reaktoren mit 180 l Faulschlamm der großtechnischen Bioreaktoren der Kläranlage gefüllt. Somit blieb in den Reaktoren 20 l Platz für eine etwaige Schaumproduktion. Um einen stabilen Betrieb während des Versuchs zu gewährleisten, wurde über einen Zeitraum von etwa einer dreiviertel Verweilzeit (21 Tage) eine Inbetriebnahmephase vorgesehen. In dieser Zeit wurden alle Reaktoren täglich mit 6,3 kg/d Rohschlamm beschickt. Dies entspricht einer Raumbelastung von $1,2 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ bei einer Verweilzeit von 28 d. Der Rohschlamm besteht dabei aus 25% Überschussschlamm (ÜSS) und 75% Primärschlamm (PS). Direkt im Anschluss startete der eigentliche Versuch über zwei Verweilzeiten, also 56 Tage. Die Raumbelastung wurde in dieser Zeit leicht angepasst auf $1,27 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, was der Raumbelastung der großtechnischen Bioreaktoren der Kläranlage entspricht. Um einen Unterschied durch die elektrokinetische Behandlung feststellen zu können, wurden dabei jeweils zwei der Reaktoren mit Rohschlamm beschickt, bei dem der Anteil an Überschussschlamm elektrokinetisch desintegriert wurde und zwei Reaktoren mit unbehandelten Rohschlamm. Da es aus verfahrenstechnischen Gründen nicht möglich war Rohschlamm zu entnehmen, bei dem der Überschussschlamm noch nicht desintegriert wurde, wurde der Rohschlamm selbst aus ÜSS und Primärschlamm gemischt. Die Reaktoren wurden mit 4,72 kg/d Primärschlamm und 1,55 kg/d ÜSS beschickt. Bei den Reaktoren 1 und 2 handelte es sich um den elektrokinetisch desintegrierten und bei den Reaktoren 3 und 4 um den unbehandelten ÜSS.

Während der ganzen Versuchszeit wurden durch das Betriebslabor der Kläranlage jeweils montags, mittwochs und freitags die Gehalte an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz in den vier Faulschlämmen, in den beiden Überschussschlämmen und im Primärschlamm bestimmt. Zur Überwachung des Milieus in den Reaktoren wurden der FOS/TAC-Wert und der pH-Wert bestimmt. Zudem wurde an zwei Tagen die CSB-Gehalte in den beiden Überschussschlämmen und an drei Tagen der CST-Wert ermittelt. Genauere Beschreibungen der Analysemethoden sind im Abschnitt *3.4 Labormesswerte* zu finden.

An Wochenenden und an Feiertagen wurde die Beschickung der Reaktoren von dem Schichtpersonal der Kläranlage vorgenommen, dafür wurde jede Schicht in die Technikumsanlage und die vorgesehenen Versuche eingewiesen. Zudem wurde eine Betriebsanweisung erstellt und fortlaufend den aktuellen Versuchsbedingungen angepasst.

3.3 Erprobung des Frühwarnindikators

Im Anschluss an die Untersuchung der Wirkung der Desintegration wurde mit der Erprobung des Frühwarnindikators begonnen. Um sicher zu stellen, dass während des Versuchszeitraums eine Übersäuerung eintritt, damit der Frühwarnindikator diese anzeigen kann, wurde die Raumbelastung in wöchentlichen Schritten stark erhöht.

Laut Kleyböcker (2012) sollte eine Steigerung der Raumbelastung nicht häufiger als alle 8 Tage vorgenommen werden. Bei der Durchführung dieser Arbeit war es aus organisatorischen Gründen besser die Steigerung der Raumbelastung immer am selben Wochentag (Montag) vorzunehmen, da bei einem 8-Tage-Rhythmus der Steigerungstag auch auf ein Wochenende gefallen wäre, an dem jedoch keine Bestimmung des FOS/TAC und des FWI möglich war.

Die ersten beiden Wochen stellten eine Adaptionsphase dar, in der die Reaktoren, bzw. die entsprechenden Mikroorganismen zunächst an Rapsöl gewöhnt wurden. Zur Beschickung wurde als Basis dieselbe Rohschlammischung verwendet wie im Desintegrationsversuch, wobei ein Teil der Rohschlammischung wurde durch Rapsöl ersetzt. Die Raumbelastung wurde dabei auf $1 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ gesenkt.

In der dritten Versuchswoche (1. Hochlaststufe) wurde, statt einen Teil des Rohschlammes zu ersetzen, zusätzlich Rapsöl hinzugegeben. Somit wurden die Reaktoren mit einer Raumbelastung von $2,2 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ gefahren. In der zweiten Hochlaststufe wurde die Raumbelastung auf $3,4 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erhöht. Zudem wurden die Reaktoren nun direkt mit Rohschlamm beschickt, statt mit einer eigenen Mischung aus Primärschlamm und ÜSS. Ab der dritten Hochlaststufe erfolgte eine unterschiedlich starke Erhöhung der Raumbelastung. In den Reaktoren 1 und 2 wurde um $1,3 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ auf $4,7 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erhöht, während die Raumbelastung in den Reaktoren 3 und 4 auf $4,8 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erhöht wurde. In den folgenden Wochen wurde der Unterschied in der Stärke der Erhöhung weiter vergrößert. Im Zeitplan (Tab. 7 im Anhang) ist eine genauere Beschreibung der Zusammensetzung des Rohschlammes aus ÜSS, PS und Rapsöl zu finden.

Jeweils montags, mittwochs und freitags wurden während der Versuchszeit durch das Betriebslabor der Kläranlage die Gehalte an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz in den vier Faulschlämmen und im Rohschlamm ermittelt. Zur Überwachung des Milieus in den Reaktoren wurden der FOS/TAC-Wert und der pH-Wert bestimmt. Zudem wurden alle zwei Tage folgende Konzentrationen gemessen: organische Säuren, Calcium, Ortho-Phosphat und Ammonium. Der Quotienten aus organische Säuren- und Calcium-Konzentration stellt dabei den Frühwarnindikator (FWI) dar. Aus den Werten des FWI der

3. Material und Methoden

ersten beiden Wochen, in denen eine Beschickung der Reaktoren mit Öl erfolgte, wurde durch Mittelung ein Basiswert von 1,6 bestimmt. Trat in späteren Messungen ein Wert auf, der den Basiswert um das Dreifache übertraf (4,8), wurde dem entsprechenden Reaktor Calciumoxid zugegeben, um ein frühzeitiges Übersäuern zu verhindern.

3.4 Labormesswerte

In diesem Abschnitt ist eine genauere Beschreibung der verwendeten Analysemethoden zu finden. Die Bestimmungen der Trockensubstanz und die daraus ermittelte organische Trockensubstanz, der pH-Wert, sowie der FOS/TAC-Wert erfolgten vom Betriebslabor der Kläranlage Rosental. Die photometrischen Analysen und die Bestimmung der Entwässerbarkeit wurden selbst durchgeführt.

3.4.1 Trockensubstanz und organische Trockensubstanz

Die Trockensubstanz (TS, Trockenrückstand) und die organische Trockensubstanz (oTS, Glühverlust) wurden im Betriebslabor nach EN 12879/S3a bzw. EN 12880/S2a bestimmt. Dabei wurde eine definierte Menge der Probe (etwa 100 g) bis zur Massekonstanz bei 105°C getrocknet. Der getrocknete Schlamm wurde dann 2 h lang bei 550°C in einem Muffelofen verglüht. Durch Wägungen vor der Trocknung (Probe) und nach der Trocknung (Probe, trocken) und nach dem Verglühen (Probe, verglüht) ist eine Berechnung der Trockensubstanz und der organischen Trockensubstanz nach folgenden Gleichungen möglich.

$$TS = \frac{m_{\text{Probe,trocken}} \cdot 100\%}{m_{\text{Probe}}} [\%] \quad (\text{Gl. 1: Trockensubstanz})$$

$$oTS = 100\% - \frac{m_{\text{Probe,verglüht}} \cdot 100\%}{m_{\text{Probe,trocken}}} [\%] \quad (\text{Gl. 2: organische Trockensubstanz})$$

Bei dieser Berechnungsmethode bezieht sich der oTS auf den TS. Den Anteil an Organik in der nicht getrockneten Probe erhält man durch Multiplikation dieser beiden Werte.

3.4.2 pH-Wert und FOS/TAC-Wert

Der pH-Wert und die Messtemperatur wurden mit einem pH-Messgerät von WTW gemessen. Die beiden für den FOS/TAC-Wert notwendigen Konzentrationen von flüchtigen organischen Säuren und Calciumcarbonat wurden nach Nordmann durch Titration bestimmt. Zur Aufbereitung wurden die Proben 10 min lang bei 6000 rpm zentrifugiert und anschließend filtriert (Whatman 1573 1/2, 25 µm).

3.4.3 Photometrische Analyse

Die Konzentrationen von organischen Säuren, Calcium, Ammonium und Phosphat wurden photometrisch gemessen. Circa 50 ml Faulschlamm-Probe wurden bei 6000 rpm 10 min lang zentrifugiert (Hettich EBA 12). Anschließend wurde das Zentrat mit Filterpapier vorfiltriert (Whatman 1573 1/2, 25 µm) und dann mit Hilfe einer Unterdruckbox von J.T. Baker feinfiltriert (Sartorius Minisart plus 17829 Q, 0,45 µm). Das Filtrat wurde mit Schnelltests von Hach-Lange untersucht. Dafür wurde für Calcium der Schnelltest LCK 327, für Phosphat LCK 350 und für Ammonium LCK 302 eingesetzt. Für die Konzentration der organischen Säuren wurde LCK 365 eingesetzt, wobei dieser Test einen Summenparameter in Essigsäureäquivalenten darstellt. Bei diesen Test war zudem ein 10minütiges Erhitzen auf 100°C notwendig (Thermostat HT200S). Die Auswertung der photometrischen Tests erfolgte mit einem DR6000 Photometer von Hach-Lange.

3.4.4 Entwässerbarkeit (CST)

Die Entwässerbarkeit der Faulschlämme wurde gemäß DIN EN 14701-1 mit dem CST-Messgerät CST 101/A der Firma Hego Biotec bestimmt. Die Kapillare Fließzeit (engl. Capillary Suction Time) stellt dabei die Zeit dar, die die Feuchtigkeit in einem Schlamm benötigt um, angetrieben von der Saugkraft eines Saugpapiers, eine definierte Strecke zwischen zwei Elektroden zu wandern. Je stärker das enthaltene Wasser an die Feststoffpartikel im Schlamm gebunden ist, desto höher ist der CST-Wert. [HeGo]

Die Probe wurde in einen kleinen Zylinder eingefüllt, welcher auf dem Saugpapier stand. Mit einer Plexiglasvorrichtung wurden zentrisch um den Zylinder zwei Kontaktringe auf dem

3. Material und Methoden

Papier gehalten. Sobald sich das Wasser bis zum ersten Kontaktring ausgebreitet hatte, startete eine Uhr, welche stoppte, sobald auch der zweite Kontaktring erreicht wurde. Die erhaltene Zeit stellt den CST-Wert in Sekunden dar, mit dem ein Vergleich der Entwässerbarkeit mehrerer Schlämme möglich ist. Eine Aussage zum erreichbaren Entwässerungsgrad ist nicht möglich [DWA 2008b].

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Untersuchung der Wirkung der Desintegration

4.1.1 Untersuchung der Wirkung der Desintegration auf den spezifischen Biogasertrag

In den ersten Tagen nach der Inbetriebnahmephase, in der die Werte für den spezifischen Biogasertrag noch relativ stark schwankten, lagen die Werte für den spezifischen Biogasertrag bei circa 480 bzw. 570 l/(kg oTS) (Abb. 5). Damit lag die Biogasproduktion deutlich über der der Reaktoren der Kläranlage von circa 390 l/(kg oTS).

Der Unterschied, der am ersten Tag noch zwischen Reaktor 1 und 4 und Reaktor 2 und 3 vorlag, ist ab dem zweiten Versuchstag nicht mehr so stark (41 l/(kg oTS) zwischen R1 und R3). Auch in den folgenden Wochen ergab sich kein klarer Unterschied zwischen den Reaktoren, die mit desintegriertem Überschussschlamm beschickt wurden (R1 und R2), und den Reaktoren, die mit unbehandeltem Überschussschlamm beschickt wurden (R3 und R4). Zwischen dem 30. und dem 16. Versuchstag sowie zwischen dem 40. und dem 46. Versuchstag konnte keine Auswertung vorgenommen werden, da an den Versuchstagen 11-12 und 20-21 aus organisatorischen Gründen keine Beschickung erfolgte.

Am 26. Versuchstag produzierte Reaktor 3 deutlich weniger Biogas als die übrigen 3 Reaktoren, da der Rohschlamm eine Inhomogenität aufwies. Reaktor 3 wurde dadurch mit einem Rohschlamm beschickt, der einen geringeren oTS-Gehalt aufwies. Bei der Berechnung wurde das allerdings nicht gesondert berücksichtigt.

Besonders an den Versuchstagen 40, 44 und 50 kam es zu starken Anstiegen des spezifischen Biogasertrages, obwohl die Beschickungsmasse gleich blieb. Trotz sehr geringen oTS-Gehalten im Rohschlamm an diesen Tagen (ca. 40% niedrigerer) wurde nur etwa 20% weniger Biogas produziert, da die relativ hohen oTS-Gehalte der Vortage die Biogasproduktion abpufferten. In der letzten Versuchswoche schwankte der spezifische Biogasertrag nur wenig um 485 l/(kg oTS).

4. Ergebnisse und Diskussion

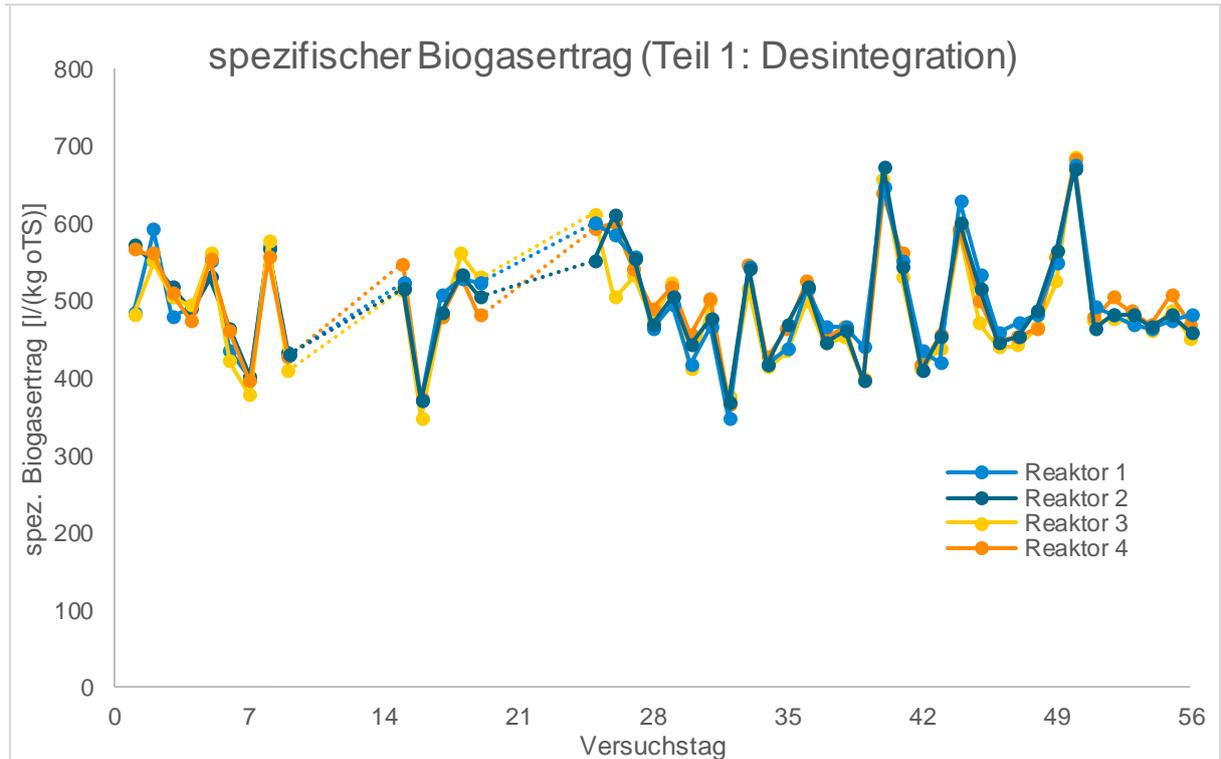


Abb. 5: Verläufe des spezifischen Biogasertrags während des Desintegrationsversuchs

Insgesamt ergaben sich im Durchschnitt der beiden jeweiligen Reaktoren (R1, R2 bzw. R3, R4) exklusive der Tage, welche von der Nicht-Beschickung beeinflusst waren ein spezifisches Biogas von 495,1 l/(kg oTS) bei den Reaktoren mit Desintegration und bei den Reaktoren ohne Desintegration 492,2 l/(kg oTS). Dabei ergibt sich ein Unterschied von 0,59% (Tab. 1).

spezifischer Biogasertrag [l/(kg oTS)]	
desintegriert	495,1
nicht desintegriert	492,2
relativer Unterschied	0,59%

Tab. 1: Vergleich des spez. Biogasertrages

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1.2 Vergleich der Entwässerbarkeit der verschiedenen Varianten

Die Bestimmung der Entwässerbarkeit mittels CST-Messgerät zeigte keinen Unterschied in Bezug auf die Wirkung der elektrokinetischen Desintegration auf die Entwässerbarkeit.

Bei der Messung waren die TS-Gehalte in allen Proben bei etwa 2,85%.

Die Werte (Tab. 2) für den Faulschlamm eines Reaktors zeigten sehr große Schwankungen, sodass viele Messungen notwendig waren, um einen belastbaren Messwert zu erhalten. Aus zeitlichen Gründen waren nur relativ wenige Messungen pro Tag möglich. Daher waren mehrere Messtage nötig, zwischen deren Messwerten es wiederum merkliche Abweichungen gibt. Auch zwischen den jeweils zusammengehörigen Reaktoren gibt es Unterschiede von 13,1% bzw. 10,2%. Beim zweiten Messwert des Reaktors 1 am 53. Tag kam es zudem zu einem Messfehler, der wahrscheinlich durch eine eingeschlossene Luftblase zustande kam. Dieser Wert wurde nicht bei der Mittelwert-Bildung berücksichtigt.

Als Mittelwert der jeweiligen Variante ist der Unterschied zwischen den beiden Varianten (unbehandelt und desintegriert) mit 7,5% deutlich. Doch mit 304 s ist der CST-Wert von Reaktor 1 klar niedriger als der von Reaktor 4, mit 318 s. Damit ist das Ergebnis nicht ausreichend reproduzierbar und somit keine sichere Aussage möglich.

Versuchstag	desintegriert [s]		unbehandelt [s]	
	R1	R2	R3	R4
52	366,3	373,8	312,7	293,5
	302,5	338,5	300,5	421,6
53	239,4	319,8	296,1	274,5
	653,0	334,8	283,3	295,5
	307,7	352,4	250,5	305,1
Mittelwert	304,0	343,9	288,6	318,0
Unterschied	13,1%		10,2%	
Mittelwert	326,1		303,3	
Unterschied	7,5%			

Tab. 2: 1. Messung der CST-Werte, während des Desintegration-Versuches

Nachdem die Reaktoren für den FWI-Versuch anteilig schon mit Rapsöl beschickt wurden, wurde eine weitere umfangreichere Messung durchgeführt (Tab. 3). Wiederum waren die Abweichungen zwischen den einzelnen Werten und damit die Standardabweichung sehr hoch. Dadurch kann die rechnerische Abnahme des CST-Wertes um 4,4% nicht auf eine Ursache zurückgeführt werden. Da die durchschnittlichen TS-Gehalte im Vergleich zur ersten

4. Ergebnisse und Diskussion

Messung auf 3,41 gestiegen waren, war eher mit steigenden CST-Werten zu rechnen, da Feststoffe die Entwässerbarkeit stören.

Versuchstag	R1	R2	R3	R4
22	317,5	244,3	296,5	342,5
	297,2	241,6	289,7	385,9
	325,3	265,1	328,6	356,0
	274,9	283,5	301,9	330,4
	266,5	265,3	294,5	311,7
Mittelwert	300,9			
Stabw.	36,2			
Unterschied zur 1. Messung	-4,4%			

Tab. 3: 2. Messung der CST-Werte, während des FWI-Versuches

Als alle Reaktoren übersäuert waren und die Reaktoren 1 und 2 schon außer Betrieb genommen wurden, wurde eine dritte Messung durchgeführt (Tab. 4). Hierbei ergaben sich erheblich längere Kapillare Fließzeiten von bis zu 1015,3 s. Grund dafür sind wahrscheinlich die zu diesem Zeitpunkt hohen TS-Gehalte in den Proben (3,77%), welche aus einer schlechteren oTS-Abbauleistung resultierten. Zudem war dabei ein Großteil der Trockensubstanz Rest des beschickten Rapsöls, welches die Entwässerbarkeit mittels Filterpapier erheblich behindern kann, indem es die Papieroberfläche benetzt und so wasserabweisend macht.

Versuchstag	R3	R4
60	669,0	900,0
	1015,3	986,3
	921,4	927,0
Mittelwert	903,2	
Stabw.	112,0	
Unterschied zur 2. Messung	200,1%	

Tab. 4: Vergleich der CST-Werte nach Übersäuerung

4.1.3 Auswirkung der Desintegration auf die Flockenstruktur

Mittels Mikroskop konnte bei zwei Probenahmen ein Einblick in die Wirkung der Desintegration auf die Flockenstruktur des Überschussschlammes gewonnen werden. Ein Tropfen der jeweiligen Probe wurde dabei mit einem Tropfen des Ablaufes der Kläranlage

4. Ergebnisse und Diskussion

gemischt, da der Schlamm sonst zu dicht für eine Mikroskopie gewesen wäre. Ablauf-Wasser wurde gewählt, da die Matrix sehr ähnlich ist und so ein osmotischer Schock verhindert wurde. In den mikroskopischen Bildern der verschiedenen Schlämme gibt es keine sehr großen Unterschiede, doch im direkten Vergleich der repräsentativen Ausschnitte der Proben sind bei 100facher Vergrößerung in der desintegrierten Probe größere Flocken zu erkennen als in der unbehandelten Probe (Abb. 6, Abb. 7). Gleichzeitig ist der Freiraum zwischen den Flocken größer. Die Behandlung mittels Hochspannung könnte zum leichten Kompaktieren der Flocken geführt haben.

Zwischen Abb. 9 und Abb. 8 ist daher auch ein Unterschied in der Helligkeit der Flocken zu erkennen. Bei 400facher Vergrößerung sind die Schlammflocken der behandelten Probe teilweise dunkler als die der unbehandelten, was wiederum auf dichtere Flocken hinweist. Um diese Vermutung zu überprüfen, müssten weitere Proben mikroskopisch untersucht und verglichen werden.

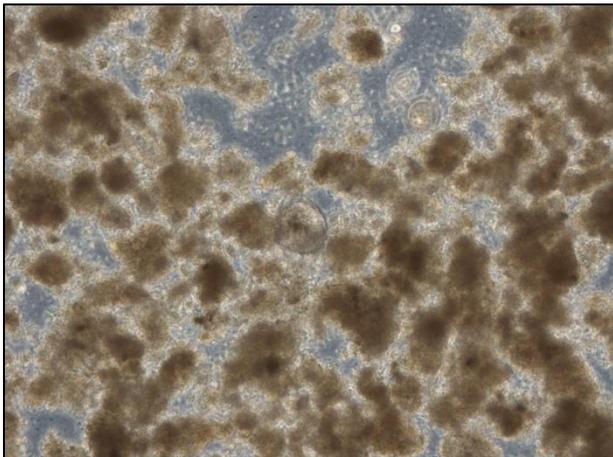


Abb. 6: ÜSS, unbehandelt, 100fach vergrößert

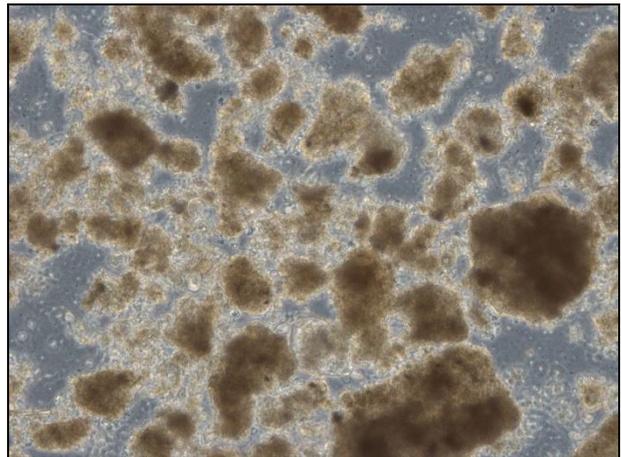


Abb. 7: ÜSS, desintegriert, 100fach vergrößert

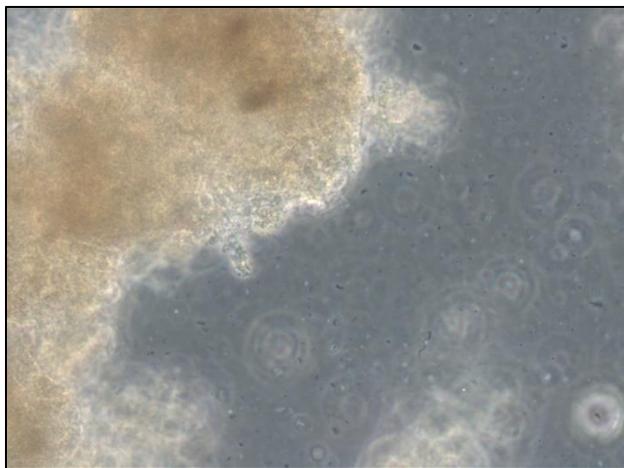


Abb. 9: ÜSS, unbehandelt, 400fach vergrößert

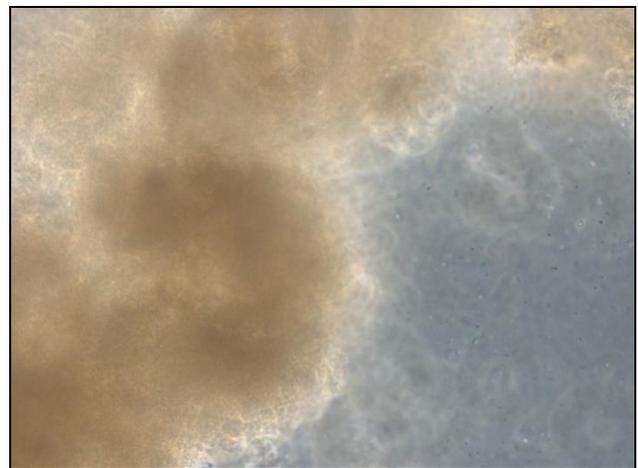


Abb. 8: ÜSS, desintegriert, 400fach vergrößert

4.2 Frühwarnindikator

4.2.1 organische Säuren

Im Anschluss an eine Adaptionsphase von 14 Tag, betrug die Konzentration an organischen Säuren etwa 120 mg/l (Abb. 10). Nach einer Erhöhung der Raumbelastung von 1 kg oTS m⁻³ d⁻¹ auf 2,2 kg oTS m⁻³ d⁻¹ stieg die Konzentration der organischen Säuren stark an (bis 683 mg/l bei R1). Im Laufe der ersten Woche passten sich die Mikroorganismen dem erhöhten Nahrungsangebot an, wodurch die Konzentration der organischen Säuren wieder die Ausgangskonzentration erreichte. Mit erneuter Steigerung der Raumbelastung am 22. Versuchstag auf 3,4 kg oTS m⁻³ d⁻¹ nahm auch die Konzentration an organischen Säuren erneut stark zu, besonders im Reaktor 1 bis 366 mg/l. Bei der dritten Steigerung der Raumbelastung am 106. Versuchstag auf 4,7 (R1, R2) bzw. 4,8 kg oTS m⁻³ d⁻¹ (R3, R4) fiel die Konzentrationszunahme weniger stark aus, da bei diesem Mal sofort mit Calciumoxid-Zugabe gegengesteuert wurde (Tab. 5 im Anhang). In der Woche vom 36. bis zum 43. Versuchstag mit einer Raumbelastung von 6,0 (R1, R2) bzw. 6,4 kg oTS m⁻³ d⁻¹ (R3, R4) kam es wieder zu einer deutlichen Zunahme der Säurekonzentration. Insbesondere bei Reaktor 3 kam es zu einem klaren Anstieg, der auf das Erwärmen des zuvor abgekühlten Reaktors zurückzuführen ist. Zu Beginn der fünften Woche vom 43. bis zum 50. Versuchstag fiel Reaktor 1 aufgrund von übermäßiger Schaumbildung aus. Da die drei übrigen Reaktoren am 45. und 48. Versuchstag nicht beschickt wurden, ging die Konzentration an organischen Säuren in dieser Zeit zurück. Am 50. Tag stieg die Konzentration dann wieder stark an, was zur Übersäuerung von Reaktor 2 führte. Die beiden letzten Reaktoren übersäuerten eine Woche später.

4. Ergebnisse und Diskussion

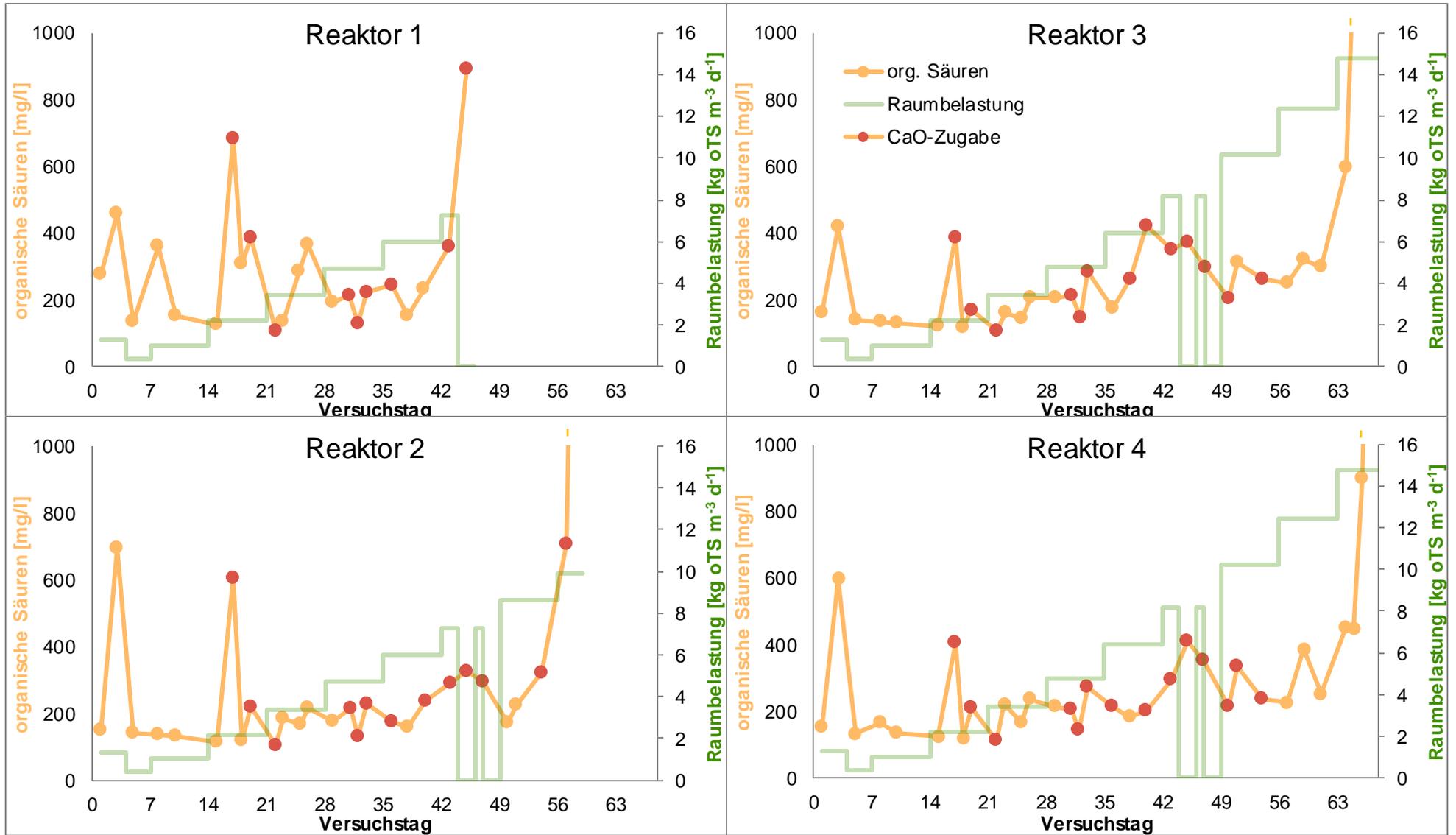


Abb. 10: Verläufe der Konzentration der organischen Säuren während des FWI-Versuchs

4.2.2 Calcium

Die Konzentration des zweiten wichtigen Parameters Calcium lag zu Beginn des Versuches bei etwa 83 mg/l in allen vier Reaktoren (Abb. 11). Innerhalb der ersten Woche stieg die Calcium-Konzentration in allen Reaktoren annähernd gleich auf 120 mg/l an. Bis zum 31. Tag sank die Konzentration stetig bis auf 35 mg/l (R2, R3, R4) bzw. etwas höher im Reaktor 1. In der folgenden Woche bis zum 38. Versuchstag blieben die Konzentrationen etwa konstant. Aufgrund einer ungeplanten Abkühlung des Reaktors 3 kam es am 36. Versuchstag zu einem starken Anstieg der Calcium-Konzentration. Nach der Hälfte der Versuchszeit am 43. Tag erreichte die Calcium-Konzentration in allen Reaktoren ihren niedrigsten Stand von 20 mg/l. Besonders Reaktor 1 wurde an diesem Tag viel Calciumoxid zugegeben, was zusammen mit der unterlassenen Beschickung in den Reaktoren 2-4 zu einem Anstieg der Konzentration führte. Reaktor 1 wurde aufgrund von starker Schaumentwicklung außer Betrieb genommen. In den folgenden drei Wochen erhöhte sich die Calcium-Konzentration zweimal bis zu einem zwischenzeitlichen Maximum bei etwa 65 mg/l, wobei die Konzentration in Reaktor 2 deutlich stärker anstieg. In Folge dessen wurde dieser außer Betrieb genommen. Ab dem 65. Versuchstag nahm die Calcium-Konzentration in den beiden verbleibenden Reaktoren sehr stark zu und am 68. Tag wurden auch diese beiden Versuche beendet.

4. Ergebnisse und Diskussion

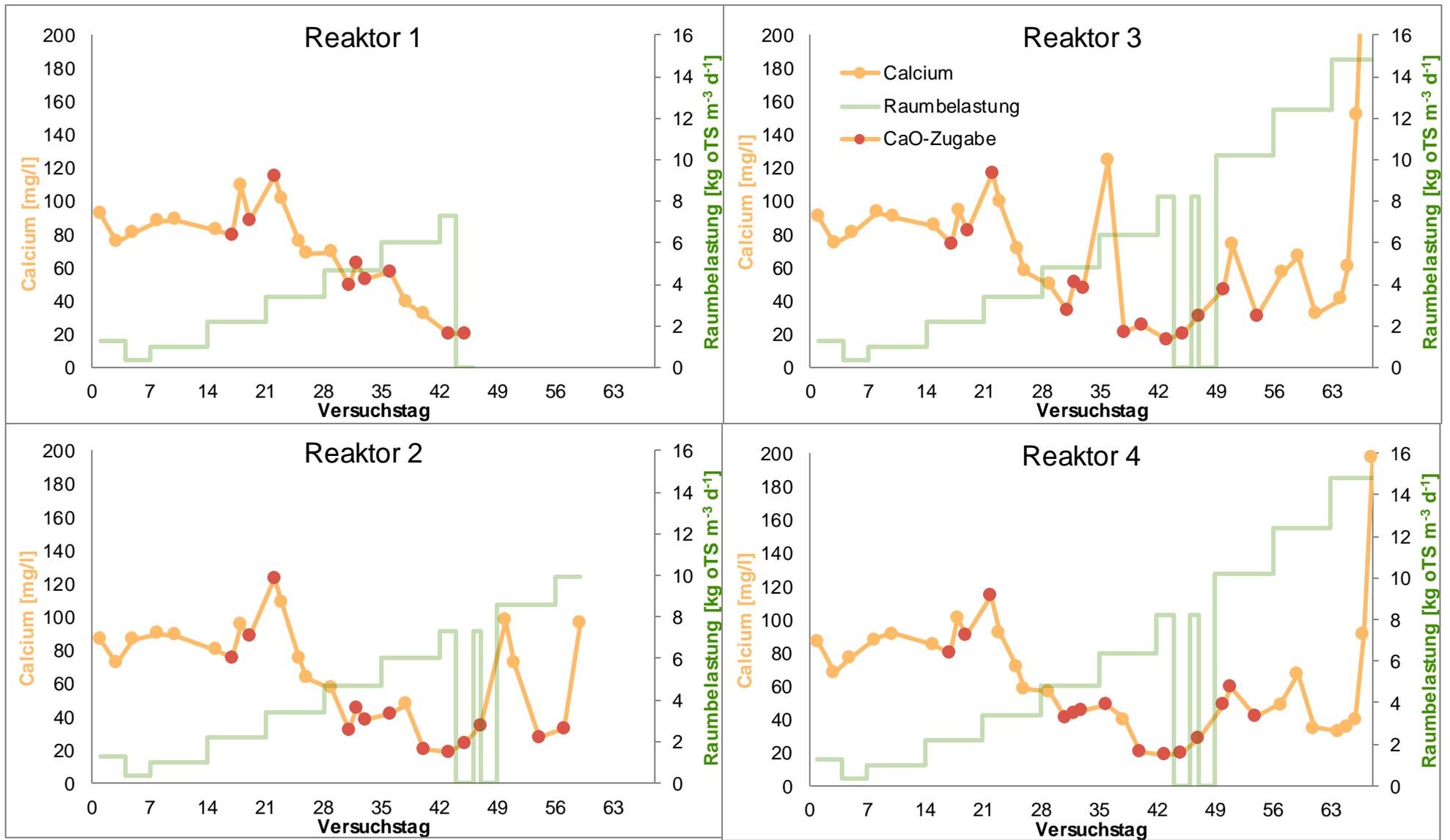


Abb. 11: Verläufe der Calcium-Konzentration während des FWI-Versuchs

4.2.3 Phosphat

Im Anschluss an die Adaptionphase lag die Phosphat-Konzentration in den vier Reaktoren bei 9 mg/l (R2, 3, 4) bzw. 7 mg/l (R1) (Abb. 12). Nach Erhöhung der Raumbelastung stieg die Phosphat-Konzentration in den Reaktoren auf 12 bis 15 mg/l an und schwankte bis zum 31. Versuchstag zwischen 5 und 16 mg/l. In den Tagen zwischen dem 32. und dem 38. Versuchstag war besonders in den Reaktoren 1 und 4 die Phosphat-Konzentration auf einem höheren Niveau mit etwa 20 mg/l. Danach kam es zu einem sehr starken Anstieg der Phosphat-Konzentration in allen vier Reaktoren im Bereich von 130 mg/l (R2) bis 186 mg/l (R1). Reaktor 1 wurde am 45. Versuchstag außer Betrieb genommen. Nach mehrfacher Zugabe von Calciumoxid zu den verbleibenden drei Reaktoren, sank diese sehr hohe Konzentration wieder auf ihr Anfangsniveau (am 51. Versuchstag), bevor sie danach wieder stark zunahm. Im Verlauf dieses Anstiegs übersäuerte Reaktor 2 am 59. Versuchstag, weshalb dieser ebenfalls außer Betrieb gesetzt wurde. In den Reaktoren 3 und 4 fiel der zweite starke Konzentrationsanstieg nicht so deutlich aus wie bei Reaktor 2. Erst ab dem 64. Versuchstag war die Phosphat-Konzentration erneut so hoch wie während des ersten starken Anstiegs. Am 68. Versuchstag wurden auch Reaktor 3 und 4 wegen Übersäuerung außer Betrieb genommen.

4. Ergebnisse und Diskussion

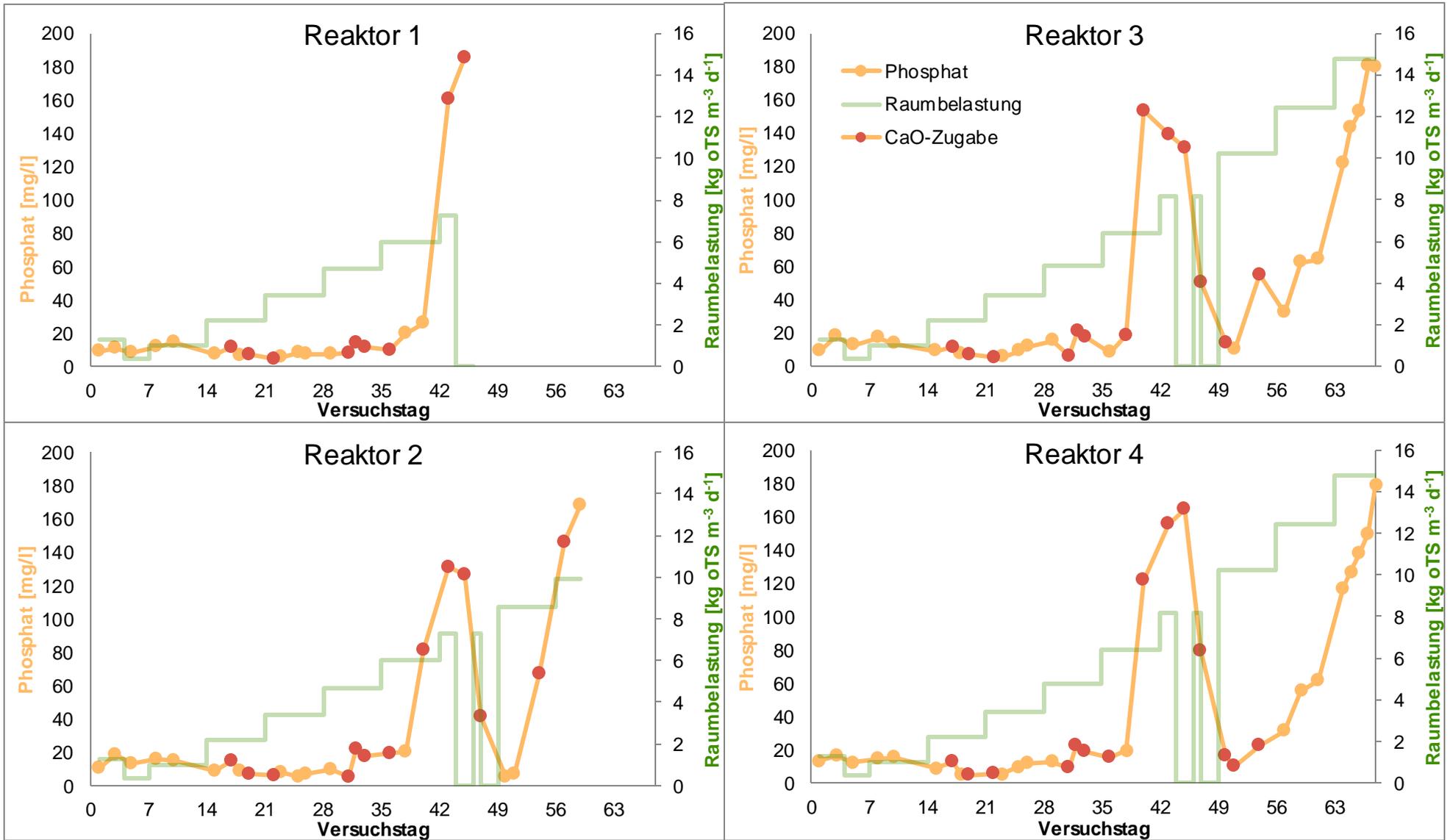


Abb. 12: Verläufe der Phosphat-Konzentration während des FWI-Versuchs

4.2.4 Ammonium

Zu Beginn des Versuches zur Steigerung der Raumbelastung lag die Ammonium-Konzentration in den vier Reaktoren zwischen 767 mg/l (R2) und 913 mg/l (R3) und nahm in allen vier Reaktoren bis zum 54 (Abb. 13). Versuchstag kontinuierlich um ca. 85% ab. Danach stieg die Konzentration besonders bei Reaktor 2 stark an.

Das Gleichgewicht von Ammoniak und Ammonium ist vom pH-Wert abhängig. Doch während der pH-Wert erst sank nachdem die Reaktoren schon übersäuert waren und sonst konstant bei 7,5 bis 7,3 war, änderte sich der Ammonium-Gehalt stetig. Auch das Ansteigen des Ammonium-Gehaltes am 54. Tag korreliert nicht mit dem pH-Wert.

Dieser Anstieg könnte auf die Übersäuerung in den Reaktoren und die damit verbundene Hemmung der Mikroorganismen zurückzuführen sein.

4. Ergebnisse und Diskussion

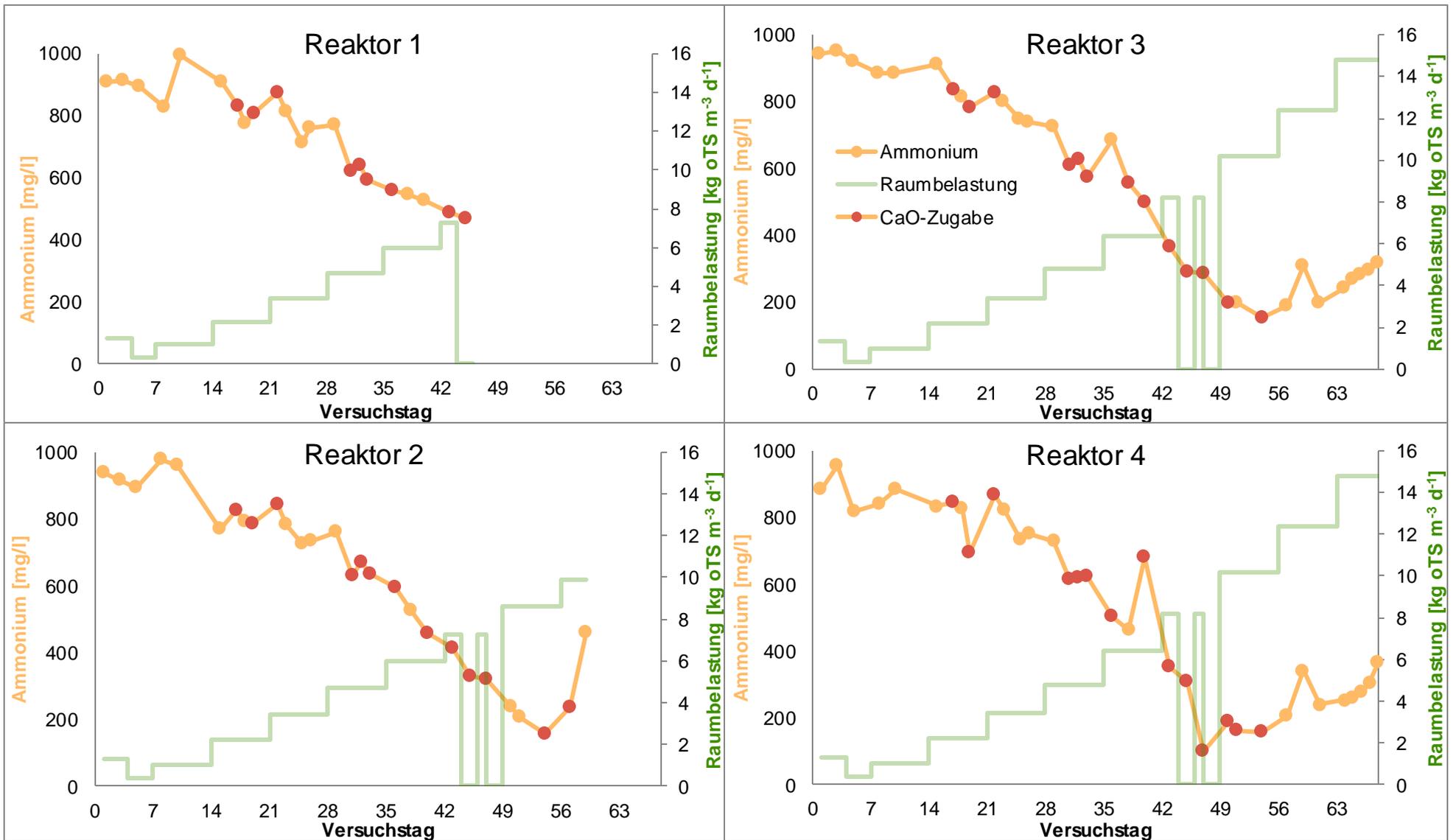


Abb. 13: Verläufe der Ammonium-Konzentration während des FWI-Versuchs

4.2.5 FOS/TAC-Wert und FWI

Zur Beurteilung der Aussagekraft des Frühwarnindikators wurde der FWI dem FOS/TAC-Wert gegenüber gestellt (Abb. 14). In den ersten beiden Versuchswochen erfolgte die Adaption, in der die Reaktoren bzw. die Mikroorganismen an Rapsöl gewöhnt wurden. Als Basiswert für den FWI ergab sich durch Mittelung in dieser Zeit ein Wert von 1,6, wobei der Ausschlag am 3. Tag von der Berechnung ausgeschlossen wurde. Während der Versuchszeit wurde als Stabilisierungsmaßnahme ab einem Wert von 4,8, also dem dreifachen Wert, Calciumoxid zu den Reaktoren gegeben.

Nachdem am 1. Versuchstag in der Adaptionsphase erstmalig Rapsöl zugegeben wurde, stiegen die beiden Indikatoren in allen Reaktoren stark an. Der FWI nahm dabei deutlicher zu als der FOS/TAC-Wert. Nachdem am 15. Tag die Raumbelastung und der Rapsölanteil stark erhöht wurden, kam es bei allen Reaktoren zu einer deutlichen Steigerung der Indikatoren auf das 3- bis 4fache. Infolgedessen wurde allen Reaktoren jeweils 72 g CaO zugegeben und nochmals 60 g, nachdem die Indikatoren zwei Tage später wieder stiegen. Am 22. Versuchstag konnte aus organisatorischen Gründen am selben Tag keine Bestimmung des FWI durchgeführt werden und nachdem der Wert des FWI nach einer CaO-Zugabe vom 17. Versuchstag am übernächsten Tag direkt wieder angestiegen war, wurde nach dem Wochenende am 22. Versuchstag ein erhöhter FWI-Wert erwartet. Daher wurde CaO zugegeben, obwohl die nachträgliche Bestimmung des FWI einen Tag später zeigte, dass kein erhöhter Wert in den Proben vorlag.

In Reaktor 1 kam es im Gegensatz zum restlichen Versuchsverlauf zwischen dem 19. und 26. Tag zu relativ deutlichen Unterschieden im Verlauf der beiden Indikatoren. Diese sind vermutlich auf die unterschiedlichen Messintervalle zustande gekommen, da zwischen diesen beiden Tagen aus organisatorischen Gründen im Labor kein Messwert für den FOS/TAC bestimmt werden konnte. Eigene Messungen zur Bestimmung des FWI konnten jedoch durchgeführt werden.

Die wöchentlichen Erhöhungen der Raumbelastung führten zu keinen starken Ausschlägen des FOS/TAC-Wertes. Dagegen zeigte der FWI am 31. bis zum 33. Tag erhöhte Werte (etwa 6), woraufhin mit Zugabe von einmal 15 g und zweimal 50 g reagiert wurde. Der Effekt der CaO-Zugabe vom 108. Tage wurde erst bei der Messung der Probe vom 32. einen Tag später deutlich. Die CaO-Zugaben führten in allen Reaktoren zunächst zu einem Absinken des FWI, bzw. keinem weiteren Anstieg in Reaktor 1. Ab dem 38. Tag steigt der FOS/TAC-Wert bei den

4. Ergebnisse und Diskussion

Reaktoren 1-3 deutlich und deutet damit auf eine drohende Übersäuerung hin. Beim FWI ist ein deutlicher Anstieg schon etwa zwei Tage vorher zu beobachten. Bei Reaktor 4 ist dieselbe Entwicklung erst zwei Tage später aufgetreten. Während sich der FOS/TAC-Wert in dieser Zeit von etwa 0,15 auf 0,3 verdoppelte, vervierfachte sich der FWI von etwa 5 auf 20. Zwischen dem 38. und dem 54. Tag wurde aller zwei Tage Calciumoxid zugegeben (Mengen zwischen 50 g und 160 g). Trotzdem stiegen die Werte der Indikatoren bis zum 43. Tag weiter. Erst danach gingen die Werte der Indikatoren auf das Niveau vor dem starken Anstieg zurück. Unterstützt wurde dieser Rückgang durch organisatorisch bedingte Ausfälle der Beschickungen am 45. und am 48. Tag.

In den folgenden Tagen zeigten beide Indikatoren eine drohende Übersäuerung von Reaktor 2 auf, die dann auch eintraf. Dabei stiegen beide Indikatoren ab demselben Tag an, der FWI stieg aber wiederum erheblich deutlicher. Zu Reaktor 4 wurde an den Tagen 50, 51 und 54 Calciumoxid zugegeben (70 g, 50 g und 40 g), da der FWI hoch war und erst noch weiter stieg, dann blieb der Wert zeitweise relativ konstant. Bei Reaktor 3 wurde nur am 50., nicht aber am 51. Tag, CaO zugegeben, was zum einem Anstieg beider Indikatoren führte. Eine weitere Zugabe am 54. Tag lies die Indikatoren wieder sinken. In Reaktor 2 waren die Indikatoren am 50. und 51. Tag vergleichsweise niedrig, weswegen auf eine CaO-Zugabe verzichtet wurde. Da an den Tagen 52 und 53 keine Probenahmen erfolgten, wurde die Übersäuerung in Reaktor 2 erst am 54. Tag bemerkt. Eine starke Zugabe von Calciumoxid konnte den Prozess nicht mehr stabilisieren.

Um auch eine Übersäuerung der Reaktoren 3 und 4 herbeizuführen, wurde auf eine CaO-Zugabe an den folgenden Tagen verzichtet, obwohl die Indikatoren eine Übersäuerung anzeigten. Dabei stieg der FWI bei Reaktor 3 und 4 etwa zwei Tage vor dem FOS/TAC-Wert an. Obwohl die Reaktoren 3 und 4 trotz Versäuerung noch weiter beschickt wurden, kam es nicht zu einem noch höheren Ansteigen des FWI, wie es der FOS/TAC-Wert zeigte, sondern zum Sinken der Werte.

4. Ergebnisse und Diskussion

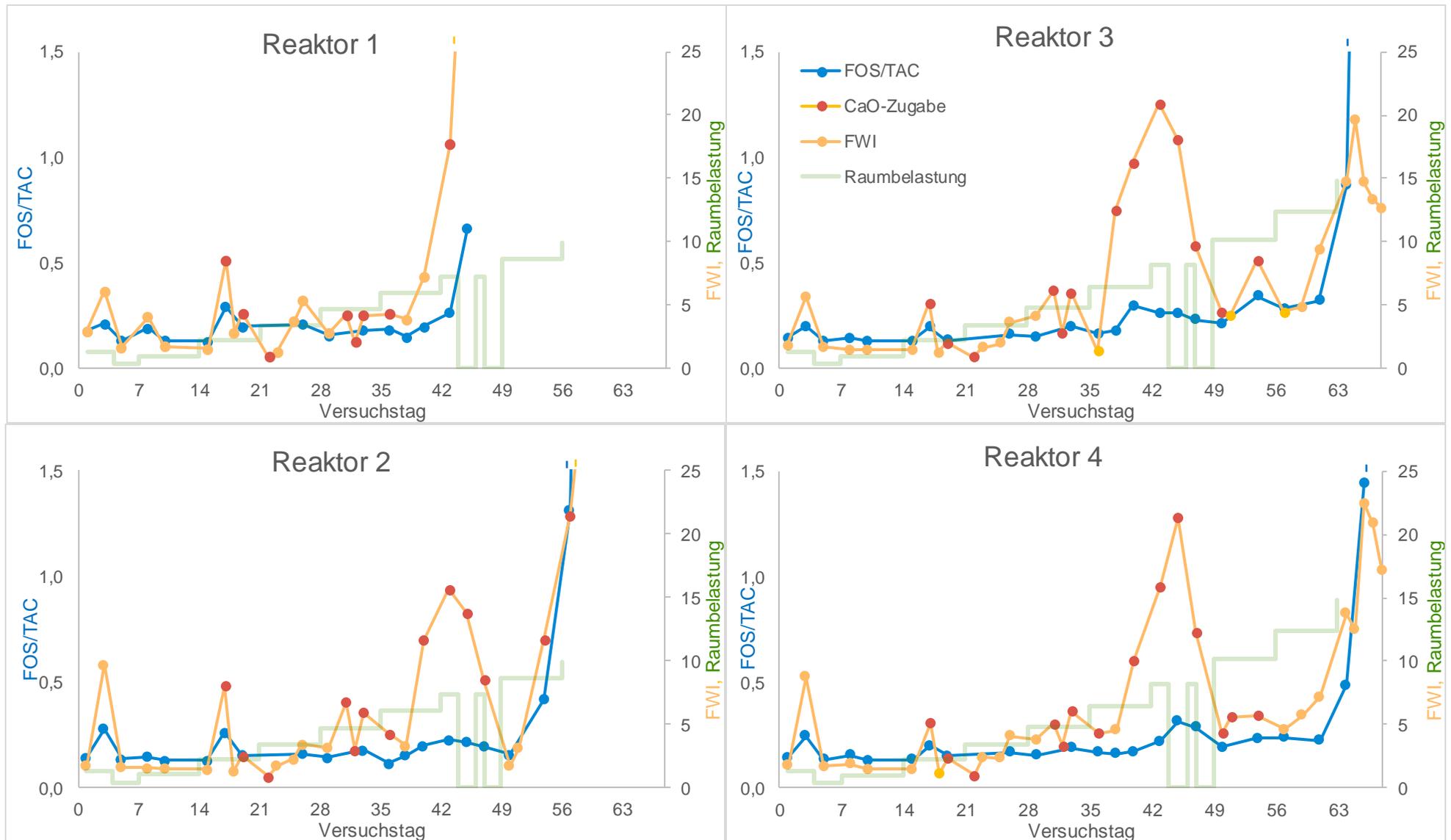


Abb. 14: Verläufe des FWI und des FOS/TAC-Wertes in den vier Reaktoren während des FWI-Versuchs

4.3 Steigerung der Raumbelastung zur Optimierung der Raum-Zeit-Ausbeute

Die Raumbelastung der Reaktoren wurde stetig erhöht, um folgende Fragestellungen zu erörtern:

- Wie gut lässt sich der Biogasprozess mit Calciumoxid-Zugabe stabilisieren?
- Wie hoch kann die Raumbelastung gesteigert werden, ohne dass es zu einer Übersäuerung kommt?
- Welchen Einfluss hat die Steigerung der Raumbelastung auf den spezifischen Biogasertrag?

In den ersten beiden Wochen des FWI-Versuchs nach der Adaptionphase wurden alle Reaktoren gleichstark belastet und auch gleichstark gesteigert ($2,2 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ auf $3,4 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) (Abb. 15). Für die Untersuchung des Frühwarnindikators war es notwendig eine Übersäuerung herbeizuführen. Es war jedoch nicht sicher, dass diese erreicht werden würde, gleichzeitig sollte es nicht zu früh zu einer Übersäuerung kommen. Daher wurde die Raumbelastung unterschiedlich schnell erhöht. Die Raumbelastung der Reaktoren 1 und 2 wurde jeden Montag um $1,3 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erhöht, während die der Reaktoren 3 und 4 etwas schneller gesteigert wurde. Am Montag der dritten Versuchswoche wurde die Raumbelastung um $1,4 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erhöht. In den folgenden Wochen wurde jeweils um $0,2 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mehr erhöht. Somit betrug die Steigerung in der letzten Woche $2,2 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ auf $14,8 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Der Anteil der organischen Trockensubstanz aus Rapsöls betrug in dieser Woche 96,2%.

Die zwei Lücken im Verlauf in der Woche vom 44. bis zum 49. Tag entstanden durch Ausfälle der Beschickung. Dargestellt sind die gemessenen Raumbelastungen, die von den vorgegebenen Werten etwas abweichen, da die bei der Beschickung notwendigen Massen an Rohschlamm und Rapsöl mit zuvor angenommenen oTS-Gehalten berechnet wurden. Reaktor 1 wurde schon am 44. Tag stillgelegt, da eine zu starke Schaumbildung die Gasuhr verschmutzte und so eine Messung des gebildeten Gasvolumens verhinderte.

4. Ergebnisse und Diskussion

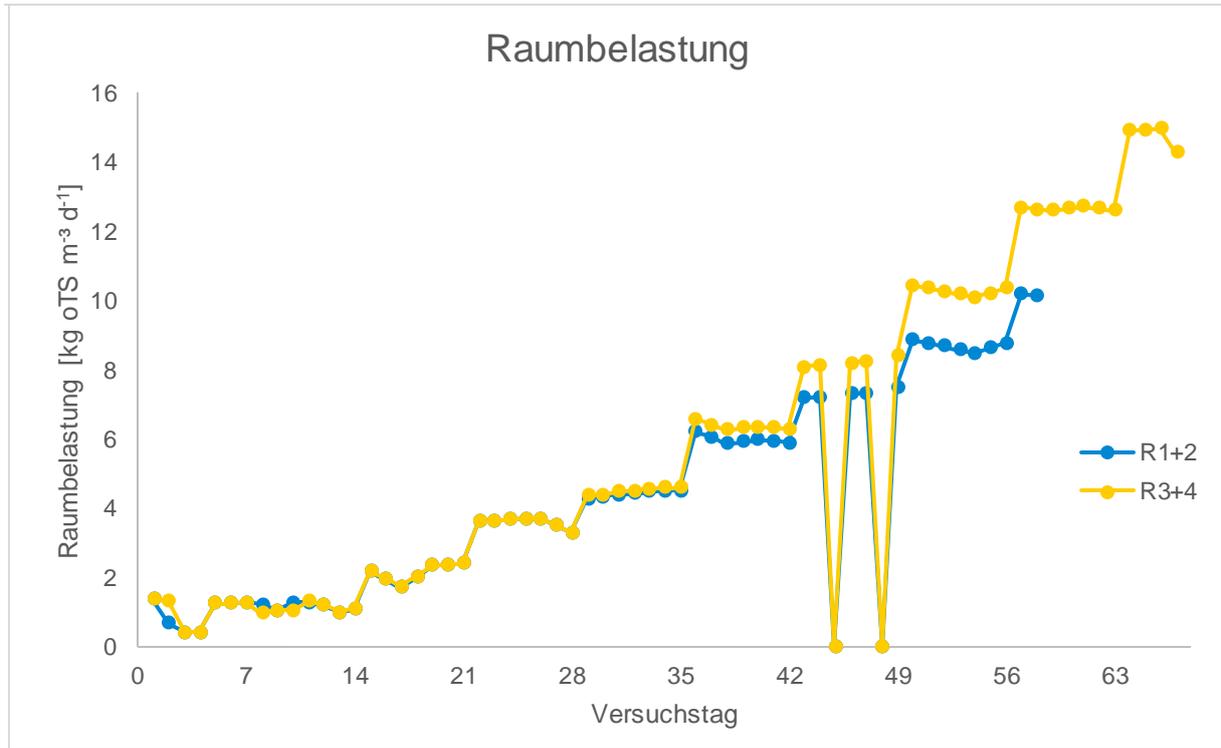


Abb. 15: Verläufe der Raumbelastungen während des FWI-Versuchs

4.3.1 Auswirkung der Steigerung der Raumbelastung auf den spezifischen Biogasertrag

Im Anschluss an die Adaptionphase lag der spezifische Biogasertrag in allen vier Reaktoren bei etwa 500 l/(kg oTS). Da der Anteil an Rapsöl bei der Beschickung wöchentlich erhöht wurde und Rapsöl laut Literaturangaben [Gronauer 2005: 1053 l/kg oTS] einen höheren spezifischen Gasertrag erzeugt als Rohschlamm [Archea 2015: 525 l/kg oTS], stieg der spezifische Biogasertrag bis etwa 1000 l/(kg oTS) an.

In der ersten Woche nach der Adaption (ab Tag 15) gab es kaum Unterschiede zwischen den Gaserträgen der einzelnen Reaktoren, da alle Reaktoren gleich beschickt wurden. In der zweiten Woche wurde der oTS-Anteil des Rapsöls verhältnismäßig am stärksten erhöht (von 49% auf 69%), dadurch kam es zum deutlichsten Anstieg des spezifischen Biogasertrages. Nach der erneut starken Erhöhung des Rapsöl-Anteils auf 80% kam es zum Einbruch der Werte am 29. Tag. Die Gasproduktion stieg an, jedoch nicht im selben Maße wie die oTS-Zufuhr. Innerhalb von ein bis zwei Tagen erreichte der spezifische Biogasertrag wieder die Werte der Vorwoche. Allerdings lagen die Werte der Reaktoren 4 und 2 deutlich unter den Werten der anderen Reaktoren. Bei der nächsten wöchentlichen Erhöhung kam es erneut zu erheblich niedrigeren Werten, da die erhöhte oTS-Zufuhr nicht sofort zu einer ebenso stark erhöhten

4. Ergebnisse und Diskussion

Gasproduktion führte. Dabei ging der Wert des spezifischen Biogasertrages bei Reaktor 3 ab Versuchstag 33 deutlich stärker zurück als bei den anderen Reaktoren. Grund hierfür ist ein Fehler in der Bedienung der Technikumsanlage. Die Spülung des Schauglases wurde über das Wochenende offen gelassen, was zum Abkühlen des Reaktors auf etwa 30°C führte. In den folgenden fünf Tagen erholte sich die Gasproduktion im Reaktor wieder. Am 42 Tag kam es erneut zum Absinken des spezifischen Biogasertrages, obwohl mehr Biogas erzeugt wurde als zuvor.

Im Reaktor 1 wurden am 44. Tag erhebliche Mengen Schaum gebildet, wobei die Schaumfalle sich komplett füllte und überlief. In der Folge verschmutzte die Gasuhr und Reaktor 1 musste stillgelegt werden.

Wegen der Ausfälle der Beschickung konnte der spezifische Biogasertrag in dieser Woche nicht durchgehend berechnet werden. Der erhebliche Einsatz von Calciumoxid (siehe Tab. 5 im Anhang) und die Phase ohne Beschickung hatte die Verringerung der Konzentration der organischen Säuren zur Folge (Abb. 10). Dies reichte offenbar aus, um den Prozess zu stabilisieren und es kam zu einer erheblich gesteigerten Biogasproduktion.

Die weiteren Erhöhungen der Raumbelastungen in den folgenden drei Wochen konnten offenbar durch die Calciumoxid-Zugabe nicht ausreichend kompensiert werden. Die organischen Säuren reicherten sich an. Infolge der Übersäuerung wurde die Methanogenese gehemmt und folglich kam es zum Erliegen der Biogasproduktion.

4. Ergebnisse und Diskussion

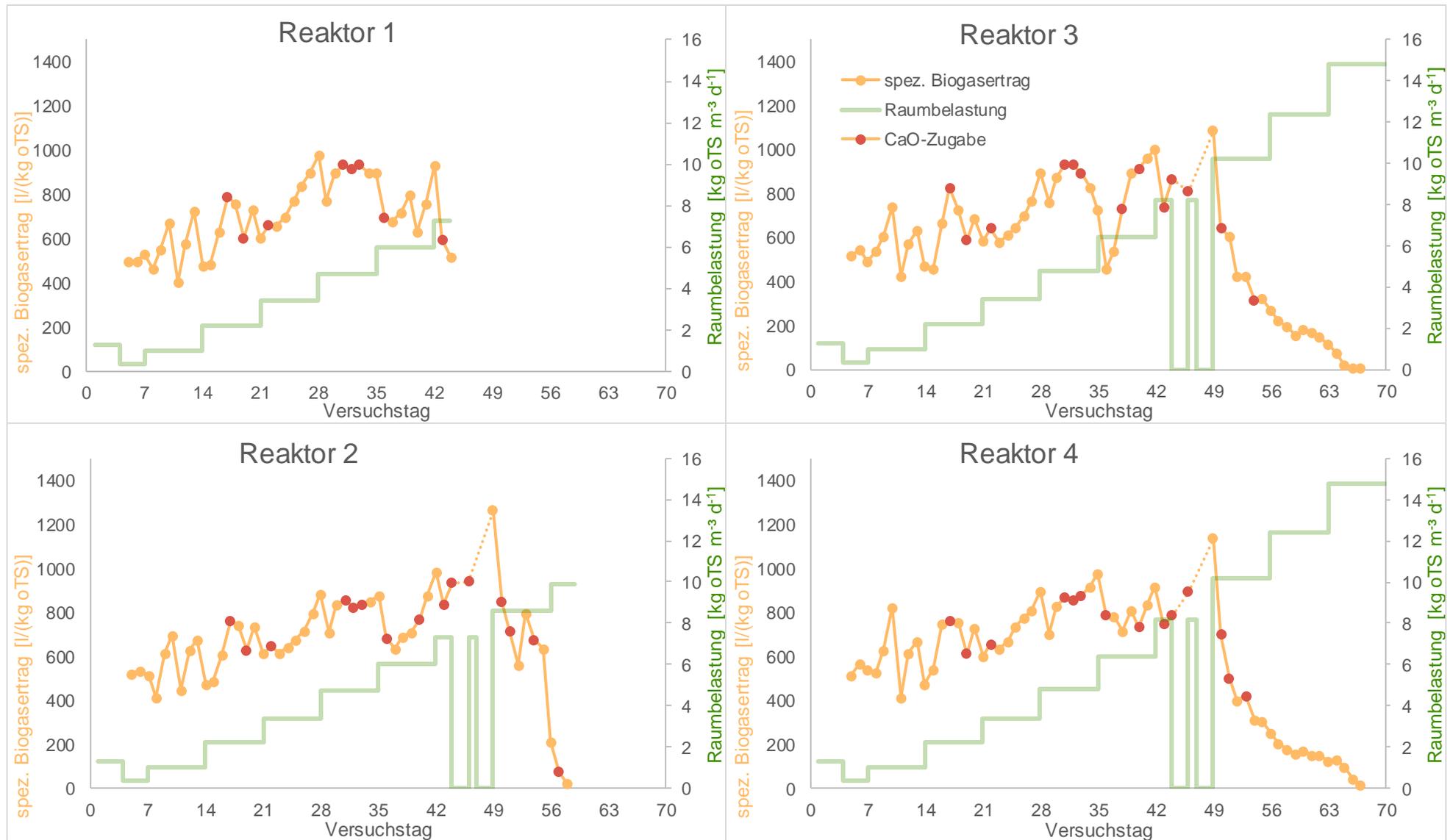


Abb. 16: Verläufe des spezifischen Biogasertrages während des FWI-Versuchs

4.3.2 Aggregatbildung

Ab dem 36. Versuchstag, 26 Tage nach der ersten CaO-Zugabe (262 g über sechs Tage verteilt), fanden sich weißliche Aggregate von wenigen Millimetern Größe im Faulschlamm. Im Verlauf des Versuchs wurden die glatten, ebenen Aggregate größer (ca. 2 cm) und außen mehr sandfarben. Im Inneren waren sie meist schwarz und porös. Am Ende des Versuchs fand sich auf der Oberfläche in der Füllstandsanzeige des Reaktors 3 ein Aggregat mit 4 bis 6 cm Größe (Abb. 17). An dieser Stelle wurde es nicht vom umgewälzten Faulschlamm erfasst. Im Gegensatz zu den kleinen Exemplaren, hatte es auf der kompletten Oberfläche kleine rundliche Einkerbungen (1 bis 2 mm). Zum Zeitpunkt der Öffnung des Reaktors war der Anteil organischer Stoffe im Faulschlamm sehr hoch (3,2% im Vergleich zu 1,8% bei niedriger Raumbelastung). Da die Mikroorganismen durch den sehr niedrigen pH-Wert von 5,4 stark gehemmt waren und auch kaum noch Biogas produzierten, ist davon auszugehen, dass es sich zu einem großen Teil um nichtumgesetztes Rapsöl handelt. Die Oberfläche der Aggregate war entsprechend ölig-rutschig.



Abb. 17: Aggregat, das sich am Ende der Versuche im Reaktor befand (4 cm bis 6 cm groß)

Über den Zeitraum des FWI-Versuchs von 53 Tagen wurde den Reaktoren zwischen 545 g und 722 g Calciumoxid zugegeben. Mit der täglichen Entnahme wurden insgesamt allerdings nur 15,3 g bis 22,2 g gelöstes Calciumoxid entnommen. Zusammen mit der Anfangs- und Endkonzentration ergibt sich, dass eine Menge von 543 g bis 703 g CaO ungelöst im Reaktor blieb (Tab. 6 im Anhang). Welche Menge davon bei der täglichen Entnahme mitentnommen wurde, wurde nicht erfasst. Mit dieser Bilanz ist davon auszugehen, dass die Aggregate zum Teil aus Calcium bestehen.

5. Zusammenfassende Diskussion

5.1 Untersuchung der Wirkung der Desintegration

Um zu ermitteln, in wie weit die elektrokinetische Desintegration einen Einfluss auf den behandelten Klärschlamm bzw. die Fermentation hat, wurde eine Technikumsanlage betrieben. Hierbei wurden je zwei Bioreaktoren mit behandeltem und zwei mit unbehandeltem Rohschlamm beschickt und der spezifische Biogasertrag verglichen. Nach zwei Verweilzeiten, insgesamt 56 Tage, mit einer durchschnittlichen Raumbelastung von $1,3 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ergab sich nur einer sehr geringer Unterschied in der Gasproduktion. Eine Wirkung der elektrokinetischen Desintegration auf den spezifischen Biogasertrag konnte daher nicht belegt werden.

In anderen Kläranlagen, z.B. der im Regierungsbezirk Köln, konnten mit der Desintegrationseinheit offenbar Verbesserungen bei der Biogasproduktion erzielt werden [Vogelsang 2015b]. Es kommen verschiedene Einflussfaktoren in Frage, die dazu führten, dass dies an der Kläranlage Rosental in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden konnte.

Die Gaserträge der Fermenter unterliegen Schwankungen aufgrund schwankender Zusammensetzungen des Klärschlammes, einer unterschiedlichen Biozönose in den verschiedenen Bioreaktoren und weiteren, verfahrenstechnischen Faktoren. Auf diese Weise könnte ein vermehrter Biogasertrag von mehreren Prozent überdeckt worden sein.

An den Hochspannungsmodule selbst könnten unterschiedliche Einstellungen zu Unterschieden führen. Die Spannung zwischen Elektrode und Rohrwand wurde von einem entsprechenden Techniker eingestellt, wobei diese auf einer Berechnung beruht, die den Volumenstrom durch die Module, den Trockensubstanzgehalt des Schlammes und Erfahrungswerte berücksichtigt. Da auch die Erdung überprüft wurde, ist an dieser Stelle nicht von einem Fehler auszugehen.

Zum anderen kann die Beschaffenheit des zu behandelten Schlammes die Wirkung beeinflussen. Eine Analyse der Zusammensetzung des Überschussschlammes der Kläranlage Rosental im Vergleich zu der eines Schlammes einer Kläranlage, bei der die Desintegration eine positive Wirkung zeigt, könnte einen Hinweis liefern.

Auch die Verweilzeit des Überschussschlammes im Belebungsbecken kann zu Unterschieden in der Effektivität einer Desintegration führen. Wird durch ein hohes Schlammalter schon ein zu großer Teil der verwertbaren Organik im Belebungsbecken umgesetzt, ist das Potential einer Desintegration erheblich geringer. In der Kläranlage Rosental wird mit einem

5. Zusammenfassende Diskussion

Schlammalter von 13 Tagen gefahren, womit man im empfohlenen Bereich des ATV (2000) liegt und klar unter den 30 Tagen ist, die Kopp (2010) als sinnvolle Grenze angibt, ab der Probleme bei der Entwässerbarkeit auftreten können.

Ebenso hat die Verweilzeit des Faulschlammes in den Bioreaktoren einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Nutzen einer Desintegration. Mit einer höheren Verweilzeit in den Bioreaktoren sinkt der Nutzen einer Desintegration, da die Mikroorganismen in einer längeren Verweilzeit den Effekt der Desintegration, das Auflockern der Flocken und Zersetzen der Zellwände, zunehmend selber herbeiführen können [DWA 2015]. Im Klärwerk Rosental ist die Verweilzeit des Faulschlammes in den Bioreaktoren mit etwa 30 Tagen relativ hoch [Braha 2006].

Des Weiteren kann es bei Pumpen durch Einwirkung von hohen Drücken oder Scherkräften zu einer Desintegration kommen, die dann auch die Reaktoren mit unbehandeltem ÜSS betreffen würde. Allerdings bauen die eingesetzten Exzentrerschneckenpumpen nur geringe Drücke auf und erzeugen kaum Scherkräfte.

Ein weiterer Umstand, der den Vergleich zwischen unbehandelten und desintegrierten ÜSS beeinträchtigt, ist die Entnahmestelle des unbehandelten ÜSS. Diese liegt aus baulichen Gründen unmittelbar vor dem Desintegrationsmodul, wodurch es auch an dieser Stelle schon einen geringen Einfluss des elektrischen Feldes gibt.

Der Effekt der elektrokinetischen Behandlung auf die Entwässerbarkeit lag bei der Bestimmung der Entwässerbarkeit mittels CST-Messgerät offenbar unter der Nachweisgrenze.

5.2 Einfluss der Aggregate

Ab dem 36. Tag bildeten sich sichtbare Aggregate im Faulschlamm.

Mit Zugabe größerer Mengen Calciumoxid in einer Stabilisierungsmaßnahme wurden die Aggregate größer. Auch bei den Versuchen von Liebrich entstanden nach Zugabe großer Mengen Calciumoxid sehr große Aggregate.

Ab dem 43. Tag sank der pH-Wert in Reaktor 3 und 4 unter 7 (Abb. 18) und damit in einen Bereich, in dem Methan-Bakterien gehemmt sind. Die Gasproduktion brach fünf Tage später stark ein, jedoch wurde noch über zwei Wochen lang Biogas produziert. Grund hierfür könnten die gebildeten Aggregate sein. Untersuchungen von Kleyböcker (2012) zeigten, dass es

5. Zusammenfassende Diskussion

innerhalb der Aggregate ein Gefälle des pH-Wertes geben kann, wodurch der pH-Wert im Kern im Gegensatz zur Außenseite im neutralen Bereich liegen kann. Zudem ist das Innere der Aggregate porös, wodurch es eine große spezifische Oberfläche bietet, auf der sich Bakterien ansiedeln können. Durch diese lokal besseren Milieubedingungen können die Methanbakterien dort Stoffwechsel betreiben, obwohl die gemessenen Werte in der Faulschlammflüssigkeit ungünstig sind.

Durch die große Menge an Aggregaten im Faulschlamm war die Durchmischung im Reaktor wahrscheinlich nicht mehr optimal. Das heißt, dass der pH-Wert der Probe nicht mehr für den ganzen Reaktor repräsentativ sein muss. In Bereichen mit einer schlechten Durchmischung könnten sich organische Säuren noch nicht angereichert haben, der pH-Wert ist dort dann höher und günstiger für entsprechende Bakterien.

Nachdem am 64. Tag der pH-Wert noch deutlicher unter 7 bzw. in Reaktor 3 sogar unter 6 sank, brach auch die Biogasproduktion ganz ein.

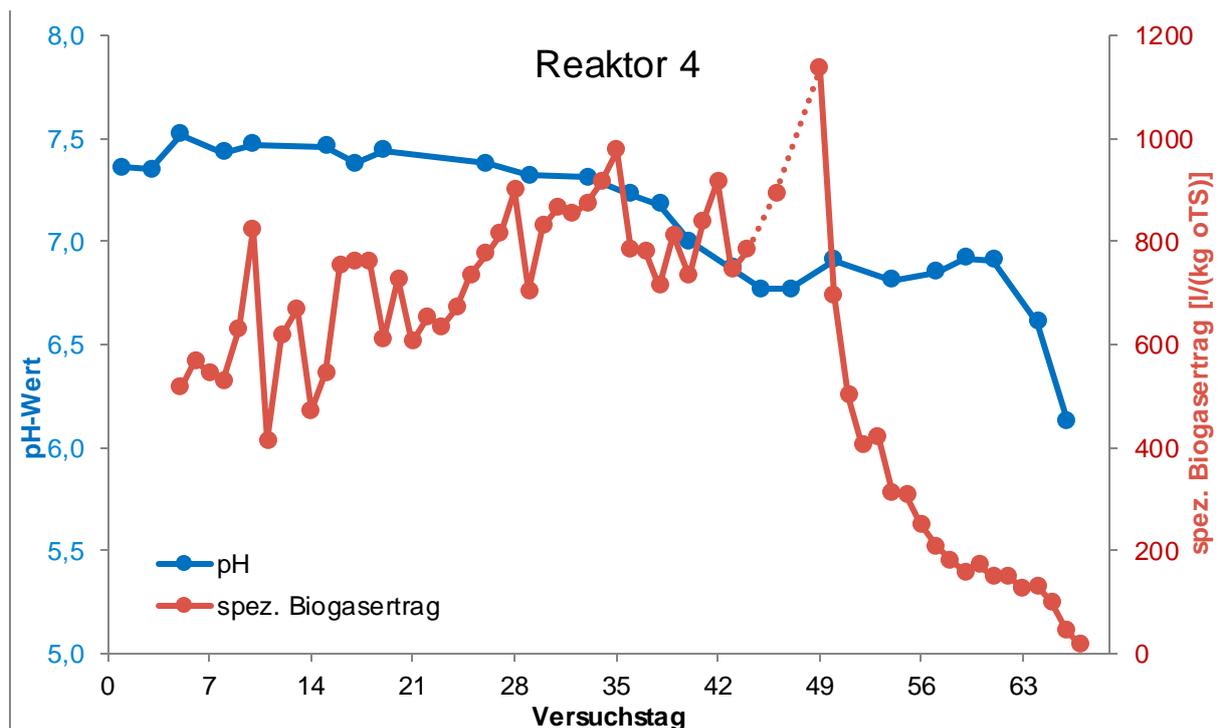


Abb. 18: Verlauf des spezifischen Biogasertrags im Vergleich zum pH-Wert von Reaktor 4

Während der pH-Wert ab dem 36. Tag von 7,3 auf 6,8 am 45. Tag sank, stieg die Phosphat-Konzentration stark an auf 150 mg/l (Abb. 19). Bis zum 51. Tag sank diese Konzentration wieder auf ihr vorheriges Niveau von etwa 10 mg/l ab.

5. Zusammenfassende Diskussion

Während der biologischen Abwasserreinigungsstufe nehmen bestimmte Bakterien sehr viel Phosphat auf. Diese könnten sich durch den Abfall des pH-Wertes zurückgelöst haben und zu dem sprunghaften Anstieg der Phosphat-Konzentration geführt haben.

Im selben Zeitraum blieb die Calcium-Konzentration annähernd konstant bei etwa 21 mg/l, obwohl über diese zwei Wochen insgesamt 2000 mg/l Calcium zu Reaktor 3 eingebracht wurden. Zeitgleich zu dieser Zugabe großer Mengen an Calciumoxid kam es zur Bildung größerer Aggregate. Auch bei Untersuchungen von Liebrich (Dissertation in Vorbereitung) kam es unter ähnlichen Bedingungen zur Bildung von Aggregaten nach der Zugabe von Calciumoxid. Eine REM-EDX-Analyse der Aggregate verschiedener Reaktoren zeigte neben Calcium und Kohlenstoff auch einen hohen Anteil an Phosphor. [Liebrich]

Vermutlich bildeten sich die unlöslichen Aggregate auch in den Versuchen der vorliegenden Arbeit aus dem zugesetzten Calcium. Der sehr starke Abfall der Phosphat-Konzentration direkt nach der Rücklösung könnte demgemäß ebenfalls auf die Aggregatbildung zurückzuführen sein. Es ist anzunehmen, dass das Phosphat ebenfalls zu einem Bestandteil der Aggregate wurde und so nicht mehr in der Lösung messbar war.

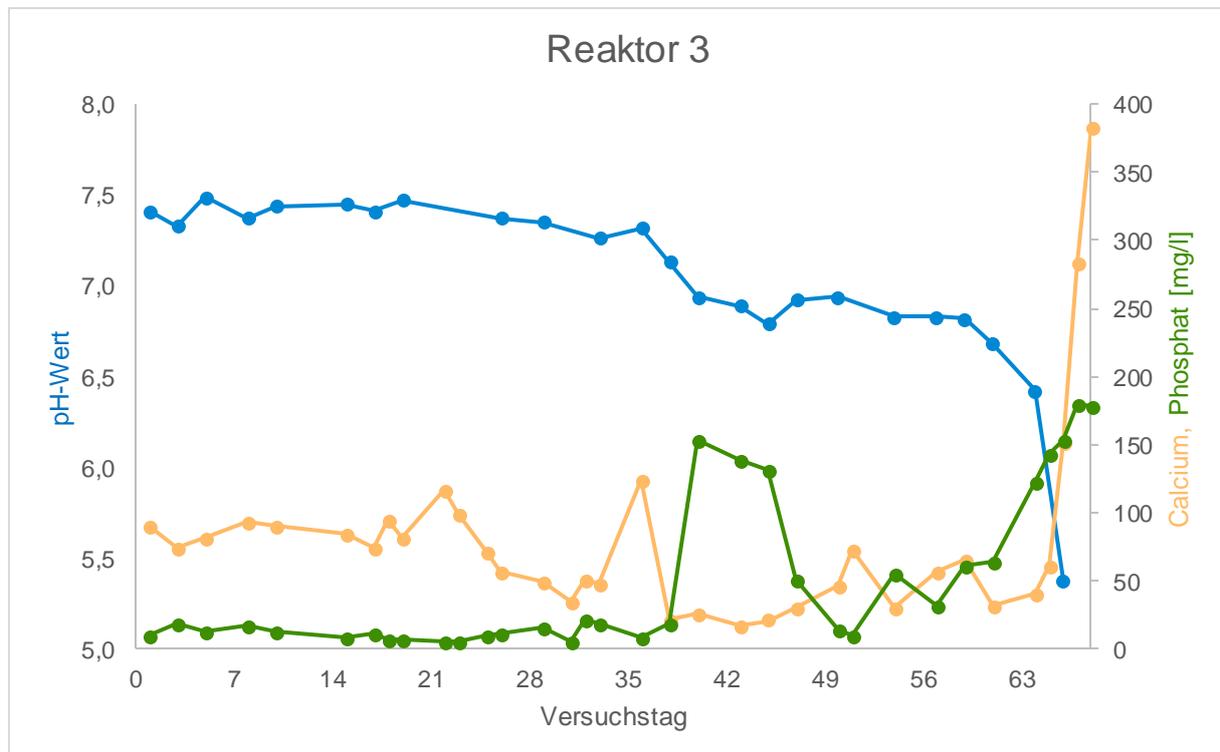


Abb. 19: Vergleich der Verläufe des pH-Wertes und der Konzentrationen von Calcium und Phosphat von Reaktor 3

5. Zusammenfassende Diskussion

Am Ende der Versuche von Reaktor 2 bis 4 stiegen die Calcium- und Phosphat-Konzentrationen wieder stark an (Abb. 19), obwohl kein weiteres Calciumoxid mehr zudosiert wurde. Als Calcium- und Phosphat-Quelle kommen zum einen die Mikroorganismen infrage und zum anderen die Aggregate. Das Phosphat aus den Bakterien ging vermutlich schon beim ersten starken Anstieg der Konzentration in Lösung (Tag 40 bis 45). Außerdem war der pH-Wert zu diesem Zeitpunkt schon unter 6,5 (Reaktor 4) bzw. 5,5 (Reaktor 3), was sicher zur Hemmung der Bakterien führte. Zudem wurde auch kaum noch Biogas gebildet ($<25 \text{ l}/(\text{kg oTS})/\text{d}$), was dafür spricht, dass die Milieubedingungen auch in den Aggregaten zu ungünstig für die Bakterien waren. Stoffwechselfvorgänge bzw. aktives Rücklösen von Phosphaten und Calcium durch Bakterien sind demzufolge unwahrscheinlich. Daher ist anzunehmen, dass der niedrige pH-Wert zur chemischen Auflösung der Aggregate führte. Calcium und Phosphat gingen wieder in Lösung und führten zur drastischen Steigerung der Konzentrationen. Gleichzeitig reduzierten sich damit auch die Porenräume der Aggregate, in denen wahrscheinlich die noch gering vorhandene Gasproduktion stattfand. Die Biogasproduktion kam damit ab dem 64. Tag komplett zum Erliegen.

5.3 Frühwarnindikator

Während der ersten drei Wochen des FWI-Versuches mit geringer Raumbelastung war der Wert des FWI vor allem von der Konzentration der organischen Säuren abhängig. In den folgenden Wochen mit steigender Raumbelastung gewann die Konzentration an gelöstem Calcium an Bedeutung. Während der drohenden Übersäuerung ab dem 36. Tag wurde der FWI überwiegend durch den Abfall der Calcium-Konzentration beeinflusst. Als der Frühwarnindikator am 38. Tag einen Wert von 12,5 angab, wurde der Entsäuerungsprozess eingeleitet indem Reaktor 3 mit ca. 280 mg/l Calcium beschickt wurde. Über die zwei folgenden Wochen hinweg wurden weitere große Mengen Calciumoxid zugeführt. Diese Maßnahme führte zunächst nicht zu einer Stabilisierung des Prozesses, der FWI stieg jedoch weniger schnell. Im Verlauf wurde ein maximaler Wert von 20,9 für den FWI erreicht. Erst nach einer Woche setzte eine Stabilisierung ein, bei der die Calcium-Konzentration im Reaktor stieg (43. Tag). Die Konzentration der organischen Säuren ging dabei erst nach einer sehr großen

5. Zusammenfassende Diskussion

zugewetzten Calcium-Menge von 530 mg/l zurück. Unterstützt wurde die Stabilisierung hierbei von einer Unterlassung der Beschickung am 45. Tag.

Das Risiko einer Übersäuerung steigt mit einer höheren Raumbelastung und die Raumbelastung wurde noch weiter erhöht. So wurde die nächste Übersäuerung vom FWI eine Woche später angezeigt (54. Tag), indem ein schneller Anstieg des Indikators auf 8,5 erfolgte. Nach einer Zugabe von ca. 280 mg/l Calcium stabilisierte sich der Prozess kurzzeitig wieder, wobei dieselbe Menge bei der zuvor drohenden Übersäuerung zu keiner Stabilisierung führte. Offenbar ist eine solche Stabilisierungsmaßnahme effektiver, wenn sie besonders frühzeitig angewandt wird.

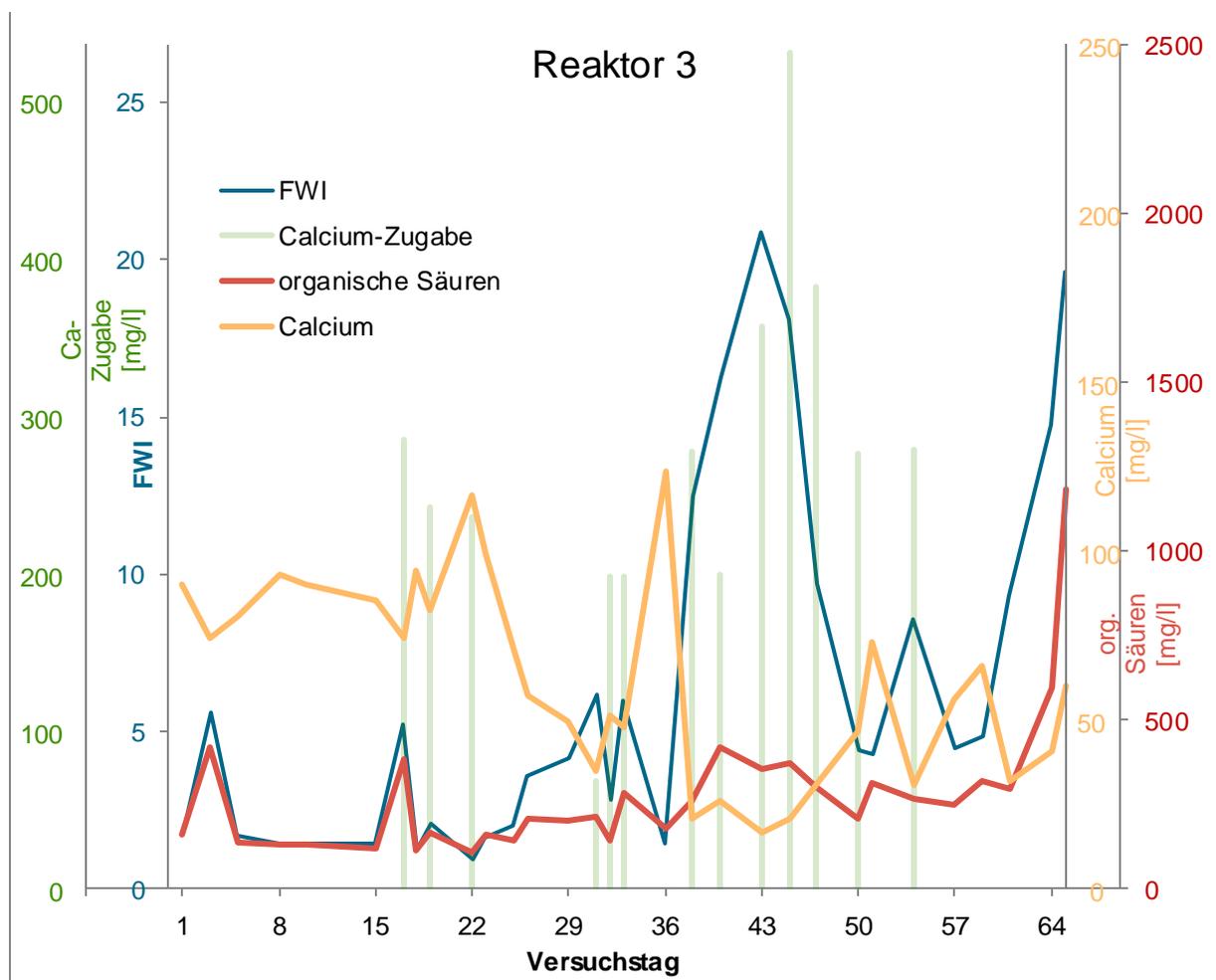


Abb. 20: Gegenüberstellung der Konzentrationen von Calcium und organischer Säuren, des FWI und der Calcium-Zugabe in Reaktor 3

Zum Zeitpunkt der Versäuerung von Reaktor 1 war die Calcium-Konzentration auf seinem niedrigsten Stand (20 mg/l), während die Konzentration der organischen Säuren auf seinem Höchststand war. Bei den anderen drei Reaktoren stiegen mit der Versäuerung allerdings die

5. Zusammenfassende Diskussion

Konzentrationen aller gemessenen Stoffe an. Dieser Umstand zeigt, dass der FWI bei einer bereits vorliegenden Übersäuerung keine sinnvolle Aussage mehr liefert. Nach einer starken Übersäuerung müsste abgewartet werden bis die Stabilisierungsmaßnahmen zum Absinken der Säure-Konzentration geführt haben und Calcium bei dem dann niedrigeren pH-Wert wieder Aggregate bilden könnte.

6. Zusammenfassung

Eine mögliche Optimierungsmaßnahme für eine Klärschlammvergärung ist die elektrokinetischen Desintegration. Ziel dieser Arbeit war es durch Untersuchungen diese Behandlungsmethode hinsichtlich der Wirksamkeit einzuschätzen. Mit den durchgeführten Versuchen konnte eine Verbesserung bei der Biogasproduktion und eine Veränderung des Entwässerungsverhaltens nicht belegt werden. Beide Effekte lagen offenbar unter der Nachweisgrenze. Auf eine Wirtschaftlichkeitsanalyse der elektrokinetischen Desintegration wurde daher verzichtet.

In einer anschließenden Versuchsreihe wurde ein Frühwarnindikator als Parameter zur Prozesssteuerung getestet, welcher vor einer Destabilisierung des Biogasprozesses durch Übersäuerung frühzeitig warnen sollte. Der FWI entspricht dem Verhältnis der Konzentration organischer Säuren zu der Konzentration von Calcium.

Um eine Übersäuerung vorsätzlich herbei zu führen, wurde die Raumbelastung der Reaktoren schrittweise bis auf $14,8 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erhöht. Dabei wurde für jeweils zwei der vier Reaktoren die Raumbelastung unterschiedlich schnell erhöht. Die Versuche zeigten, dass eine unterschiedlich starke Steigerung der Raumbelastungen nicht zu deutlichen Unterschieden zwischen den Verläufen des spezifischen Biogasertrages und den gemessenen Konzentrationen führte. Der Unterschied der Raumbelastungen wahrscheinlich zu gering gewählt. Dabei übersäuerten die Reaktoren mit stärkerer Steigerung der Raumbelastung später als die beiden Reaktoren, bei denen langsamer gesteigert wurde. Anscheinend überlagerten die Einflüsse anderer Schwankungen die unterschiedlich starke Erhöhung der Raumbelastung. Im Vergleich zum ebenfalls bestimmten FOS/TAC-Indikator zeigte der FWI drohende Übersäuerungen teilweise ein bis zwei Tage eher an. Diese zusätzliche Zeit konnte für effektivere Stabilisierungsmaßnahmen verwendet werden. Hierzu wurde bei erhöhten Wertes des FWI Calciumoxid zu den Reaktoren gegeben, was eine Übersäuerung verhindern konnte. Im Zuge dieser Stabilisierung kam es wahrscheinlich zur Ausfällung von organischen Säuren mit Calcium und Phosphat, wodurch sich Aggregate bildeten. Auf diese Art und Weise war es möglich höhere Raumbelastungen zu fahren ohne, dass es zu Übersäuerungen kam. Bei einer sehr großen Dosierung von CaO kam es allerdings zur Bildung sehr großer Aggregate, welche zu Problemen im Reaktor geführt haben können. So verstopfen die Aggregate Rohre und Schläuche und bilden eine schwimmende Schicht auf Faulschlamm-Oberfläche, welche zu einer schlechteren Durchmischung führen könnte.

7. Handlungsempfehlungen

Da die Desintegration bei anderen Anlagen zu Verbesserungen verschiedene Werte geführt hat, die Investition in das BioCrack-System schon getätigt sind und nur sehr geringe Betriebskosten anfallen, sollten weitere Versuche durchgeführt werden, um die Module besser zu nutzen.

Da die Entnahmestelle für den unbehandelten ÜSS, direkt vor den Desintegrationsmodulen, ungünstig gewählt ist, sollte bei weiterführenden Untersuchungen eine andere Entnahmestelle genutzt werden, um eine Beeinflussung des unbehandelten ÜSS zu vermeiden. Bzw. könnte man die Desintegrationseinheit an einer anderen Stelle einbauen.

Um die Stärke des Einflusses der Verweilzeit des Faulschlammes in den Fermentern auf die Wirkung der elektrokinetischen Behandlung besser beurteilen zu können, ist es ratsam den durchgeführten Versuch mit einer deutlich geringeren Verweilzeit zu wiederholen. Dies könnte durch Erhöhung der Raumbelastung mit zusätzlichem Rohschlamm oder Reduzierung des Reaktionsvolumens erfolgen.

Da die Bestimmung der Entwässerbarkeit mittel CST-Messung nicht reproduktiv durchgeführt werden konnte und die Messungen sehr zeitaufwändig sind, empfiehlt es sich in späteren Untersuchungen eine andere Methode zur Bestimmung der Entwässerbarkeit zu nutzen. Eine andere Möglichkeit ist die thermogravimetrische Bestimmung des TR(A)-Wertes, welcher von Kopp (2001) beschrieben wurde und auch eine Aussage über den erreichbaren Entwässerungsgrad liefert.

Da der Frühwarnindikator in den durchgeführten Versuchen eine mögliche Destabilisierung des Biogasprozesses ein bis zwei Tage vor dem FOS/TAC-Wert anzeigen konnte, sollten weitere Versuche mit dem FWI durchgeführt werden. Vor allem wenn höhere Raumbelastungen gefahren werden sollen, könnte in Betracht gezogen werden den FOS/TAC-Wert als Indikator für den Stabilisierungsgrad durch den FWI abzulösen.

Für einen besseren Vergleich zwischen FOS/TAC-Wert und FWI ist es ratsam in zukünftigen Untersuchungen die Indikatoren täglich zu bestimmen. Eine Aussage darüber, wie viel früher im Vergleich zum FOS/TAC-Wert der FWI eine drohende Übersäuerung anzeigen kann, ist dann besser möglich.

7. Handlungsempfehlungen

Sollte der in dieser Arbeit getestete Frühwarnindikator zur Überwachung eines Prozesses eingesetzt werden, sollte besonders bei hohen Raumbelastungen die Bestimmung des FWI in möglichst täglichen Intervallen erfolgen. Sollte der FWI eine drohende Übersäuerung anzeigen, ist die dann notwendige Stabilisierungsmaße offenbar besonders effektiv, wenn sie so früh wie möglich angewandt wird.

Bei Stabilisierungsmaßnahmen durch Zugabe von Calciumoxid sollte eine zu große Zugabemenge von über 250 mg/l vermieden werden, da es sonst zur Bildung sehr großer Aggregate kommen kann. Diese können Rohre und Schläuche zusetzen und zu einer Inhomogenität im Reaktor führen.

Anhang

Tabelle 5 zeigt an welchen Tagen in welche Reaktoren wie viel Calciumoxid gegeben wurde.

Tag	Reaktor 1		Reaktor 2		Reaktor 3		Reaktor 4	
	CaO [g]	Ca ²⁺ [mg/l]						
17	72,0	286	72,0	286	72,0	286	72,0	286
19	60,6	240	60,2	239	61,2	243	59,2	235
22	60,2	239	59,8	237	59,7	237	60,4	240
31	15,0	60	18,8	75	17,3	69	15,8	63
32	50,5	200	50,3	200	49,9	198	50,5	200
33	50,1	199	50,1	199	50,0	198	50,1	199
36	70,0	278	69,8	277	0	0	70,5	280
38	0	0	0	0	70,0	278	0	0
40	0	0	59,8	237	50,5	200	50,2	199
43	90,0	357	89,8	356	90,0	357	89,9	357
45	294,9	1170	101	401	133,8	531	163,1	647
47	0	0	86,7	344	96,6	383	126	500
50	0	0	0	0	69,8	277	71,5	284
51	0	0	0	0	0	0	40,0	159
54	0	0	90,2	358	70,4	279	50,8	202
57	0	0	202,0	802	0	0	0	0

Tab. 5: Übersicht über Zugabemengen und -zeiten von Calciumoxid

In Tabelle 6 ist die Bilanz von Calcium in den einzelnen Reaktoren dargestellt.

Calcium [g]	Reaktor 1	Reaktor 2	Reaktor 3	Reaktor 4
gelöste Menge zu Beginn	16,6	15,4	16,2	15,8
Zugabe (Ca-Anteil von CaO)	545,2	721,8	636,6	692,9
Entnahme, gelöst	15,3	17,0	22,2	19,1
gelöste Menge am Ende	3,7	17,3	69,1	35,6
ungelöst	542,7	702,9	561,4	653,9

Tab. 6: Calcium-Bilanz

Anhang

Die Tabellen 7 bis 9 zeigen den zeitlichen Ablauf der Versuche. Angegeben sind die Zugabemengen der verschiedenen Substrate, die jeweilige Verweilzeit, die Raumbelastung und die Versuchslänge.

Datum	Tag	Phase	Reaktor 1	Reaktor 2	Reaktor 3	Reaktor 4
13.04.15	1	Neubefüllung & Inbetriebnahme 21 Tage $B_R = 1,2 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ VWZ = 28 d	6,3 kg Rohschlamm			
14.04.15	2					
15.04.15	3					
16.04.15	4					
17.04.15	5					
18.04.15	6					
19.04.15	7					
20.04.15	8	6,3 kg/d Rohschlamm	keine Beschickung			
21.04.15	9					
22.04.15	10					
23.04.15	11					
24.04.15	12					
25.04.15	13					
26.04.15	14					
27.04.15	15	6,3 kg/d Rohschlamm	keine Beschickung			
28.04.15	16					
29.04.15	17					
30.04.15	18					
01.05.15	19					
02.05.15	20					
03.05.15	21					
04.05.15	1	Desintegrationsversuch 56 Tage $B_R = 1,27 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ VWZ = 28 d	1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm	
05.05.15	2					
06.05.15	3					
07.05.15	4					
08.05.15	5					
09.05.15	6					
10.05.15	7					
11.05.15	8	keine Beschickung und Gasuhr-Ablesung	1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm	
12.05.15	9					
13.05.15	10					
14.05.15	11					
15.05.15	12					
16.05.15	13					
17.05.15	14					
18.05.15	15	keine Beschickung und Gasuhr-Ablesung	1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm	
19.05.15	16					
20.05.15	17					
21.05.15	18					
22.05.15	19					
23.05.15	20					
24.05.15	21					
25.05.15	22	keine Beschickung und Gasuhr-Ablesung	1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm	
26.05.15	23					
27.05.15	24					
28.05.15	25					
29.05.15	26					
30.05.15	27					
31.05.15	28					

Tab. 7: Zeitplan mit Massen und Zusammensetzung der Beschickung (1. Teil)

Anhang

Datum	Tag	Phase	Reaktor 1	Reaktor 2	Reaktor 3	Reaktor 4	
01.06.15	29		1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		
02.06.15	30						
03.06.15	31						
04.06.15	32						
05.06.15	33						
06.06.15	34						
07.06.15	35						
08.06.15	36		1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		
09.06.15	37						
10.06.15	38						
11.06.15	39						
12.06.15	40						
13.06.15	41						
14.06.15	42						
15.06.15	43		1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		
16.06.15	44						
17.06.15	45						
18.06.15	46						
19.06.15	47						
20.06.15	48						
21.06.15	49						
22.06.15	50		1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm		
23.06.15	51						
24.06.15	52						
25.06.15	53						
26.06.15	54						
27.06.15	55						
28.06.15	56						
29.06.15	1	Adaption mit Öl 14 Tage $BR = 0,36$ bis $1,25 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ $VWZ = 28,7$	693 g PS + 224 g desint. ÜSS		693 g PS + 224 g unbehandelter ÜSS + 203 g Öl		
30.06.15	2		-	+ 203 g Öl			
01.07.15	3			1,23 kg PS + 0,4 kg		1,23 kg PS + 0,4 kg	
02.07.15	4			desintegrierter ÜSS + 20 g Öl		unbehandelter ÜSS + 20 g Öl	
03.07.15	5			3,95 kg PS + 1,31 kg		3,95 kg PS + 1,31 kg	
04.07.15	6			desintegrierter ÜSS + 36 g Öl		unbehandelter ÜSS + 36 g Öl	
05.07.15	7						
06.07.15	8	$BR = 1 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$	3,95 kg PS + 1,31 kg desintegrierter ÜSS + 36 g Öl		3,95 kg PS + 1,31 kg unbehandelter ÜSS + 36 g Öl		
07.07.15	9						
08.07.15	10						
09.07.15	11						
10.07.15	12						
11.07.15	13						
12.07.15	14						
13.07.15	15	FWI-Versuch 56 Tage 1. Hochlaststufe $BR = 2,2 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$	1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm + 0,167 kg Öl		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm + 0,167 kg Öl		
14.07.15	16						
15.07.15	17						
16.07.15	18						
17.07.15	19						
18.07.15	20						
19.07.15	21						

Tab. 8: Zeitplan mit Massen und Zusammensetzung der Beschickung (2. Teil)

Anhang

Datum	Tag	Phase	Reaktor 1	Reaktor 2	Reaktor 3	Reaktor 4
20.07.15	22	2. Hochlaststufe $B_R = 3,4 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$	1,55 kg desintegrierter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm + 0,383 kg Öl		1,55 kg unbehandelter ÜSS + 4,72 kg Primärschlamm + 0,383 kg Öl	6,27 kg Rohschlamm + 383 g Öl
21.07.15	23					
22.07.15	24					
23.07.15	25					
24.07.15	26					
25.07.15	27					
26.07.15	28					
27.07.15	29	3. Hochlaststufe $B_R = 3,4 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$	$B_R = 4,7$ 6,22 kg RS + 0,597 kg Öl		$B_R = 4,8$ 6,20 kg RS + 0,615 kg Öl	
28.07.15	30					
29.07.15	31					
30.07.15	32					
31.07.15	33					
01.08.15	34					
02.08.15	35	4. Hochlaststufe $B_R = 6,0 / 6,4$ $\text{kg m}^3 \text{ d}^{-1}$	$B_R = 6,0 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ 5,34 kg RS + 0,930 kg Öl		$B_R = 6,4 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ 5,27 kg RS + 1,0 kg Öl	
03.08.15	36					
04.08.15	37					
05.08.15	38					
06.08.15	39					
07.08.15	40					
08.08.15	41	5. Hochlaststufe $B_R = 7,3 / 8,2$ $\text{kg m}^3 \text{ d}^{-1}$	$B_R = 7,3 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ 5,1 kg RS + 1,18 kg Öl		$B_R = 8,2 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ 4,93 kg RS + 1,34 kg Öl	
09.08.15	42					
10.08.15	43					
11.08.15	44					
12.08.15	45					
13.08.15	46					
14.08.15	47	6. Hochlaststufe $B_R = 8,6 / 10,2$ $\text{kg m}^3 \text{ d}^{-1}$			$B_R = 8,6 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ 4,86 kg RS + 1,42 kg Öl	$B_R = 10,2 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ 4,56 kg RS + 1,71 kg Öl
15.08.15	48					
16.08.15	49					
17.08.15	50					
18.08.15	51					
19.08.15	52					
20.08.15	53	7. Hochlaststufe $B_R = 9,9 / 12,4$ $\text{kg m}^3 \text{ d}^{-1}$	4,61 kg RS + 1,66 kg Öl			$B_R = 12,4 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ 4,15 kg RS + 2,12 kg Öl
21.08.15	54					
22.08.15	55					
23.08.15	56					
24.08.15	57					
25.08.15	58					
26.08.15	59	8. Hochlaststufe $B_R = 14,8 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$				$B_R = 14,8 \text{ kg m}^3 \text{ d}^{-1}$ 3,71 kg RS + 2,56 kg Öl
27.08.15	60					
28.08.15	61					
29.08.15	62					
30.08.15	63					
31.08.15	64					
01.09.15	65					
02.09.15	66					
03.09.15	67					

Tab. 9: Zeitplan mit Massen und Zusammensetzung der Beschickung (3. Teil)

Literaturverzeichnis

- ARCHEA (2015):** www.archea-biogas.de/_mediafiles/9-substrate.pdf, aufgerufen am 11.11.2015
- ATV (1996):** ATV Handbuch Klärschlamm (4. Auflage), Abwassertechnische Vereinigung e.V., Hennef
- ATV (2000):** Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- Bischofsberger, W.; Rosenwinkel, K.-H.; Dichtl, N.; Seyfried, C.F.; Böhnke, B.; Bsdok, J.; Schröter, T. (2005):** Anerobtechnik (2. Auflage), Springer, Berlin
- Braha, A.; Groza, G. (2006):** Moderne Abwassertechnik: Erhebung, Modellabsicherung, Scal-Up, Planung, Wiley-VCH, Weinheim
- Döring, S. (2013):** Untersuchungen zur Etablierung eines Hochlastfermentation auf dem Klärwerk Leipzig-Rosental, Hochschule Merseburg, Merseburg
- DWA (2008a):** Merkblatt DWA-M 380 Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DWA (2008b):** Merkblatt DWA-M 383 Kennwerte der Klärschlammwässerung, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DWA (2015):** Merkblatt DWA-M 302 Klärschlammdeintegration, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- Effenberger, M.; Lebuhn, M. (2011):** Repowering von Biogasanlagen zur Steigerung der Prozesseffizienz, ResearchGate, Göttingen
- HeGo Biotec (2015):** www.hego-biotec.de/deutsch/produkte/technik-und-messgeraete/cst-messung, aufgerufen am 03.11.2015
- Hosang, W.; Bischof, W. (1998):** Abwassertechnik (2. Auflage), Teubner, Leipzig u.a.
- Gronauer, A.; Schlattmann, M.; Speckmaier, M.; Metzner, T. (2005):** Konzeptionierung, Erstellung und Betrieb einer Versuchsfermenteranlage zur Bearbeitung von Fragestellungen im Bereich Inputmaterialien und Mikrobiologie bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
- Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2009):** Energie aus Biomasse (2. Auflage), Springer, Leipzig u.a.

- Kleyböcker, A. (2012):** Entwicklung neuer Verfahren der Prozesssteuerung in Co-Vergärungsanlagen der Abfallwirtschaft, Technische Universität Berlin, Berlin
- Kopp, J.B. (2010):** Beurteilung der Entwässerbarkeit von Klärschlämmen, F&S Filtrieren und Separieren Jahrgang 24 Nr. 4, Rödermark
- Kopp, J.B. (2001):** Wasseranteile in Klärschlammuspensionen – Messmethode und Praxisrelevanz, TU Braunschweig, Braunschweig
- Kopplow, O.; Barjenbruch, M.; Heinz, V. (2004):** Vorbehandlung von Überschussschlamm durch Elektroporation, Wiley-VCH, Weinheim
- Liebrich, M.:** Dissertation (in Vorbereitung), Uni Potsdam, Potsdam
- Mudrack, .K; Kunst, S. (1994):** Biologie der Abwasserreinigung (4. Auflage), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart u.a.
- Vogelsang (2011):** BioCrack: Desintegration mittels Hochspannung, www.landwirtschaftskammer.de/duesse/znr/pdfs/2011/2011-11-10-biogas-06.pdf, Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH, Essen/Oldb.
- Vogelsang (2015a):** www.vogelsangusa.com/fileadmin/pdf/Prospekte/Vogelsang_BioCrack-DE.pdf, aufgerufen am 07.11.2015
- Vogelsang (2015b):** Referenzliste für BioCrack bei Kläranlagen: www.vogelsang.info/fileadmin/Cumulus/Assets/MarketingTools/Referenzliste-BioCrack-KA_DE_082014.pdf, aufgerufen am 07.11.2015
- Voigt, D. (2013):** Wissenschaftlich-technische Untersuchung zur Etablierung einer Hochlastfermentation auf dem Klärwerk Leipzig-Rosental, Hochschule Merseburg, Merseburg
- Voß, E. et al. (2009):** Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009 (Band 3), Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Erding
- Schmidt, A. (2012):** Optimierung der Klärschlammwässerung auf dem Klärwerk Lollar durch elektrokinetische Desintegration, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen
- Watter, H. (2015):** Regenerative Energiesysteme (4. Auflage), Springer Vieweg, Wiesbaden
- Zak, M. (2012):** Einfluss pflanzlicher Biofilmträger auf die Vergärung von Speiseresten, Universität Ulm, Ulm

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Desintegrationseinheit "BioCrack" der Firma Vogelsang [Vogelsang 2015a]	7
Abb. 2: Prinzip der elektrokinetischen Desintegration [Kopplow 2004]	8
Abb. 3: Übersicht über die Technikumsanlage.....	10
Abb. 4: schematische Darstellung eines Reaktors der Technikumsanlage [Voigt, Döring]	10
Abb. 5: Verläufe des spezifischen Biogasertrags während des Desintegrationsversuchs	17
Abb. 6: ÜSS, unbehandelt, 100fach vergrößert	20
Abb. 7: ÜSS, desintegriert, 100fach vergrößert	20
Abb. 8: ÜSS, desintegriert, 400fach vergrößert	20
Abb. 9: ÜSS, unbehandelt, 400fach vergrößert.....	20
Abb. 10: Verläufe der Konzentration der organischen Säuren während des FWI-Versuchs	22
Abb. 11: Verläufe der Calcium-Konzentration während des FWI-Versuchs	24
Abb. 12: Verläufe der Phosphat-Konzentration während des FWI-Versuchs	26
Abb. 13: Verläufe der Ammonium-Konzentration während des FWI-Versuchs	28
Abb. 14: Verläufe des FWI und des FOS/TAC-Wertes in den vier Reaktoren während des FWI-Versuchs	31
Abb. 15: Verläufe der Raumbelastungen während des FWI-Versuchs	33
Abb. 16: Verläufe des spezifischen Biogasertrages während des FWI-Versuchs.....	35
Abb. 17: Aggregat, das sich am Ende der Versuche im Reaktor befand (4 cm bis 6 cm groß)	36
Abb. 18: Verlauf des spezifischen Biogasertrags im Vergleich zum pH-Wert von Reaktor 4 ..	39
Abb. 19: Vergleich der Verläufe des pH-Wertes und der Konzentrationen von Calcium und Phosphat von Reaktor 3	40
Abb. 20: Gegenüberstellung der Konzentrationen von Calcium und organischer Säuren, des FWI und der Calcium-Zugabe in Reaktor 3	42

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vergleich des spez. Biogasertrages	17
Tab. 2: 1. Messung der CST-Werte, während des Desintegration-Versuches	18
Tab. 3: 2. Messung der CST-Werte, während des FWI-Versuches.....	19
Tab. 4: Vergleich der CST-Werte nach Übersäuerung.....	19
Tab. 5: Übersicht über Zugabemengen und -zeiten von Calciumoxid	I
Tab. 6: Calcium-Bilanz.....	I
Tab. 7: Zeitplan mit Massen und Zusammensetzung der Beschickung (1. Teil)	II
Tab. 8: Zeitplan mit Massen und Zusammensetzung der Beschickung (2. Teil)	III
Tab. 9: Zeitplan mit Massen und Zusammensetzung der Beschickung (3. Teil)	IV

Gleichungsverzeichnis

Gl. 1: Trockensubstanz	13
Gl. 2: organische Trockensubstanz.....	13