

PROZESSFÜHRUNG DER FAULUNG UND CO-VERGÄRUNG

Empfehlung



Impressum

Die vorliegende Publikation konkretisiert die Anforderungen der eidgenössischen Gewässerschutzgesetzgebung, gewährleistet eine gute Praxis und ermöglicht den einheitlichen Vollzug der Behörden. Sie wurde mit aller Sorgfalt und nach bestem Gewissen erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität kann der VSA jedoch keine Gewähr übernehmen. Haftungsansprüche wegen Schäden materieller oder immaterieller Art, welche durch die Anwendung der Publikation entstehen können, werden ausgeschlossen.

Autoren

Martin Kühni, ZHAW Wädenswil
Lucien Biolley, ETH Zürich
Tobias Siegerist, TBF + Partner AG
Florian Rüsch-Pfund, ZHAW Wädenswil
Imre Antalffy, ZHAW Wädenswil
Alissa Tophinke, ZHAW Wädenswil
Urs Baier, ZHAW Wädenswil

Mitglieder der Begleitgruppe

Adrian Fasel, ARA Region Bern AG
Markus Hürlimann, AV Altenrhein
Beat Kobel, Ryser Ingenieure AG
Manfred Tschui, Holinger AG

Empfohlene Zitierweise

Autor: Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA)
Titel: Prozessführung der Faulung und Co-Vergärung
Untertitel: Empfehlung
Ort: Glattbrugg
Jahr: 2023

Herausgeber

Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
Association suisse des professionnels de la protection des eaux
Associazione svizzera dei professionisti della protezione delle acque

Titelfoto

milad.ch, Winterthur

Gestaltung

VSA

Druck

Appenzeller Druckerei AG, 9100 Herisau

Bezugsquelle

VSA, Europastrasse 3, Postfach, CH-8152 Glattbrugg,
Telefon 043 343 70 70, sekretariat@vsa.ch, www.vsa.ch

INHALT

1	Einleitung	7
1.1	Ziel und Nutzer	7
1.1.1	Grenzen	7
1.2	Rahmenbedingungen und Grundlagen	7
2	Vorgehen zur Betriebsbeurteilung und -optimierung	9
3	Beurteilung des Ist-Zustands der Faulung und Co-Vergärung	10
3.1	Prozesskenngrößen	10
3.2	Mess- und Analysekonzept	11
3.2.1	Messgrößen und Messmethoden	11
3.2.2	Vorgehen zur Erarbeitung eines Messkonzepts	13
3.2.3	Qualitätssicherung	13
3.3	Einfache Methodik zur Ist-Zustandsbeurteilung	13
3.3.1	Auswertung und Interpretation der Mess- und Analysendaten	13
3.3.2	Grenzen des einfachen Modells	21
3.4	Ist-Zustandsbeurteilung mittels Excel-Tool	21
4	Voraussetzungen zur Co-Vergärung	23
4.1	Allgemeine Voraussetzungen	23
4.1.1	Betriebliche Grundlagen	23
4.1.2	Rechtliche Grundlagen	23
4.1.3	Ökologische Grundlagen	23
4.1.4	Wirtschaftliche Grundlagen	24
4.1.5	Biologisch/Verfahrenstechnische Grundlagen	24
4.1.6	Fachliche Expertise	24
4.2	Einfache Methodik zur Beurteilung der Erweiterung der Co-Substratannahme	24
4.3	Logistik der Faulung mit Co-Vergärung	26
4.4	Betriebserfahrungen	26
5	Optimierungen	27
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	28
6.1	Schlussfolgerungen	28
6.1.1	Kenngrößenmodelle, -werkzeuge	28
6.1.2	Expertengespräche	28
6.1.3	Datenanalytische Methoden und neuronale Netze	28
6.1.4	Prozessoptimierung	31

6.1.5	Gewässerschutz als Grundauftrag der Kläranlage	31
6.2	Ausblick	31
6.2.1	Kenngrossen HRT, SRT, RB und SB	31
6.2.2	Datenanalytische Methoden und neuronale Netze	32
6.2.3	Dynamische (und statische) Modelle auf der Basis neuronaler Netze wie auch mit mechanistischen Modellen	32
6.2.4	Praxistauglichkeit der Werkzeuge	32
6.2.5	Neuaufgabe der Empfehlung	32

7 Literaturverzeichnis 33

A.1	Kenngrossenwerkzeug und Hemmungsbeurteilung (Excel-Werkzeuge) sowie Erläuterungen	34
A.2	Tabellen und Abbildungen zum Messkonzept und zur einfachen Methodik der Prozessbeurteilung	34

Tabelle 1: Mess- und Analysengrossen gemäss Abbildung 3, mit empfohlenen Messfrequenzen. Abgeleitete (berechnete) Grossen sind ebenfalls aufgeführt. ((VSA, 2020), verändert) 34

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BFE	Bundesamt für Energie
CH ₄	Methan
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
EZV	eidgenössischen Zollverwaltung
Fe	Eisen
FeIV	Eisen IV
FM	Frischmasse: Masse eines Stoffes oder Substrates im Originalzustand in kg. Dabei ist insbesondere der gesamte Wasseranteil in der Probe mit enthalten.
FOS	Flüchtige organische Säuren
GR	Glührückstand
GUS	Gesamte ungelöste Stoffe
GV	Glühverlust = organische Trockensubstanz (siehe oTM)
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HS ⁻	Hydrosulfid-Ion
HAc	Essigsäure
HRT	Hydraulische Aufenthaltszeit (hydraulic retention time)
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LCFA	langkettige Fettsäuren (Long Chain Fatty Acids)
NO ₂	Nitrit
NO ₃	Nitrat
NH ₃	Ammoniak
I _N	Normliter: Gasvolumen in l bei 1013 mbar und 273.15 K
N _{tot}	totale Stickstoffverbindungen
oTM	siehe GV
PAK	polyzyklische aromatische Verbindungen
P _{tot}	totale Phosphorverbindungen
Q	Durchfluss
RB	Organische Faulraumbelastung
SB	organische Schlammbelastung
SRT	Feststoff-(Schlamm-)Aufenthaltszeit (sludge retention time)
S _{tot}	totale Schwefelverbindungen
T	Temperatur
TM	Trockenmasse = Trockensubstanz = Trockenrückstand (siehe TR)
TR	Trockenrückstand (siehe TM)
V̇	Volumenstrom
VOC	Flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen (volatile organic carbon)
Vol.-%	prozentualer Volumenanteil
Y _{Biogas}	Spezifische Biogasausbeute: Unter definierten Standardbedingungen im Labor empirisch bestimmtes spezifisches Biogasvolumen in I _N /kg oTS _{eingesetzt} , welches bei der anaeroben, biologischen Behandlung einer definierten, in den Versuch eingesetzten Menge organischen Materials, erzeugt wird.
Y _{CH₄}	analog Y _{Biogas} für Biomethan anstelle von Biogas. Die Grösse entspricht dem ansonsten häufig verwendeten Begriff Biomethanpotenzial (= BMP). Die Grösse entspricht hingegen nicht der mikrobiologischen Definition des Biomethan-Yieldkoeffizienten Y _{CH₄} .

Vernehmlassungsversion

1 EINLEITUNG

Die Hauptaufgabe der ARA ist der Gewässerschutz. In einem sich laufend weiter entwickelnden Umfeld müssen sich ARA-Betreiber aber auch immer mit Fragen der wirtschaftlichen und energetischen Optimierung auseinandersetzen. Der Betrieb der Faulung und ein allfälliger Einsatz von Co-Substraten bilden dabei wichtige Stellgrößen.

Mit dieser Empfehlung soll der Zustand einer Faulung bzw. Vergärungsanlage auf kommunalen Kläranlagen beurteilt werden und Optimierungspotential aufgezeigt werden. Die Empfehlung soll zudem Fragen rund um Co-Vergärung beantworten – einerseits die Abschätzung, ob die Anlage Kapazität zur (weiteren) Co-Vergärung hat, andererseits aber auch, welche Konsequenzen die Annahme von Co-Substrat haben kann. Die Betrachtung erfolgt aus betrieblicher, biologisch/verfahrenstechnisch, rechtlicher und ökologischer Sicht.

Der Istzustand sowie der Optimierungsgrad einer Faulung sind sehr stark abhängig von der jeweiligen Anlage. Dies gilt genauso für eine allfällige Entscheidung zur Co-Vergärung oder zur Annahme weiterer Co-Substrate. Die individuelle Situation kann hohe Komplexität aufweisen und daher sehr detaillierte Betrachtungen verlangen. Eine zuverlässige Methode zur Beurteilung solch eines komplexen Systems ist die Verwendung von Prozesskenngrößen. In einer statischen Berechnung können die verwendeten Betriebsdaten zu Kenngrößen umgerechnet werden, aus deren Werten Aussagen zum Zustand sowie Empfehlungen zur Optimierung einer Faulung abgeleitet werden können.

Weiter wird ein Messkonzept empfohlen, welches die dazu notwendige Datengrundlage schafft und die Messwerte für einen sicheren Betrieb bereitstellt.

1.1 Ziel und Nutzer

- ARA-Betreiber (Hauptzielgruppe)
- Planer
- Ämter / Behörden
- Entsorger / Industrie und Gewerbebetriebe

Die Hauptzielgruppe dieser Empfehlung sind ARA-Betreiber. Die Analyse des Betriebs einer Faulanlage sowie die Reservenabschätzung sind Themen, welche insbesondere für den Betrieb einer ARA hilfreich sind. Gleichzeitig helfen diese Schritte jedoch auch bei der strategischen Planung oder Dimensionierung einer Anlage zur Klärschlammbehandlung. Entsprechend können auch Planer oder Behörden davon profitieren. Die allgemeine Beurteilung einer Vergärungsanlage hilft ausserdem auch anderen Faulanlagen, welche nicht auf einer Kläranlage eingebunden sind, ihren Betrieb zu analysieren und zu optimieren, weshalb auch Entsorger aus Industrie und Gewerbe angesprochen sind.

Das erste Ziel dieser Empfehlung ist es dem Betrachter in drei Schritten eine Möglichkeit aufzuzeigen wie die Faulung auf einer ARA analysiert, verbessert und eventuell erweitert werden kann. Zunächst einmal muss der Istzustand der Faulung sowie der restlichen involvierten Anlagenteile (z.B. Gasbehandlung oder biologische Reinigungsstufe) erfasst werden (Kapitel 3.2, 3.3 und 3.4). Diese Erfassung ermöglicht, das Verbesserungspotential abzuschätzen. Schliesslich kann bei Reservekapazität darüber nachgedacht werden, die Faulung mit Co-Substraten zu erweitern (Kapitel 4.2). So gibt es Anlagen, die bis zu 45 % des Gases aus der Covergärung produzieren.

Im Weiteren ist das Ziel dieser Empfehlung mögliche Co-Substrate einzuordnen und einen Überblick der damit verbundenen Folgen zu ermöglichen (Kapitel 4.3 und 4.4).

1.1.1 Grenzen

Diese Empfehlung ist als Hilfestellung bei Entscheidungen im Betrieb von Faul- oder Vergärungsanlagen gedacht. Sie bietet keine automatische Regelung der Anlage, es sind weiterhin die Eingriffe des Betriebs notwendig. Die Empfehlung kann keine Hilfe bieten bei Fragen zur Betriebsdynamik (Tagesschwankungen, Regelungen aufgrund von Messwerten). Sie ist vielmehr als Werkzeug zur übergeordneten Betrachtung sowie strategischen Planung des Betriebs gedacht.

1.2 Rahmenbedingungen und Grundlagen

Die Grundlagen zur Erarbeitung dieser Empfehlung bildet das Verständnis des Systems einer Faulanlage. Dieses besteht aus Inputgrößen (Substrate und Störgrößen), Zielgrößen und Produkten, welche aus der Faulung entstehen (siehe Abbildung 1).

Die Empfehlung betrachtet den Betrieb der Faulung, jedoch nicht die Gasverwertung. Für die Themen bzgl. Gasverwertung wird auf die Empfehlung «Energie in ARA» (VSA und BFE, 2010) verwiesen.

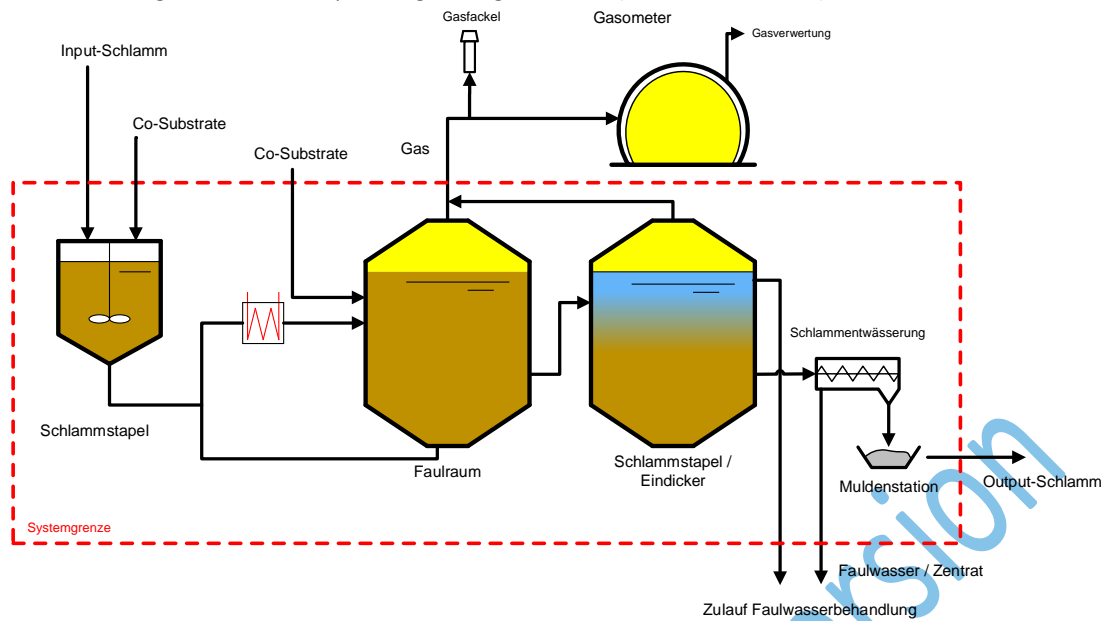


Abbildung 1:
Systemgrenzen am Bei-
spiel einer einfachen
Faulungs- oder Co-Ver-
gärungsanlage

2 VORGEHEN ZUR BETRIEBSBEURTEILUNG UND -OPTIMIERUNG

Die Betriebsbeurteilung und -optimierung mittels dieser Empfehlung basiert auf folgenden Hauptschritten:

- Optimierung des Mess- und Analysekonzept
- Beurteilung Ist-Zustand
- Beurteilung der freien Kapazität
- Analyse hinsichtlich des Einsatzes von Co-Vergärung

Das nachfolgende Ablaufschema zeigt das vorgeschlagene Vorgehen zur Betriebsbeurteilung und -optimierung. Die Kapitelnummern innerhalb der Grafik verweisen auf die nachfolgenden Kapitel der Empfehlung sowie auf das detaillierte Kenngrößen-Werkzeug (Kapitel 3.4).

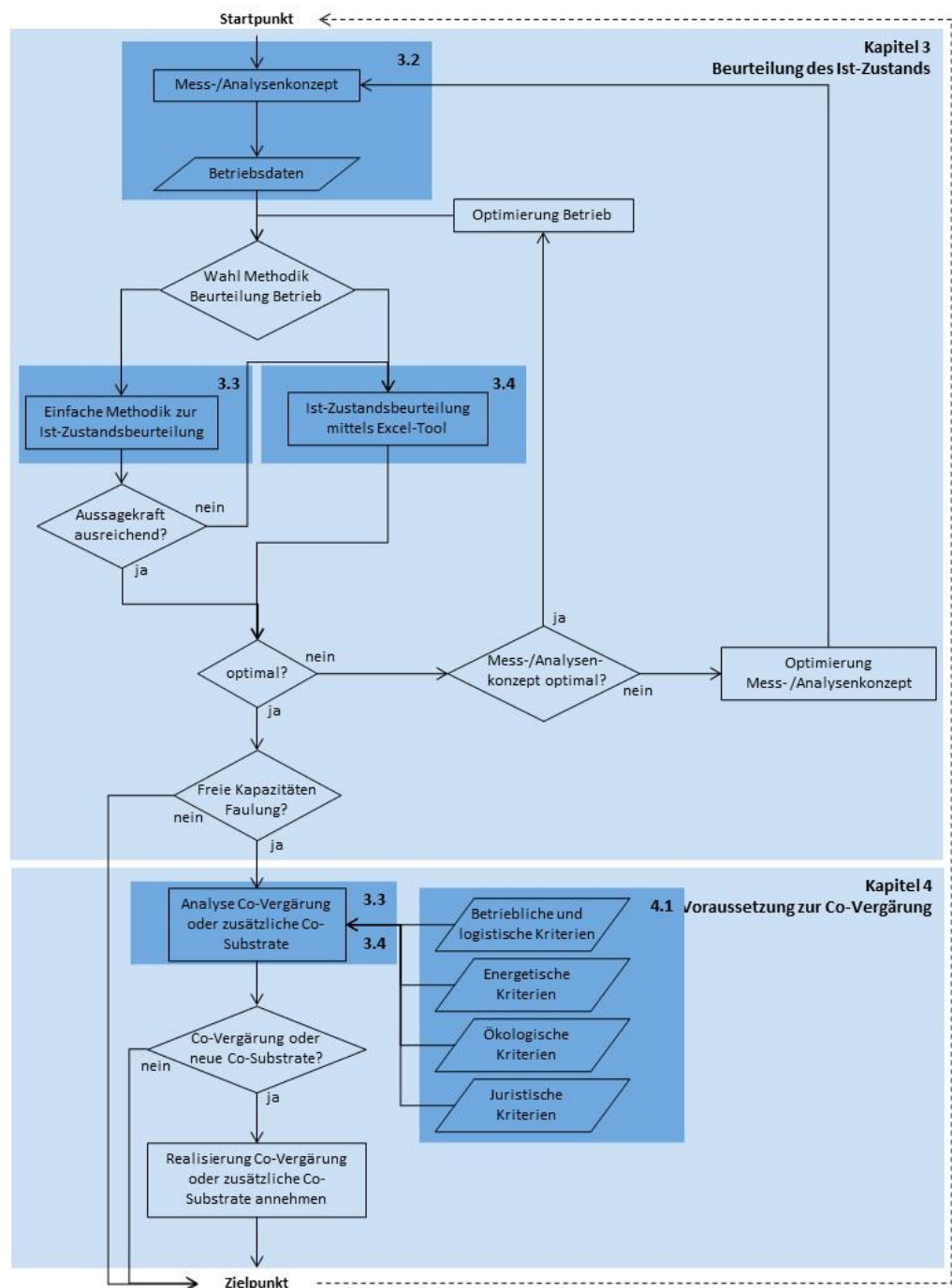


Abbildung 2:
Vorgehen zur Betriebsbeurteilung und Betriebsoptimierung einer Faul- oder Co-Vergärungsanlage

3 BEURTEILUNG DES IST-ZUSTANDS DER FAULUNG UND CO-VERGÄRUNG

Warum wird der Zustand einer Faulanlage beurteilt?

Die Beurteilung des Istzustands bildet die Grundlage für die Prozessführung und -überwachung im Betrieb der Faulung und der Co-Vergärung und erlaubt die Identifikation möglicher Prozessoptimierungen. Als Spezialfälle solcher Optimierungen sind dabei der Übergang von der reinen Faulung zur Co-Vergärung sowie die Annahme neuer Co-Substrate in die bestehende Co-Vergärung zu sehen. Das Ziel der Prozessführung und -überwachung besteht im stabilen Anlagenbetrieb auf einem Leistungsniveau, welches mindestens der Dimensionierungsleistung der Anlage bei Auslegungsbelastung entspricht.

Wichtig ist, dass die Prozessbeurteilung von der Betriebsbeurteilung unterschieden wird. Die Prozessbeurteilung beinhaltet die Beurteilung der naturwissenschaftlichen Prozesse der Anlage auf der Grundlage der im Rahmen des Messkonzepts (Kapitel 3.2) erfassten Mess- und Analysedaten. Die Betriebsbeurteilung umfasst zusätzlich ökologische, logistische, wirtschaftliche usw. Kriterien. Das Ziel der Prozessbeurteilung ist die verfahrenstechnisch optimale Prozessführung der Anlage, während das Ziel der Betriebsbeurteilung die optimale Führung des Gesamtbetriebs ist.

Welche Möglichkeiten zur Beurteilung einer Faulung gibt es?

Möchte man den Prozesszustand auf einer Anlage evaluieren gibt es viele Möglichkeiten. Die wohl einfachste Abschätzung bietet die Empfehlung «Energie in ARA» (VSA und BFE, 2010), Kapitel 6, Seite 10. Ausgehend von einer Frischschlammproduktion von 35 kg/TR pro Jahr und Einwohnergleichwert (EW), wird eine Klärgasproduktion von 8 Nm³ pro Jahr und EW geschätzt. Diese Produktion kann mit dem EW einer ARA multipliziert werden, um einen groben ersten Schätzwert der zu erwartenden Klärgasmengen zu erhalten.

Mit der vorliegenden Empfehlung soll eine vertiefte Analyse möglich werden. Ausserdem sollte bei der Beurteilung der Faulung nicht ausser Acht gelassen werden, dass andere Anlagenteile wie die Gasaufbereitung oder die Biologie direkt von der Leistung und dem Zustand der Faulung abhängig sind.

Die beiden Kapitel 3.3 und 3.4 sollen dem Betrieb eine Vorgehensmöglichkeit (Methodik, Werkzeug) zur Beurteilung der Prozesse geben resp. aufzeigen. Beide Ansätze beruhen auf denselben Prozessgrundlagen und können unabhängig voneinander verwendet werden. Die Komplexität aber auch die Aussagekraft nehmen vom ersten zum zweiten Werkzeug stark zu.

3.1 Prozesskenngrössen

Als Prozesskenngrössen können entweder gemessene oder berechnete Parameter dienen, welche abhängig vom Prozesszustand anlagenunabhängig vergleichbare, charakteristische Werte annehmen. Es handelt sich entweder um primäre Mess- resp. Analysengrössen von Zwischenprodukten im Prozess (z.B. Wasserstoffkonzentration oder Konzentration organischer Säuren im Faulraum) oder aber aus den Mess-/Analysengrössen berechnete (abgeleitete) Grössen (Tabelle 2 im Anhang).

Prozesskenngrössen sind zentrale Bestandteile der in dieser Empfehlung vorgeschlagenen Werkzeuge zur Prozessbeurteilung (Kapitel 3.3 und 3.4). Die folgenden Prozesskenngrössen kommen in den Werkzeugen zur Anwendung:

- Spezifische Methanproduktion eines Substrats unter optimalen Bedingungen (Q_CH4-spez-opt_y)
- Gesamte reale spezifische Methanproduktion (Q_CH4-spez)
- Organische Faulraumbelastung (RB)
- GV-Abbau (ρ)
- Hydraulische Aufenthaltszeit (HRT)
- Feststoff-(Schlamm-)Aufenthaltszeit (SRT)
- Essigsäurekonzentration Reaktor (HAc)
- Konzentration Summe Essigsäure + Propionsäure + Buttersäure Reaktor (Org. Säuren)
- Wasserstoffkonzentration Reaktor (H₂)

Die Definition resp. die Berechnung der Prozesskenngrössen ist in Tabelle 1 und Tabelle 2 im Anhang gegeben.

In der Folge wird für den Begriff der Prozesskenngrössen vereinfacht «Kenngrössen» verwendet.

3.2 Mess- und Analysekonzept

Zur Beurteilung der Prozesse der Faulung resp. Co-Vergärung werden Mess- und Analysendaten benötigt. Es handelt sich in der Regel um eine Vielzahl unterschiedlicher Mess- und Analysengrößen resp.- werte, welche darüber hinaus an unterschiedlichen Stellen der Anlage (Messorte) und in unterschiedlicher zeitlicher Häufigkeit (Auflösung) erhoben werden sollen. Aus diesem Grund muss sich der Betrieb ein entsprechendes Mess- und Analysekonzept erarbeiten. Dazu gehören auch verschiedene Methoden zur Erhaltung der Datenqualität (Qualitätssicherung, inkl. Messfehlererkennung und Datenplausibilisierung). Weiter gehören Methoden zur Berechnung abgeleiteter Größen, insbesondere Kenngrößen der Faulung resp. Co-Vergärung dazu (Kapitel 3.3).

Das Ziel dieses Kapitels ist es Grundlagen und Hinweise zu liefern, damit für eine gegebene Anlage ein solches Mess- und Analysekonzept (weiter-) entwickelt und angewendet werden kann. Anmerkung: In den Begriffen «Messkonzept» und «Messdaten» sind im Folgenden die Begriffe «Analysekonzept» und «Analysendaten» ebenfalls enthalten.

VSA (2020) stellt eine Methodik zur Erfassung und Auswertung von Mess- und Analysendaten auf kommunalen Kläranlagen unterschiedlicher Grösse dar. Die Motivation für den Anlagenbetrieb, nach dieser Methodik vorzugehen, wird erläutert. Das Vorgehen zum Entwurf eines entsprechenden Mess- resp. Analysekonzepts wird dargestellt. Weiter wird auf die Motivation und die Methodik zur Aufrechterhaltung der Datenqualität (Qualitätssicherung) eingegangen. Die Auswertung umfasst auch die Berechnung abgeleiteter Größen inkl. Kenngrößen.

Für die Faulung resp. Co-Vergärung soll in der vorliegenden Empfehlung von den Aussagen und Konzepten in VSA (2020) ausgegangen werden. Die wichtigsten für die Faulung und Co-Vergärung massgebenden Elemente daraus werden nachfolgend aufgeführt. Weiter werden diese durch Anpassungen und Erweiterungen, welche sich spezifisch auf die Faulung und Co-Vergärung beziehen, ergänzt.

3.2.1 Messgrößen und Messmethoden

Die Abbildung 3 zeigt das Grundfliessbild einer Co-Vergärung mit eingezeichneten Messorten und Probenahmestellen mitsamt den zugehörigen Mess- und Analysengrößen («Parameter»). Das bezeichnete Spektrum an Mess- und Analysengrößen entspricht dabei einer umfassenden Informationsbeschaffung entsprechend dem heutigen Stand der Technik auf grossen Anlagen. Kleinere Anlagen bestimmen in der Regel weniger Größen. Das Grundfliessbild stellt die Grundkonfiguration der Co-Vergärung dar. Besonders auf grösseren Anlagen sind mehrere parallel oder seriell geschaltete Reaktoren resp. Behälter vorhanden. Anlagen mit reiner Faulung (keine Co-Vergärung) entsprechen dem Grundfliessbild mit der Ausnahme, dass die Co-Substratannahmen (Schlammstapel und Faulraum) mit den dort angegebenen Mess- und Analysengrößen für die Co-Substrate entfallen.

In der Tabelle 1 im Anhang sind die Mess- und Analysengrößen gemäss Abbildung 3 zusammengestellt. Für jede Grösse ist die empfohlene Messfrequenz (Häufigkeit) angegeben. Im Anhang 1 in VSA (2020) ist eine Zusammenstellung der Definitionen und Bestimmungsmethoden von Mess- und Analysengrößen gegeben.

Messgrößen aus den folgenden Aufgabenbereichen werden in der vorliegenden Empfehlung nicht betrachtet:

- Sicherheitskonzepte (Niveaularme, Gasalarme, Brandmelder usw.)
- Anwendungen meteorologischer Daten
- Maschinenbezogene Daten (Drehzahlen, Drehmomente, Betriebszeiten, thermische Daten, usw.)

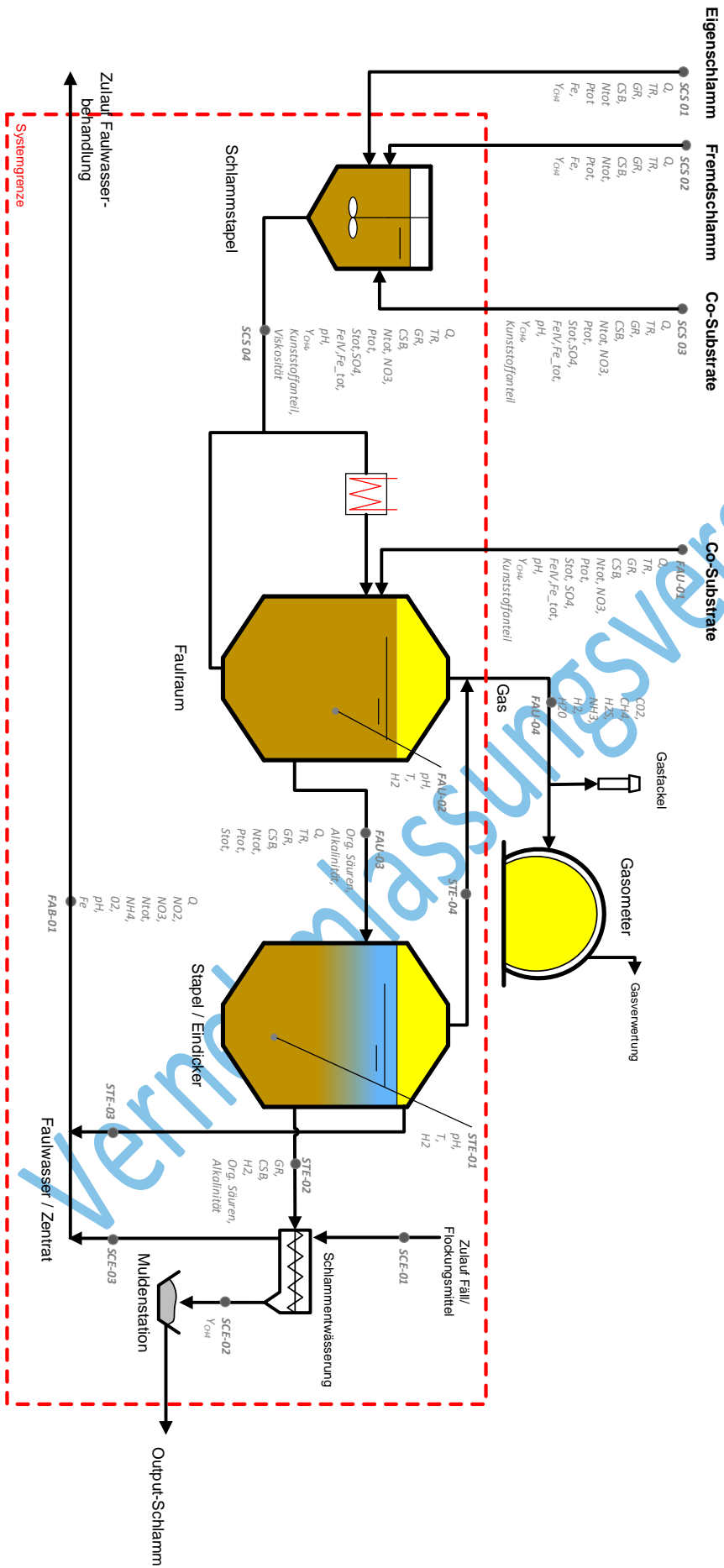


Abbildung 3: Grundfließbild Co-Vergärung mit umfassendem Informationsgehalt (VSA, 2020) angepasst

Anmerkungen zu Mess- und Analysengrößen (Abbildung 3, Tabelle 1)

- Die Co-Substrat-Werte sind grundsätzlich für jedes Co-Substrat zu bestimmen.
- Die Frischschlammwerte (resp. die Summe der Werte der ARA-eigenen Schlämme) ergeben sich aus der Differenz zwischen den Schlammstapelwerten und den Werten des Fremdschlammes- sowie der Co-Substrate Schlammstapel.
- Die Grösse H_2O im Gas kann wegfallen, falls das Faulgas mit Kondensat-Rückführung in den Faulraum und Stapel getrocknet wird.
- Die Werte im Auslauf des Stapels/Eindickers dienen der Ermittlung des gesamten Abbaugrads bezüglich TR, oTR und CSB und der Analyse der Gasproduktion im Stapel/Eindicker (Fe nur für Massenbilanz-Kampagnen).
- Y_{CH_4} -Muldenstation (Kenngrösse) wegen späteren Lagerproblemen (Restmethanpotenzial).
- Zur genaueren Analyse der Gasproduktion im Faulraum und im Stapel/Eindicker müssten die Gasdaten für beide Reaktoren separat erfasst werden (in Abbildung 3 nicht eingezeichnet).
- Anlagen mit einer Reaktorkonfiguration gemäss Abbildung 3 erlauben keine Unterscheidung der SRT von der HRT (Anhang: Tabelle 1, Tabelle 2, Tabelle 3), das heisst $SRT = HRT$. Soll $SRT > HRT$ sein, ist im Auslauf eine Schlamm-Wassertrennung mit Rückhalt oder Rückführung des abgetrennten Schlammes in den/die Reaktoren vorzusehen

3.2.2 Vorgehen zur Erarbeitung eines Messkonzepts

Das in Abbildung 3 gezeigte Grundfliessbild mit der zugehörigen Tabelle 1 im Anhang entspricht der Co-Vergärung resp. alleinigen Faulung mit maximalem Informationsgewinn und damit maximalen Möglichkeiten zur Beurteilung, Überwachung und Optimierung ihres Betriebs. Viele vor allem ältere und kleinere Kläranlagen der Schweiz sind nicht entsprechend diesem Messkonzept ausgestattet. Dieses hat diverse Gründe und ist häufig durchaus sinnvoll. Zur Anpassung des oben dargestellten Messkonzepts an die spezifischen Bedürfnisse der konkret betrachteten ARA wird das Vorgehen gemäss Kapitel 4.3 in VSA (2020) empfohlen. Gegenüber der Covergärung/Faulung in VSA (2020) «komplexe ARA», enthält das Messkonzept des vorliegenden Dokuments Erweiterungen in den Bereichen Co-Substratanalytik, Co-Substrat-Dosierstellen und Prozesskontrollgrößen Faulraum und Stapel/Eindicker.

Die Mess- und Analysendaten sind wertvoll und ihre Gewinnung und Qualitätssicherung ist aufwändig. Deshalb sollen die Daten optimal zur Beurteilung, Überwachung und Optimierung der Prozesse der Faulung und Co-Vergärung genutzt werden. Die beste Datenerhebung nützt nichts, wenn die Daten anschliessend nicht ausgewertet resp. weiterverwendet werden. Der Betrieb muss sich bereits vor der Erstellung eines Messkonzepts über die Ziele der Mess- und Analysendatengewinnung im Klaren sein. Deshalb ist die wichtigste Einflussgrösse des gesamten Mess- und Analysenkonzepts das Datenauswertungskonzept, auf welches im Kapitel 3.3 eingegangen wird.

3.2.3 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung der Mess- und Analysendaten ist ein zentrales Element im Messkonzept. Massenbilanzen stellen dabei ein wichtiges Werkzeug zur Qualitätssicherung dar. Mit Massenbilanzen können Fehler in Online- und Inline-Messungen sowie in der Laboranalytik detektiert werden. Das Kapitel 5 in VSA (2020) gibt einen umfassenden Überblick zur Qualitätssicherung mit Hilfe von Massenbilanzen und anderen Methoden. Es werden Massenbilanzbeispiele für P, Fe, CSB und GV gegeben. Dabei behandelt ein Teil der Beispiele explizit die Faulung. Der Teil, welcher sich auf die gesamte ARA bezieht, kann sinngemäss auf die Faulung übertragen werden.

3.3 Einfache Methodik zur Ist-Zustandsbeurteilung

Wie kann mit wenig Aufwand ein Überblick über die Prozesse erhalten werden?

Auf der Basis der Mess- und Analysengrößen aus dem Messkonzept (Kapitel 3.2) wird in diesem Kapitel eine einfache Methodik zur Prozessbeurteilung (Ist-Zustandsbeurteilung) der Faulung und der Co-Vergärung gezeigt. Eine weitergehende resp. detailliertere Beurteilung wird mit dem Werkzeug gemäss Kapitel 3.4 ermöglicht. Beide Ansätze beruhen auf denselben Prozessgrundlagen (Modell).

3.3.1 Auswertung und Interpretation der Mess- und Analysendaten

Das Datenauswertungskonzept umfasst das Vorgehen zur Datenauswertung für die Beurteilung, Überwachung und Optimierung der Faulungs- und Co-Vergärungsprozesse. Die Vorgehensempfehlung für die einfache Methodik beruht auf den Tabelle 1, 2 und 3 im Anhang und wird im Folgenden anhand 6 miteinander verknüpfen Ablaufschemen vorgestellt (Abbildungen x-y). Die Vorgehensempfehlung ist derart aufgebaut,

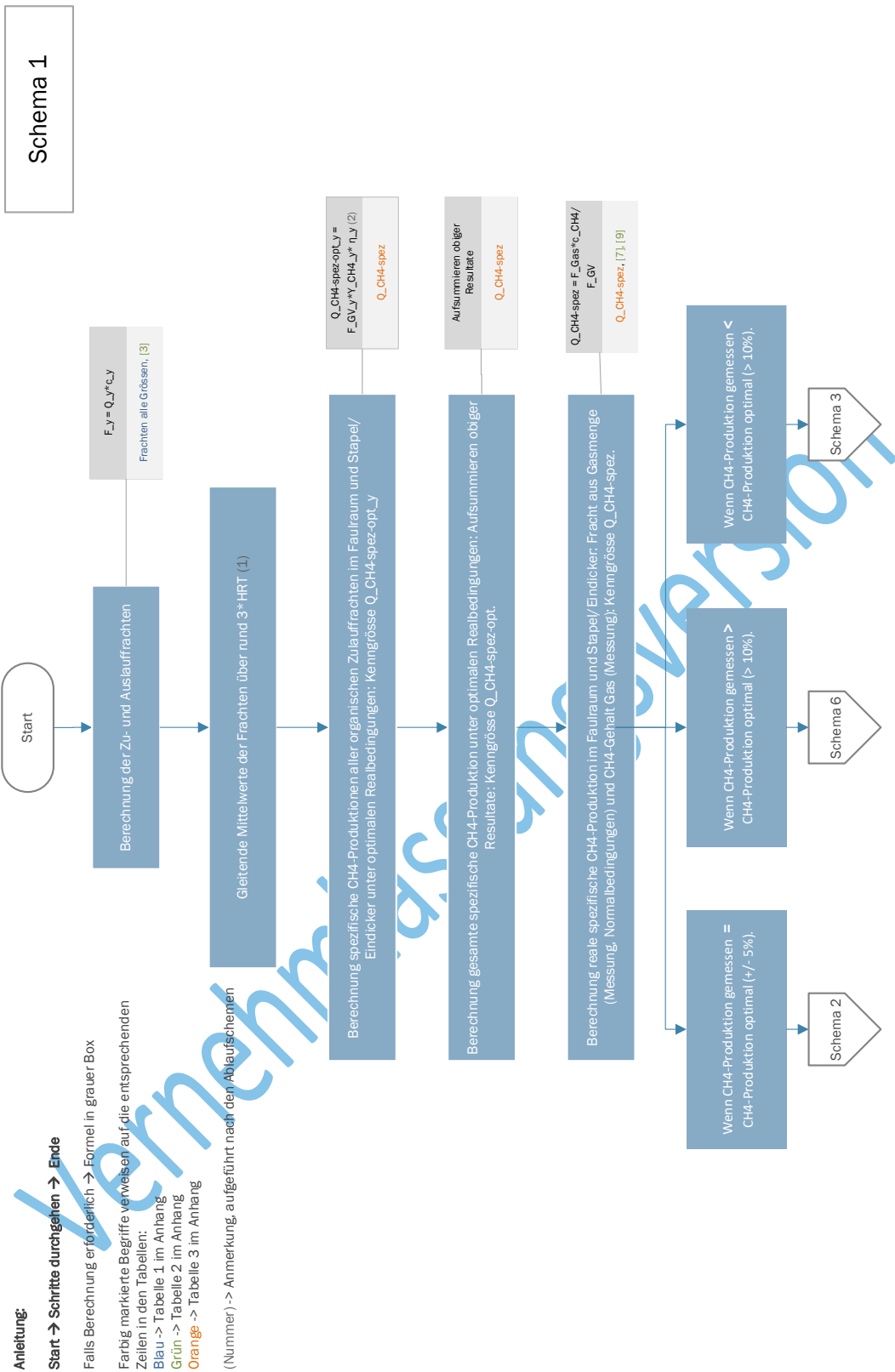
dass in jedem Durchgang eine Massnahme realisiert wird (bei entsprechendem Bedarf). Nach einem Durchgang (Position «Ende») wird der nächste Durchgang gestartet (Position «Start»). In diesem Sinn wird ein andauernder Prozessbeurteilungs- und -optimierungskreislauf durchlaufen.

Beim Vorgehen wird zwischen der Bestimmung abgeleiteter Grössen durch Berechnung und der Interpretation der Daten unterschieden:

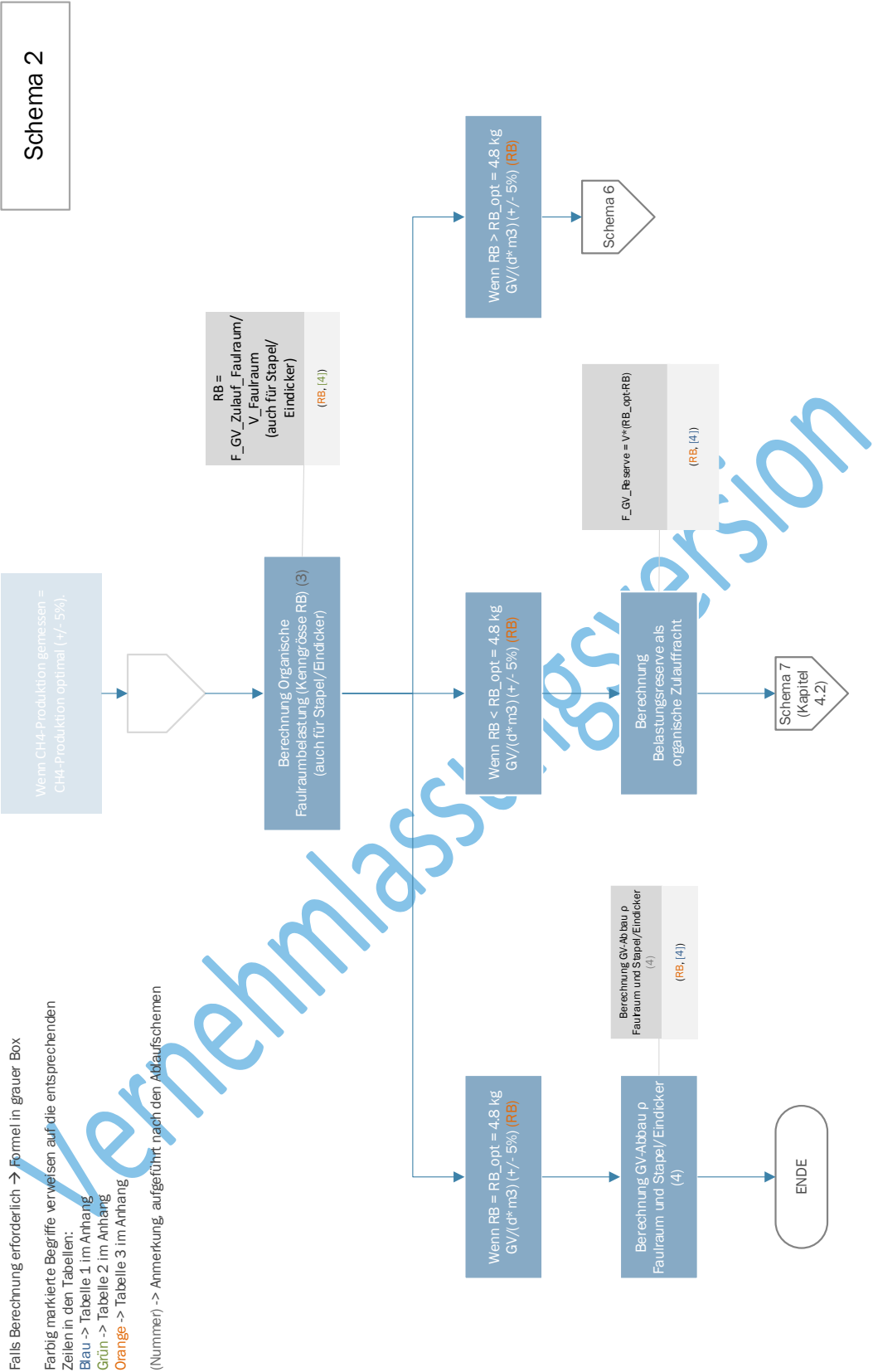
- Die **Berechnung** von Prozesskenngrössen (Kapitel 3.1) gehört zusammen mit der Berechnung anderer abgeleiteter Grössen (z.B. Frachten) zu den ersten Schritten der Mess- und Analysendatenauswertung. Tabelle 1 und Tabelle 2 im Anhang enthalten eine Zusammenstellung der wichtigsten abgeleiteten (berechneten) Grössen, die zur Interpretation der Mess- und Analysenresultate der Faulung und Co-Vergärung verwendet werden. Ein Teil dieser Grössen sind Kenngrössen (rot markiert).
- Zur **Interpretation** der Daten wird immer Wissen zu den biologischen Prozessen der Vergärung usw. benötigt (Vorwissen aus praktischer Erfahrung, Expertenwissen, Forschungsergebnisse). Die Tabelle 3 im Anhang beinhaltet eine Zusammenstellung von Aussagen und Folgerungen zu den Mess- und Analysendaten wie auch zu den abgeleiteten Daten (z.B. Kenngrössen). Die Sammlung ist nicht vollständig und beschränkt sich auf Zusammenhänge, welche die Vergärungsprozesse betreffen. Die Tabelle entspricht im Grunde genommen einer Form eines einfachen, mehrheitlich qualitativen Prozessmodells, welches auf dem Wissen zu den Prozessen beruht.
Zur Veranschaulichung der Grössen und Aussagen in der Tabelle 3 soll ein Prozessschema zur anaeroben Vergärung und zum Schwefelstoffwechsel dienen (Abbildung 6 im Anhang). Im Schema sind die Teilprozesse der Vergärung (Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese, Methanogenese) dargestellt.

Auf das Abgeben eines Berechnungssheets zur einfachen Methodik wird aus folgenden Gründen verzichtet:

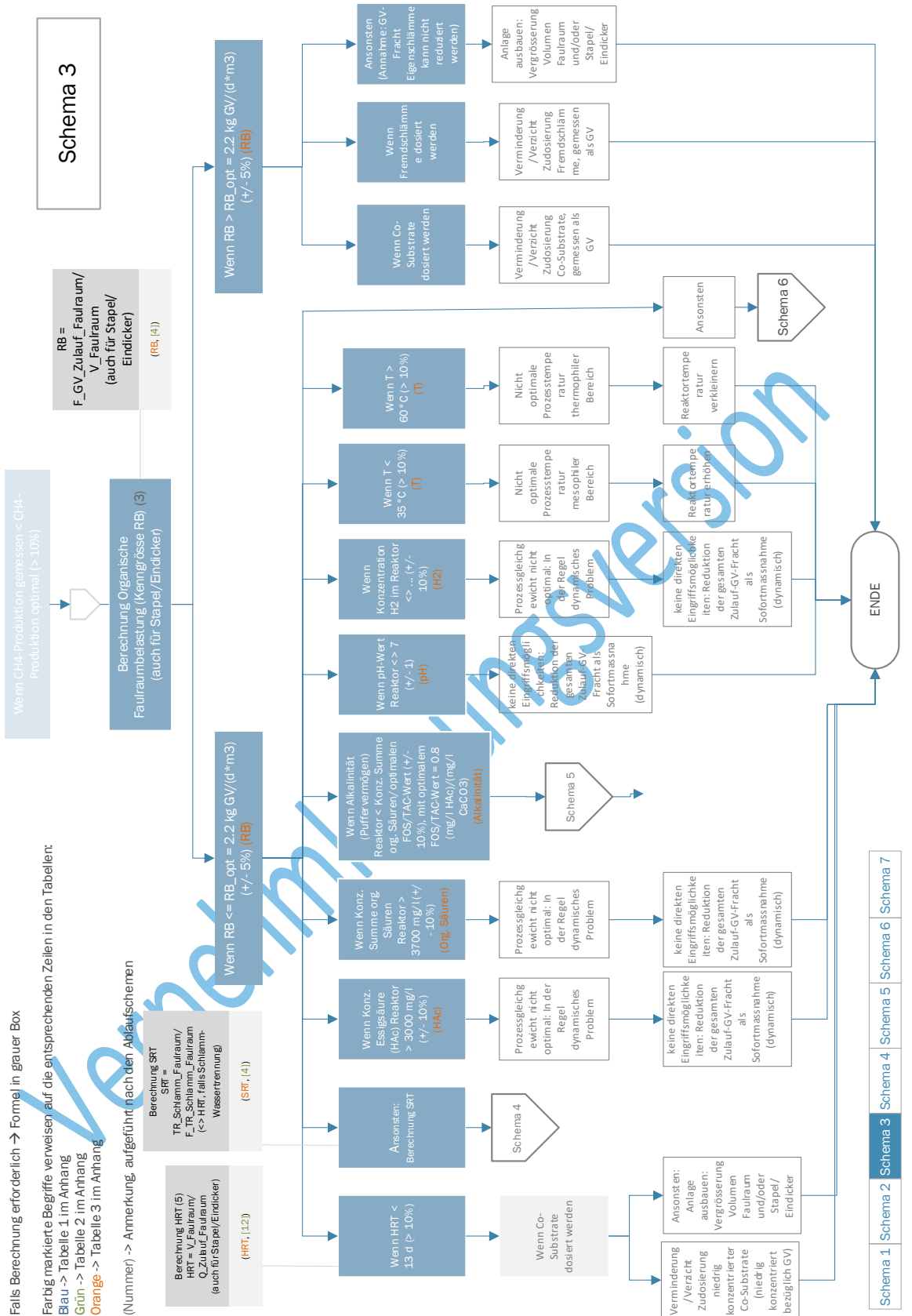
- Das Excel-Werkzeug (Kapitel 3.4) enthält diese Berechnungen ohnehin und geht noch darüber hinaus.
- Allenfalls sind mindestens ein Teil der Berechnungen bereits im Leitsystem der Anlage implementiert, sodass direkt auf die entsprechenden Berechnungsergebnisse zurückgegriffen werden kann.
- Die Berechnungen in der Vorgehensempfehlung resp. in der Tabelle 2 im Anhang können leicht selber (separat) ausgeführt werden resp. es kann leicht ein Berechnungssheet dazu erstellt werden.



Schema 1	Schema 2	Schema 3	Schema 4	Schema 5	Schema 6	Schema 7
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------



Schema 1	Schema 2	Schema 3	Schema 4	Schema 5	Schema 6	Schema 7
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------



Falls Berechnung erforderlich → Formel in grauer Box

Farbig markierte Begriffe verweisen auf die entsprechenden

Zellen in den Tabellen:

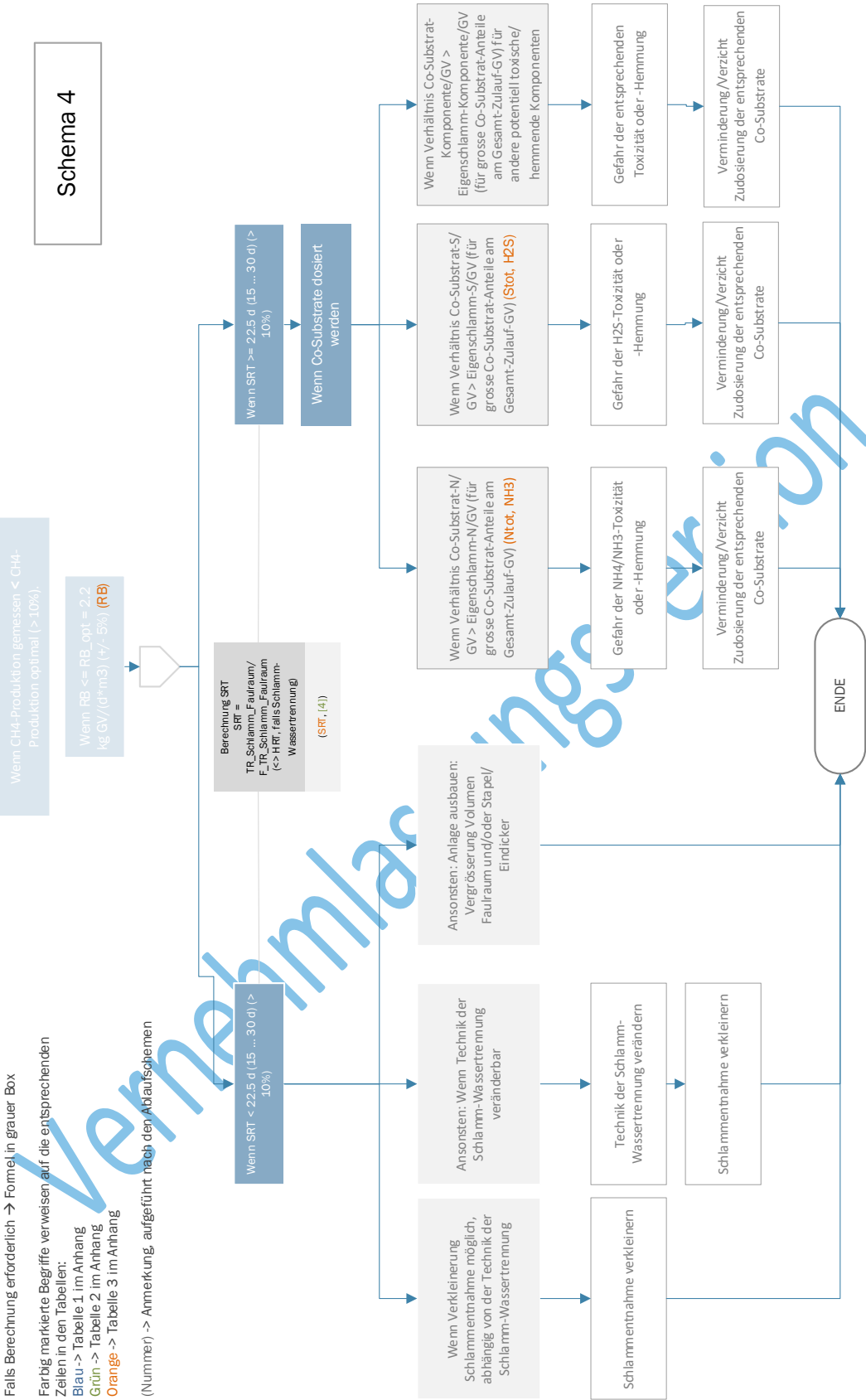
Blau → Tabelle 1 im Anhang

Grün → Tabelle 2 im Anhang

Orange → Tabelle 3 im Anhang

(Nummer) → Anmerkung, aufgeführt nach den Ablaufschemen

Schema 4



Falls Berechnung erforderlich → Formel in grauer Box

Farbig markierte Begriffe verweisen auf die entsprechenden Zeilen in den Tabellen:

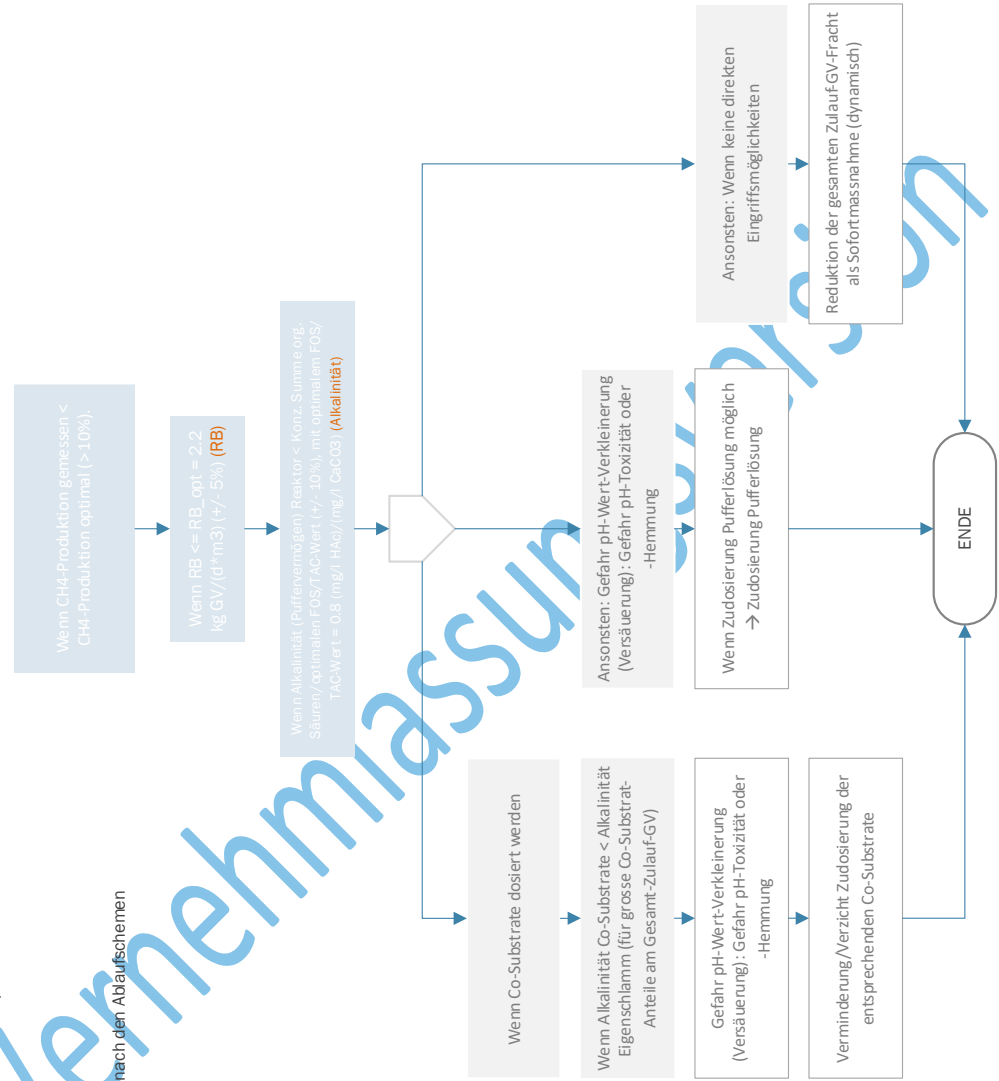
Blau → Tabelle 1 im Anhang

Grün → Tabelle 2 im Anhang

Orange → Tabelle 3 im Anhang

(Nummer) → Anmerkung, aufgeführt nach den Ablaufschemen

Schema 5



Falls Berechnung erforderlich → Formel in grauer Box

Farbig markierte Begriffe verweisen auf die entsprechenden Zeilen in den Tabellen:

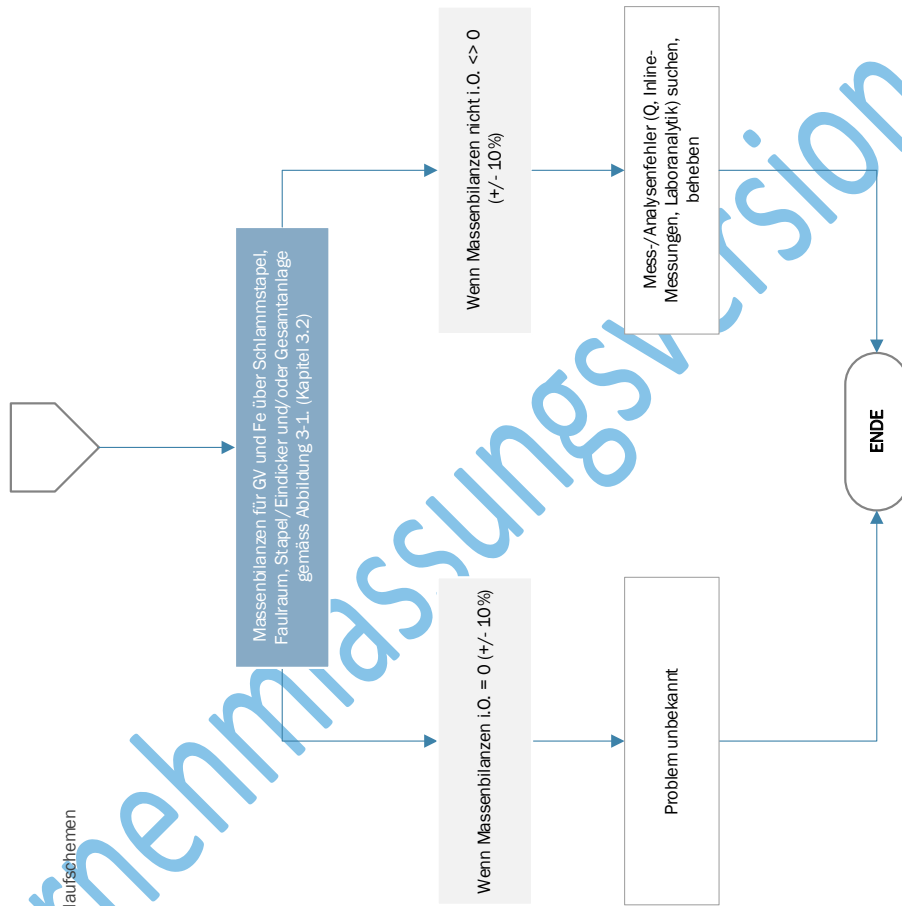
Blau → Tabelle 1 im Anhang

Grün → Tabelle 2 im Anhang

Orange → Tabelle 3 im Anhang

(Nummer) → Anmerkung, aufgeführt nach den Ablaufschemen

Schema 6



Anmerkungen:

- 1) Begründung: Stationäre Betrachtung, Stationäres Modell: Grösste Angleichzeit bei Änderungen der Eingangsgrössen ist durch die Rührkesselhydraulik der Faulung/Co-Vergärung (Faulraum und Stapel/Eindicker) bestimmt, abgesehen von längerfristigen Änderungen in der biologischen Populationszusammensetzung. Die Rührkesselhydraulik bewirkt, dass Grössen resp. deren Zahlenwerte nach ca. $3 \cdot \text{HRT}$ im stationären Zustand (Gleichgewicht) sind, deshalb sind Mittelwerte über $3 \cdot \text{HRT}$ zu verwenden (keine höhere Auflösung), sonst macht man zu grosse Fehler. Fehlende Messwerte durch linear interpolierte Werte ersetzen! Zur Berechnung ist ein Excel-Sheet oder Programm erforderlich.
- 2) Für Eigen- und Fremdschlamm in der Regel anstelle von $Y_{\text{CH}_4, \text{Y}} \cdot \eta_{\text{Y}}$ direkt den Erfahrungswert optimaler Faulungen von 360 - 400 $\text{I}_\text{N} \text{CH}_4/\text{kg GV}$ verwenden.
- 3) RB und SB allenfalls neu diskutieren, Maximalwert für RB ungewiss (RB, SB und Kapitel 6.2).
- 4) Die hier aufgeführten Berechnungen können selbstverständlich auch für nicht optimale Prozesszustände durchgeführt werden (in der Vorgehensempfehlung nicht aufgeführt), beispielsweise, um die Abweichungen vom optimalen Abbau resp. von der optimalen Produktivität zu bestimmen.
- 5) Notwendigkeit für Minimalwert für HRT ungewiss (HRT und Kapitel 6.2).
- 6) Allgemein: Die zeitliche Reihenfolge der (allfälligen) Realisierungen/Umsetzungen der empfohlenen Massnahmen muss nicht der Reihenfolge innerhalb der hier vorgestellten Vorgehensempfehlung entsprechen. Vielmehr hat die praktische Realisierung resp. deren zeitliche Reihenfolge weitere Kriterien wie Machbarkeiten, Aufwände, planerische Randbedingungen usw. zu berücksichtigen.

3.3.2 Grenzen des einfachen Modells

Das einfache Modell ist grösstenteils qualitativ. Einige Zahlenwerte sind jedoch gegeben und zusammen mit den zugehörigen Tabellen sind einige Berechnungen möglich. Wird beispielsweise auf der Anlage für eine Kenngrösse ein nicht optimaler Wert bestimmt, kann mit dem Modell berechnet werden, wie stark einzelne ursächliche Grössen verändert werden müssten, um den Kennwert in den optimalen Bereich zu bringen.

Es können, wenn auch nur sehr begrenzt, mit dem Vorgehensweg auch quantitative Resultate erhalten werden. Wenn beispielsweise die Aussage resultiert «Verkleinerung der Co-Substrat-Dosierung», kann die Co-Substrat-Dosierung um z.B. 10% verringert werden (rein rechnerisch, vorerst nicht technisch auf der Anlage). Mit dieser Änderung kann der Vorgehensweg dann erneut durchlaufen werden und damit die Anlage resp. die Prozessführung (neu) beurteilt werden. Dies allerdings nur sehr begrenzt, da Messdaten, welche die Antwort der Anlage auf die Massnahme zeigen würden, fehlen (und auch nicht simuliert werden können). Mit gewissen Annahmen zu den fehlenden Daten entspricht das Vorgehen aber dennoch einer einfachen Form der Prozesssimulation (Folgenabschätzung, Szenarienabschätzung, ...). In allenfalls mehreren Durchgängen (jeweils nach Anpassung der Co-Substrat-Dosierung) kann so die zu einem optimalen Prozesszustand führende Co-Substrat-Dosierung ganz grob ermittelt werden (iteratives Vorgehen). Dies entspricht einer quantitativen Aussage. Dieses Vorgehen ist grundsätzlich bei sämtlichen empfohlenen Massnahmen möglich.

Für echte, quantitative Aussagen ergeben sich die folgenden Möglichkeiten:

- Die (qualitativen) Hinweise des einfachen Modells im Excel-Werkzeug gemäss Kapitel 3.4 weiterverwenden.
- Die Hinweise des einfachen Modells in ein anderes numerisches (quantitatives) Modell einsetzen.
- Verwenden der Hinweise des einfachen Modells durch den Betrieb direkt auf der Anlage und Monitoring der betrieblichen Veränderungen (normale Betriebsüberwachung, Erfolgskontrolle). Anschliessend wird das Resultat wieder mit dem einfachen Modell beurteilt usw. (Verbesserungs-/Optimierungskreislauf).

3.4 Ist-Zustandsbeurteilung mittels Excel-Tool

Wie kann eine vertiefte stationäre Beurteilung der Vergärungsprozesse erstellt werden?

Wenn nebst einfachen qualitativen und quantitativen auch erweiterte quantitative Aussagen zu den Prozessen benötigt werden, reicht das einfache Modell aus dem vorangehenden Kapitel nicht aus. Deshalb wurde ein Excel-Tool Excel erarbeitet, welches die Vergärungsprozesse im stationären Zustand analysieren und auswerten kann. Diese Analyse erlaubt auch einen Ausblick auf die Prozessanpassung unter veränderten Bedingungen und ist somit in der Lage auf einfache Weise quantitativ zu modellieren, wohingegen das einfache Modell vor allem den Ist-Zustand beschreibt. Grundlage dazu bilden wiederum die Mess- und Analysengrössen (Kapitel 3.1 und 3.2).

Das Werkzeug besteht aus zwei Teilen, welche der Empfehlung beigelegt sind:

- Eigentliches Kenngrößen-Werkzeug
- Werkzeug zur Hemmungsbeurteilung

Tabelle 1, 2 und 3 im Anhang sowie die Vorgehensempfehlung aus Kapitel 3.3 sind auch als Einführung in das Excel-Werkzeug zur Beurteilung, Überwachung und Optimierung der Faulung und der Co-Vergärung (Kapitel 3.4) gedacht.

Die wichtigsten Erweiterungen des detaillierten Kenngrößen-Werkzeugs und der Hemmungsbeurteilung gegenüber dem einfachen Werkzeug

- Integrierte Datenbank für Methanausbeuten einer grossen Anzahl von Substraten, mit direktem Zugriff auf diese Daten
- Berücksichtigung unterschiedlicher Reaktorkonfigurationen der Faulung und Co-Vergärung (Parallel- und Serieschaltungen)
- Berechnung von Energiedaten ausgehend von den Gasdaten
- Halbquantitative Hemmungsbeurteilung (kritische Wertebereiche usw. für hemmende/toxische Stoffe)
- Interaktive Implementierung unter Excel

Vernehmlassungsversion

4 VORAUSSETZUNGEN ZUR CO-VERGÄRUNG

Folgende Grundlagen wurden zur Erarbeitung dieses Kapitels verwendet:

- Expertengespräche mit ARA-Betriebsleitern und der Begleitgruppe zur vorliegenden Empfehlung
- Arbeitshilfe für die Annahme von Co-Substraten (Fasel A. und Schiller A., 2019)
- Erfahrungswerte aus anderen Vergärungsanlagen (Erfahrung ZHAW)

4.1 Allgemeine Voraussetzungen

Wie lassen sich die Voraussetzungen an eine Co-Vergärung einteilen und beschreiben?

Ganz allgemein lässt sich wohl sagen, dass sich nur grosse Anlagen eine Co-Vergärung leisten sollten, da ein Mindestaufwand unabhängig von der Grösse der Anlage aufkommen wird und kleine Anlagen diesen nicht oder zumindest nicht ohne fremde Hilfe bewältigen können.

Diskussionslos darf bei jeglichen Überlegungen hinsichtlich einer Co-Vergärung niemals das Kerngeschäft einer ARA, nämlich der Gewässerschutz (und somit die Reinigung von Abwasser), gefährdet werden. Dieser Grundsatz gilt als absolut fundamental und wird allen nachfolgenden Überlegungen übergeordnet.

4.1.1 Betriebliche Grundlagen

Die wichtigste betriebliche Voraussetzung zur Annahme von Co-Substraten ist das Vorhandensein einer Überkapazität der Faulung (Fracht-Reserve). Bei Co-Substraten ist eine hydraulische Mehrbelastung eher unwahrscheinlich (kleine Mengen). Eine Mehrproduktion von Gas muss ausserdem auf Seiten der Gaslagerung, Behandlung und allenfalls Einspeisung oder Verwertung abgefangen werden können. Nicht zuletzt darf bei der Annahme von Co-Substraten dessen Aufbereitung, Lagerung und spätere Dosierung nicht unterschätzt werden. Sie müssen zunächst in einen pumpbaren Zustand gebracht, von Störstoffe befreit und beispielsweise bei fetthaltigen Substraten noch zusätzlich erwärmt werden. Auch übermässiger Gestank, sowie Entzündbarkeit oder Explosionsfähigkeit sollten in die Beurteilung miteinbezogen werden.

4.1.2 Rechtliche Grundlagen

Die rechtliche Grundlage zur Annahme und Entsorgung (Vergärung) von Co-Substraten kann je nach Substrat aber auch je nach Kanton variieren. Grundsätzlich müssen Betriebe dafür eine Bewilligung bei Bund und Kanton einholen. Diese Betriebsbewilligung unterliegt der Kontrolle des betreffenden kantonalen Amtes (zum Beispiel das Amt für Wasser und Abfall), beinhaltet eine Liste freigegebener Abfälle und ist zudem zeitlich limitiert (typischer Weise 5-10 Jahre). Der Aufwand zur Beschaffung dieser Bewilligung sollte nicht unterschätzt werden.

Zusätzlich sind aus rechtlicher Sicht folgende Punkte relevant:

- Tierische Nebenprodukte: Die Entsorgung tierischer Nebenprodukte ist Bewilligungspflichtig und wird vom kantonalen Veterinärdienst kontrolliert.
- Alkoholische Co-Substrate: Um alkoholische Substrate vom Alkoholgesetz zu befreien, müssen sie entweder aus Industrie oder Gewerbe als Abfallalkohol stammen oder ansonsten allenfalls denaturiert werden.
- Mit dem Einsatz von alkoholischen Substraten geht eine Bewilligung für das Verpflichtungsverfahren der eidgenössischen Zollverwaltung (EVZ) einher. Diese verlangt, dass flüchtige organische Kohlenstoffe (VOC) nicht in die Atmosphäre gelangen und verpflichtet den Betreiber eine jährliche VOC-Bilanz zu führen und einzureichen.
- Wird aufbereitetes Biogas ins Erdgasnetz eingespeist, muss durch die zusätzliche Verwertung von Co-Substraten, ein neuerliches Gesuch zur Mineralölsteuerbefreiung eingereicht werden. Zudem müssen die Co-Substrate auf einer Positivliste der EVZ aufgeführt sein und somit als biogene Abfälle oder Produktionsrückstände gelten.

Diese Liste ist sicherlich nicht komplett, enthält jedoch die wichtigsten Punkte.

4.1.3 Ökologische Grundlagen

Um über die Annahme eines Co-Substrates zu entscheiden ist es sinnvoll auch ökologische Aspekte zu berücksichtigen. Diese sind in der Regel nicht festgehalten und daher nicht nachzulesen. Ein gewisses Fachverständnis und Feingefühl für die lokalen Umstände sind daher notwendig.

Folgende Überlegungen sollten berücksichtigt werden:

- Biologische Abbaubarkeit der Rückläufe aus der Co-Vergärung in der Abwasserstrasse der ARA
- Ökotoxikologische Aspekte nicht abgebauter Bestandteile im Gewässer
- Wenn ein verfügbarer Abfall ohne Weiteres auch direkt als Flüssigdünger in der Landwirtschaft geeignet ist, sollte er nicht auf einer ARA vergoren werden.

4.1.4 Wirtschaftliche Grundlagen

Die Wirtschaftlichkeit steht nicht immer im Konflikt mit der Ökologie. Für den Einsatz von Co-Substraten ist es zentral, dass sich dieser für den ARA-Betreiber auszahlt oder sich am Ende finanziell zumindest nicht negativ auswirkt. Den Einnahmen durch den Mehrertrag an Biogas sind unbedingt die Mehrkosten gegenüberzustellen.

Nachfolgend werden die wichtigsten Mehrkosten zusammengefasst:

- Ev. Einkauf von Co-Substrat
- Transport von Co-Substrate
- Investitionskosten für das die Aufbereitung von Co-Substrat
- Energiekosten für das Erwärmen von Co-Substrat
- Zusätzliche Personalkosten
- Zusätzliche Schlammentsorgungskosten
- Zusätzliche Trübwasserbehandlung

Um die Wirtschaftlichkeit von Co-Substraten zu verbessern, wird empfohlen auf einen hohen CSB oder einen hohen Fettgehalt (mit Vorteil pflanzlich) zu achten. Ebenfalls sind störstofffreie Substrate vorzuziehen. Grundsätzlich lässt sich aus wirtschaftlicher Sicht also die Unterscheidung zwischen flüssigen und damit pumpbaren Co-Substraten und allen anderen aufwändiger aufzubereitenden Co-Substraten machen. Da die Wirtschaftlichkeit eines Co-Substrates massgebend durch den Methan- resp. Gasertrag beeinflusst wird, sollte dieser möglichst gut abgeschätzt werden. Dazu können die Methoden resp. Werkzeuge gemäss den Kapiteln 3.3, 3.4 sowie 4.2 dienen. Fehlen spezifische Methan- oder Gaserträge von Co-Substraten oder beliebigen Zulauf-Zusammensetzungen, können diese mit standardisierten Laborversuchen (z.B. VDI 4630) ermittelt werden. Das stellt ein sinnvolles Mittel dar, um Sicherheit bei der Entscheidung bezüglich der Annahme von Co-Substraten zu gewinnen.

4.1.5 Biologisch/Verfahrenstechnische Grundlagen

Eine Erweiterung der Faulung durch Co-Substrate hat eine veränderte Zusammensetzung und Menge an Faulwasser zur Folge, welches wiederum auf die biologische Reinigung der ARA Auswirkungen hat und diese weder überlasten noch im Prozess allzu stark stören darf (verschlechterte Flockung und damit schlechtere Entwässerung etc.). Deshalb wird empfohlen auf einen tiefen Anteil an Stickstoff zu achten. Dieser ist besonders hoch bei proteinreichen Substraten. Generell sind die biologische Abbaubarkeit der Rückläufe aus der Co-Vergärung in der Abwasserstrasse der ARA sowie eine allfällige Hemmung der ARA-Biologie durch die Rückläufe zu berücksichtigen.

Um allfälligen Prozesshemmungen vorzubeugen sollten schädliche organische Verbindungen wie zum Beispiel polyzyklische aromatische Verbindungen (PAK), Toluol, Benzol, Lösungsmittel, organische Zinnverbindungen, Merkaptane und Russ, vermieden werden.

4.1.6 Fachliche Expertise

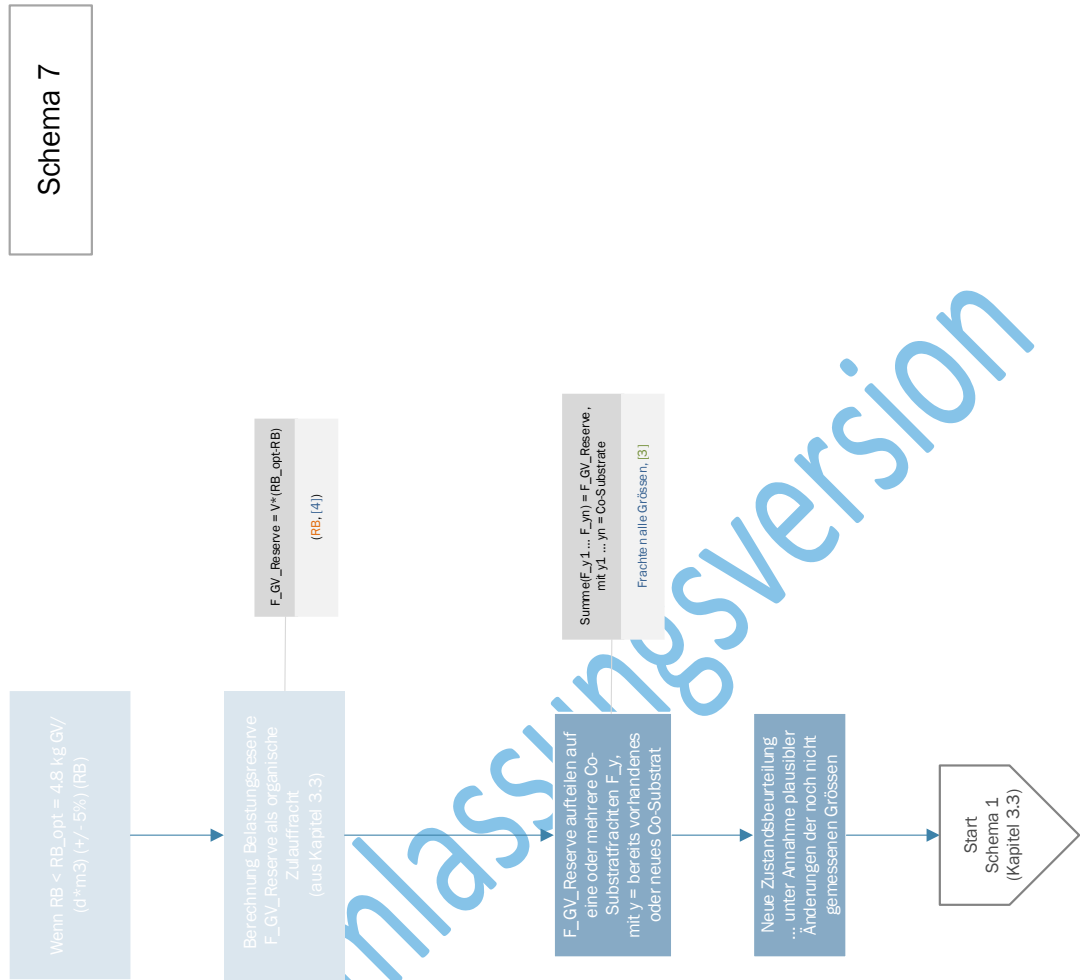
Die Motivation, sich ein tieferes Verständnis anzueignen und auch sich mit den Problemen auseinanderzusetzen, welche zweifelsfrei auftreten werden, muss ausreichend vorhanden sein. Ausserdem sollte über die Erweiterung des Messkonzepts (Kapitel 3.2) nachgedacht werden.

4.2 Einfache Methodik zur Beurteilung der Erweiterung der Co-Substratannahme

Wie können Kapazitätsreserven der Faulung und Co-Vergärung mit Co-Substraten ausgeschöpft werden?

Im Anschluss an die einfache Methodik zur Ist-Zustandsbeurteilung der Prozesse gemäss Kapitel 3.3 wird die Methodik hier erweitert. Das Ziel ist die Beurteilung der Möglichkeiten zum Ausschöpfen vorhandener Kapazitätsreserven der Faulung und Co-Vergärung. Die Reserven sollen dabei durch neue oder vermehrte resp. erweiterte Co-Substrat-Einsätze auf der Anlage ausgeschöpft werden. Das Ziel dabei ist die vollständige Nutzung des vorhandenen Faulraumvolumens zur maximal möglichen Methangewinnung.

Im Folgenden ist der Vorgehensweg der Methodenerweiterung dargestellt.



Falls Berechnung erforderlich \rightarrow Formel in grauer Box

Farbig markierte Begriffe verweisen auf die entsprechenden
Zeilen in den Tabellen:

Blau \rightarrow Tabelle 1 im Anhang

Grün \rightarrow Tabelle 2 im Anhang

Orange \rightarrow Tabelle 3 im Anhang

4.3 Logistik der Faulung mit Co-Vergärung

Welche logistischen Anforderungen werden an den Betrieb durch eine Co-Vergärung getrieben?

Es ist nicht vorgesehen, dass mit dieser Empfehlung die Umsetzung der Co-Vergärung mit Projektierung, maschineller Ausrüstung und zusätzlicher Verfahrensstufen abgedeckt wird. Für die Planung einer Co-Vergärung sollen in diesem Abschnitt einige betrieblichen Hinweise gegeben werden, welche zu beachten sind. Wie in Kapitel 4.1 bei den betrieblichen Voraussetzungen bereits erwähnt, bestimmen folgende Eigenschaften von Co-Substraten die Logistik der Co-Vergärung. Sie sind jeweils mit notwendigen betrieblichen Massnahmen versehen:

- **Gestank:** ein geschlossener Raum zur Annahme (Lastwagenschleuse) verhindert die Geruchsbelastung der Umgebung.
- **Dosierbarkeit:** Unter Umständen ist es notwendig oder sinnvoll ein Co-Substrat zu lagern oder über längere Zeit zu dosieren. Entsprechende Lagertanks und Zufuhrpumpen ermöglichen dies. Die Lagerbarkeit eines Co-Substrates sollte jedoch zuvor geklärt werden.
- **Pumpbarkeit:** bei fetthaltigen oder gefrorenen Co-Substraten muss die Möglichkeit zur Erwärmung bestehen. Andere Substrate müssen zuerst mit einem Schredder zerkleinert und zu einem Brei aufgeschlämmt werden.
- **Störstoffe:** die einwandfreie Pumpbarkeit kann mit der kombinierten Anwendung von Separations-Hammelmühle und Strainpresse gewährleistet werden.
- **Ablagerung im Fermenter:** Trotz weitreichender Massnahmen werden Ablagerungen im Fermenter über die Zeit zu einer Reduktion der Fermenterkapazität führen. Die regelmässige Entleerung und Reinigung ist deshalb betrieblich vorzusehen.

4.4 Betriebserfahrungen

Wieviel Betriebserfahrung ist Voraussetzung für eine Co-Vergärung?

Betriebserfahrung ist extrem wichtig auf jeder Anlage - unabhängig vom Prozess. Diese Empfehlung und die Beilagen dazu sollen nicht in Konkurrenz zur Betriebserfahrung stehen sondern diese untermauern.

Viele Betriebsverantwortliche für Faulanlagen auf ARA haben ein sehr gutes Gefühl für ihre Anlage und ihren Prozess. Nichtsdestotrotz gibt es Anlagen, welche besonders viel Aufwand betreiben um die Produktion von Klärgas auf ihrer Anlage optimiert und konstant zu fahren. Von diesen Anlagen sollen andere, welche weder die Mittel noch die Zeit zur Verfügung haben, profitieren.

Neben den bereits erwähnten Berechnungen und anderen Kriterien der Co-Vergärung spielen für den Betrieb viele weitere Faktoren (auf welche hier nicht eingegangen werden kann) und das Bauchgefühl eine wichtige Rolle beim Entscheid für oder gegen die Einführung oder Erweiterung der Co-Vergärung. Auf jeden Fall bedingt Prozessoptimierung ein hohes Mass an Fachverständnis und Betriebserfahrung und sollte ohne diese auch mit dieser Empfehlung nur mit Vorsicht umgesetzt werden.

5 OPTIMIERUNGEN

Prozessoptimierungen sind Massnahmen, welche zu verbesserten Leistungsdaten einer Anlage führen. Bei Faulung- und Co-Vergärungsanlagen wären dies z.B. eine erhöhte Gasproduktion bei gleichbleibendem Fermentervolumen. Aber auch verbesserte Faulschlammeigenschaften wie z.B. die Entwässerbarkeit oder die Abbauleistung bestimmter Stoffe gehören dazu.

Optimierungen im Betrieb sind Massnahmen, welche die Anlage in betrieblichen Aspekten wie finanziell, ökologisch oder logistisch verbessern.

In finanzieller Hinsicht könnten dies z.B. Massnahmen zur Reduktion der Transport- oder Energiekosten sein. Ökologisch könnte nebst der Reduktion von Energie zur Erwärmung des Fermenters oder das Pumpen des Schlammes auch die Gesamtbilanz der Umweltbelastung optimiert werden (bspw. Indem untersucht wird, ob eine Co-Vergärung inkl. Transport der Co-Substrate sowie zusätzlicher Abbauleistung der biologischen Stufe hinsichtlich der CO₂-Emissionen sinnvoll ist oder nicht). Logistische Optimierungsmassnahmen sind Überlegungen zu Transport- und Lagerungsprozessen, welche betrieblicher Aufwand sowie bauliche Massnahmen mit sich ziehen.

Für Prozessoptimierungen wird auf das Kapitel 3, insbesondere das Kapitel 3.4, verwiesen.

Betriebliche Optimierungen werden insbesondere im Zusammenhang mit der Co-Vergärung in Kapitel 4 behandelt. Natürlich sind betriebliche Optimierungen aber auch bei Faulungsanlagen ohne Co-Vergärung möglich. Oftmals leiten diese sich aus Prozessoptimierungen ab (z.B. verbesserte Gasausbeute ergibt optimierte Energiebilanz und reduzierte Kosten). Wie bereits in Kapitel 4.4 erwähnt sollten Betriebsoptimierungen aufgrund dieser Empfehlung nur mit Vorsicht und unter Mitarbeit entsprechender Fachpersonen umgesetzt werden.

Vernehmlassungsversion

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

6.1 Schlussfolgerungen

Die Fragestellung, welche der vorliegenden Empfehlung zugrunde liegt, wurde im Projekt mit folgenden Methoden bearbeitet:

- Literaturdaten, insbesondere Kenngrößen (Kapitel 3.1, 3.2), Fachwissen, Kenngrößenmodelle (Kapitel 3.3, 3.4)
- Expertengespräche (Kapitel 4.1, 4.3, 4.4)
- Datenanalytische Methoden, neuronale Netzwerke
- Mechanistische Modelle (ausschliesslich Methodenstudium, Ideen für Modellstrukturen)

Während die ersten beiden methodischen Ansätze im Fachgebiet etabliert sind («Stand der Technik»), liegen die beiden letzteren noch weitgehend im Bereich der Forschung und Entwicklung. Dementsprechend hat sich insbesondere die erste, aber auch die zweite Vorgehensweise im Projektverlauf als zielführend herausgestellt und die Empfehlung beruht auf diesen Ergebnissen. Die beiden letzten Ansätze zeigen sich als vielversprechend zur Lösung der Projektaufgabe. Der zugehörige, notwendige Entwicklungsaufwand liess hingegen im Rahmen des möglichen Projektumfangs keine konkreten Resultate zu. Mechanistische Modelle wurden lediglich als Werkzeug im Bereich der Projektfragestellung studiert, ohne zum Einsatz zu kommen (Ein solcher Einsatz war im Rahmen des Projektauftrags auch nicht gefordert). Datenanalytische Methoden und neuronale Netze (Machine Learning) kamen zur Anwendung und es konnten damit erste, vielversprechende, Resultate erzielt werden. Zwei «Highlights» daraus werden unter «Datenanalytische Methoden und neuronale Netze» vorgestellt (siehe unten).

6.1.1 Kenngrößenmodelle, -werkzeuge

Die beiden Kenngrößenwerkzeuge gemäss den Kapiteln 3.3 und 3.4 stellen das «Herzstück» der Empfehlung dar. Das einfachere Werkzeug entspricht dabei einer reinen Vorgehensempfehlung zur Prozessbeurteilung und -optimierung, primär für die Betreibenden von Faul- und Co-Vergärungsanlagen. Es erlaubt hauptsächlich qualitative Aussagen. Das Werkzeug enthält keine vorgefertigten Programme oder andere Bausteine zur Anwendung. Das umfangreichere Werkzeug mit prinzipiell derselben Zielsetzung erlaubt hingegen detailliertere und auch vermehrt quantitative Antworten auf Fragen der Beurteilung und Optimierung der Faulung und Co-Vergärung. Das Werkzeug steht in Form eines interaktiven Programms (unter Excel) zur Verfügung.

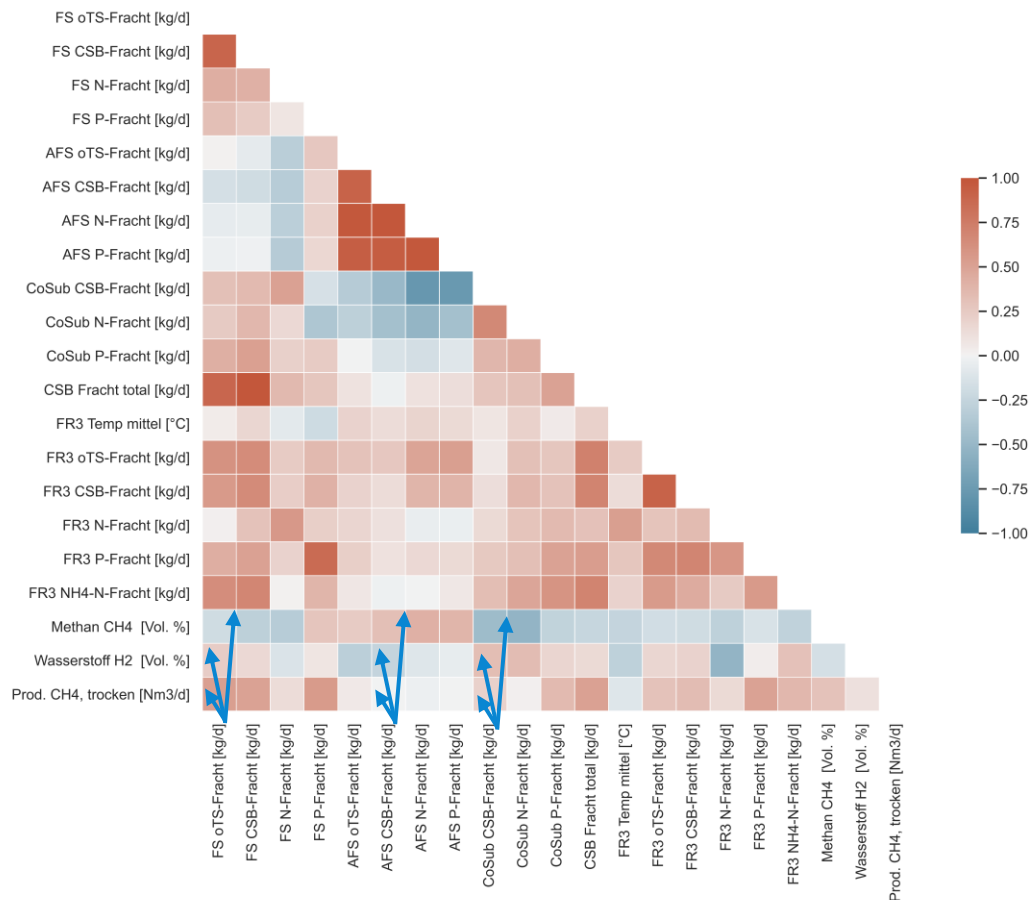
6.1.2 Expertengespräche

Die Beurteilung sowie Optimierung der Faulung und Co-Vergärung geht über die reine Beurteilung und Optimierung der entsprechenden Prozesse hinaus. Hier lieferten die Expertengespräche wesentliche Informationen aus erster Hand, welche im Besonderen die betrieblichen, logistischen, rechtlichen, ökologischen und wirtschaftlichen Aspekte in der Entscheidungsfindung zugunsten einer vermehrten Co-Substratdosierung wie auch zugunsten neuer (auf der Anlage bisher nicht eingesetzter) Co-Substrate betreffen. Weiter zeigte sich aus den Expertengesprächen die grosse Wichtigkeit einer umfassenden Betriebserfahrung auf den Anlagen, ohne welche erfolgversprechende Entscheide im Bereich (insbesondere) der Co-Vergärung kaum gefällt werden können. (Mathematische) Werkzeuge werden somit immer Hilfsmittel bleiben und die erwähnte Betriebserfahrung nie ersetzen können.

6.1.3 Datenanalytische Methoden und neuronale Netze

Einige interessante Resultate einfacher Korrelationsanalysen (einfache datenanalytische Methode) werden in Abbildung 4 gezeigt.

Abbildung 4: Paarweise Korrelation sämtlicher Input- und Output-Frachten und Verhältnisse der Co-Vergärung auf der ARA Bern (Betriebsdaten ARA Bern 2015 – 2019, über rund 3*HRT gleitend gemittelt). Es bedeuten: rot = positive, blau = negative Korrelationen, Farbintensität = Korrelationsstärke (Skala rechts).



Die CH₄-Produktion korreliert relativ stark positiv mit der organischen Fracht im Eigenschlamm und etwas weniger stark positiv mit derjenigen in den Co-Substraten (Pfeile). Mit der Co-Substratdosierung lässt sich also (gegenüber dem Eigenschlamm) die CH₄-Produktion nicht so stark beeinflussen. Diese Resultate entsprechen den Erwartungen und belegen die Aussagekraft der Korrelationsanalyse (gewisse «Verifizierung» der Methode). Andererseits korrelieren die organischen Belastungen der Faulung negativ mit dem CH₄-Gehalt (-Anteil) im produzierten Gas und dies besonders stark bei den (verhältnismässig kleinen) Co-Substrat-Belastungen. Der H₂-Konzentration als wichtige Kenngrösse der Prozesskette (Zwischenprodukt, dies allerdings in der Flüssigphase, Abbildung 6) korreliert aber wiederum positiv mit der organischen Belastung. Die entsprechenden Werte bei den Fremdschlämmen zeigen indes gerade das umgekehrte Korrelationsverhalten. Diese Resultate lassen einen weiten Spielraum für möglich Prozess-Hypothesen zu, mit entsprechenden Ideen für Eingriffsmöglichkeiten mit dem Ziel der Optimierung.

So könnten hohe Stoffdurchsätze durch die Prozesskette zu einer erhöhten notwendigen H₂-Konzentration führen, welche ja die treibende Konzentration (eines Teils) der Methanogenese ist. Die Gleichgewichts-H₂-Konzentration in der Gasphase wäre dann entsprechend ebenfalls erhöht, was zu einer gewissen Verschiebung von der CH₄- zur H₂-Produktion führen könnte. Oder aber bei hohen Belastungen könnte die häufig damit verbundene verkleinerte SRT zu einer gewissen Verkleinerung der methanogenen Population führen (langsam wachsende Methanogene). Das könnte wiederum eine Erhöhung der H₂-Konzentration im Faulraum und eine (leichte) Verminderung der relativen CH₄-Produktion bewirken. Weiter könnten bei hohen Belastungen niedriger oxidierte C-Komponenten des Schlammes relativ zu den höher oxidierten etwas schlechter abgebaut werden, was zu einer Erhöhung des CO₂/CH₄-Verhältnisses im Gas führen könnte. Vielleicht könnte bei hoher Belastung infolge erhöhter Säureproduktion auch einfach der ins Gas ausgetriebene CO₂-Anteil erhöht und evtl. parallel dazu der im Auslauf gelöste CH₄-Anteil ebenfalls erhöht werden (meist höherer hydraulischer Durchsatz). Viele weitere Hypothesen sind denkbar.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts konnten diese Zusammenhänge nicht weiter untersucht werden. So sind unter Anderem Korrelationen der im Prinzip als nicht korreliert angenommenen resp. vorausgesetzten Eingangsgrößen zu beachten. Die Zugabe der Fremdschlämme dürfte ein solches «Problem» beinhalten.

Ein Beispiel des Einsatzes eines neuronalen Netzes (Machine Learning-Methode) wird im Folgenden vorgestellt (Abbildung 5).

Die Resultate geben einen ersten Eindruck, wie das Training mit Daten, welche stärker mit der Zielgröße korreliert sind (Korrelation gesamter CSB mit der CH₄-Produktion) offensichtlich zu einer besseren Voraussage führt als das Training mit weniger korrelierten Eingangsdaten (Korrelation alle Daten mit der CH₄-Produktion). Die Ergebnisse dürften nur vergleichbar sein, falls die Versuchsbedingungen identisch sind (gleiches neuronales Netzwerk usw.). Es muss erwähnt werden, dass es sich hier um erste Resultate handelt und im Rahmen des vorliegenden Projekts keine weiteren Untersuchungen gemacht werden konnten. Dennoch stellen wir aufgrund dieses Ergebnisses die folgende Hypothese auf (ohne in der Literatur nach bereits existierenden Ansätzen in diese Richtung recherchiert zu haben):

Hypothese:

Die Prognosegüte einer auf einem neuronalen Netzwerk basierenden Machine Learning-Methode ist ein Mass für die Korrelation zwischen den zugehörigen Input- und Outputdaten. Die Methode (resp. das Werkzeug) eignet sich folglich für datenanalytische Aufgaben.

Beide oben vorgestellten Beispiele zeigen aus unserer Sicht ein wesentliches Potenzial datenanalytischer Methoden resp. neuronaler Netzwerke für Aussagen, welche für die Prozessbeurteilung und -optimierung von Interesse sind.

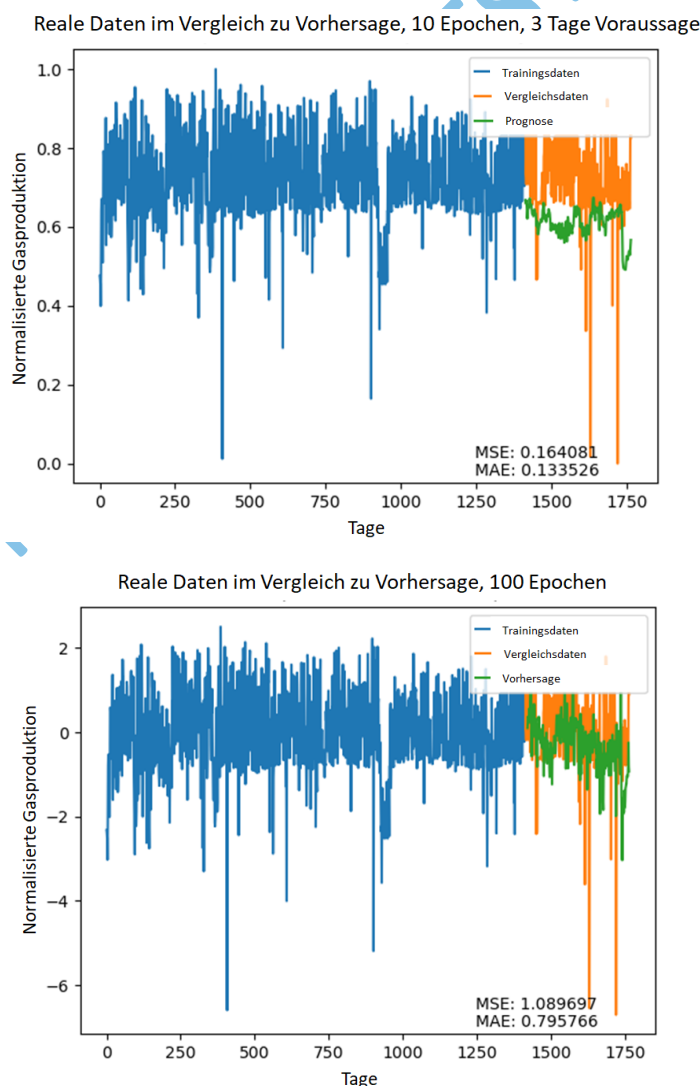


Abbildung 5: Voraussage der CH₄-Produktion der Co-Vergärung auf der ARA Bern über ein Jahr nach dem Training eines neuronalen Netzwerks mit Zulaufdaten zur Co-Vergärung über vier Jahre (Betriebsdaten ARA Bern 2015 – 2019). Grün = vorausgesagte CH₄-Produktion, orange = gemessene CH₄-Produktion im Voraussagejahr. Oberes Bild: Training mit allen Zulaufdaten. Unteres Bild: Training allein mit dem gesamten Zulauf-CSB.

6.1.4 Prozessoptimierung

Die stationären Betrachtungen und Werkzeuge der Empfehlung eignen sich nur beschränkt zur Prozessoptimierung. Dynamische Methoden und Modelle wären für eine umfassende Optimierung notwendig, da die meisten Abweichungen von den optimalen Prozessbedingungen resp. -verläufen durch dynamische Änderungen der Zulaufwerte oder anderer Einflussgrößen (Störungen) zustande kommen. Andererseits ist die zur Prozessoptimierung notwendige Datenlage, insbesondere als Voraussetzung einer erfolgreichen dynamischen Modellierung, auf den meisten Anlagen ungenügend. Dies betrifft vor allem die zeitliche Auflösung der Mess- und Analysendaten (Kapitel 6.2).

Die folgenden Optimierungspotenziale können angegeben werden:

1. Für Faulungen, mit den stationären Methoden/Werkzeugen der Empfehlung erfassbar:
 - Bei Optimalbelastung:
 - Keine weiteren Optimierungspotenziale
 - Bei Überbelastung:
 - Belastungsreduktion (Zulauffrachten)
 - Vergrößerung Faulraumvolumen
 - Evtl. Umrüstung zur thermophilen Betriebsweise
 - Evtl. Umrüstung zum Verfahren mit Schlammrückhalt (Grundlagen fehlen zur Zeit)
 - Bei Unterbelastung (Kapazitätsreserven):
 - Vergrößerung der Belastung durch Annahme (weiterer) Fremdschlämme
 - Übergang zur Co-Vergärung
 - Allgemein:
 - Vorbehandlung Eigen- und Fremdschlämme (im Projekt nicht betrachtet)
2. Für Faulungen, mit dynamischen Methoden/Modellen erfassbar (im Projekt nur angesprochen):
 - Wie Punkt 1, aber mit zusätzlichen Potenzialen bei nicht unterlasteten Anlagen (Belastungsausgleich usw.) -> Regelmöglichkeiten
3. Für Co-Vergärungen, mit den stationären Methoden/Werkzeugen der Empfehlung erfassbar:
 - Bei Optimalbelastung:
 - Evtl. Änderungen bei den Co-Substraten (Zusammensetzung, Anteile) -> Optimierungen Abbaubarkeit, Methan-/Gasproduktion, Gärrest, Hemmungen, Rücklaufbelastungen usw.
 - Bei Überbelastung:
 - Co-Substratmengen reduzieren, evtl. ganz weglassen
 - Ansonsten wie Punkt 1
 - Bei Unterbelastung (Kapazitätsreserven):
 - Annahme weiterer Co-Substrate resp. größerer Mengen
 - Evtl. Annahme (weiterer) Fremdschlämme
 - Allgemein:
 - Vorbehandlung Eigen- und Fremdschlämme (im Projekt nicht betrachtet)
4. Für Co-Vergärungen, mit dynamischen Methoden/Modellen erfassbar (im Projekt nur angesprochen):
 - Wie Punkt 3, aber mit zusätzlichen Potenzialen bei nicht unterlasteten Anlagen (Belastungsausgleich usw.) -> Regelmöglichkeiten

6.1.5 Gewässerschutz als Grundauftrag der Kläranlage

Der Gewässerschutz ist der Grundauftrag und das Hauptgeschäft der Kläranlage. Als Nebenstromverwertung und zum Energiegewinn aus Abwasser gehört die Faulung zweifellos dazu. Der Einsatz von Co-Substraten kann zum Ausschöpfen von Leistungsreserven sinnvoll sein und soll als Angebot im Bereich der Entsorgung von Industrieabfällen wertgeschätzt werden. Es sind aber zahlreiche Randbedingungen zu beachten. Mit Sicherheit muss die Co-Substratverwertung ein kostendeckendes Nebengeschäft des Betriebs bleiben. Es ist zu vermeiden, dass sie mit Abwassergebühren, welche naturgemäss dem Gewässerschutz zufallen müssen, quersubventioniert wird.

6.2 Ausblick

6.2.1 Kenngrößen HRT, SRT, RB und SB

Wir empfehlen weitere Abklärungen resp. Untersuchungen zur Bedeutung und Relevanz der Kenngrößen HRT, SRT, RB und SB, im Besonderen für Co-Vergärungen mit einem hohen Anteil an Co-Substratdosierung (im Vergleich zum Eigenschlamm und zu den Fremdschlämmen) und insbesondere für Anlagen mit

Schlamm-Wassertrennung im Auslauf, das heisst mit der Unterscheidungsmöglichkeit zwischen HRT und SRT (Kapitel 3.3 und Tabelle 3).

6.2.2 Datenanalytische Methoden und neuronale Netze

Wir verstehen die ersten Resultate gemäss Kapitel 6.1 («Highlights») als Motivation zu weiteren Untersuchungen unter Anwendung datenanalytischer Methoden und neuronaler Netze. Aufbauend auf der Hypothese im Kapitel 6.1 empfehlen wir weitere Studien zur Ermittlung der wesentlichen Einflussmöglichkeiten einer gezielteren und optimaleren Prozessführung im Bereich der Faulung und Co-Vergärung.

6.2.3 Dynamische (und statische) Modelle auf der Basis neuronaler Netze wie auch mit mechanistischen Modellen

Neben der beschriebenen Anwendung des Machine Learnings in der Datenanalytik bietet dieses sich natürlich auch zum Aufbau komplexer Modelle mit vielen Eingangs- und Ausgangs- (Ziel-)grössen an. Damit können, wie mit mechanistischen Modellen (z.B. Modelle der ADM1-Familie der IWA), ganze Faulungen und Co-Vergärungen modelliert werden. Dieses ermöglicht in der Folge die gezielte dynamische Prozessoptimierung, -steuerung und -regelung. Dabei haben neuronale Modelle gegenüber den mechanistischen eine Reihe von Vor- wie auch Nachteilen resp. die beiden Modellansätze eignen sich möglicherweise nicht für jedes reale System gleich gut. Hier besteht noch Forschungsbedarf. Sicher ist jedoch, dass solche Ansätze, welcher Art auch immer, hohe Anforderungen an die Qualität und insbesondere auch den Umfang der Mess- und Analysendaten stellen. Heutige Messkonzepte im Bereich der Faulung und Co-Vergärung können diesen Anforderungen in den meisten Fällen nicht genügen. In erster Linie ist die zeitliche Auflösung der Messdaten (Messhäufigkeiten) zu erhöhen, falls dynamische Aufgabenstellungen mit entsprechenden Modellen gelöst werden sollen. Dazu gehören auch weitergehende Prozessoptimierungen, Steuerungen und Regelungen. Zudem sind in diesen Fällen häufig weitere Messorte (erhöhte räumliche Auflösung) wie auch weitere Messgrössen (Prozessgrössen wie z.B. Wasserstoff usw.) vorzusehen. Auch in diesem Bereich empfehlen wir weitere Studien, wobei immer eine Nutzen-zu-Aufwand-Abschätzung integriert sein soll. Dies gilt sowohl für Studien wie auch für Umsetzungen.

Als Fortsetzung der statischen Betrachtungen der vorliegenden Empfehlung schlagen wir die weitere Untersuchung der Aufgabenstellung mit statisch eingesetzten mechanistischen Modellen (z.B. ADM1) wie auch statischen Machine Learning-Ansätzen vor. Jedes dynamische Modell kann auch statisch eingesetzt werden. Dabei vereinfachen sich viele Modellrechnungen und insbesondere ist die zeitliche Auflösung der Messdaten unkritischer. Die oben erwähnte Methode zur Messdatenanalyse mit Machine Learning würde dann mit Vorteil ebenfalls eingesetzt werden (sollte sich die entsprechende Eignung der Methode bestätigen). Andere datenanalytische Methoden, die im Rahmen dieser Empfehlung nicht weiter verfolgt werden konnten (z.B. multivariate Ansätze), könnten ebenso dazu kommen.

6.2.4 Praxistauglichkeit der Werkzeuge

Die Werkzeuge der Empfehlung wurden teilweise und dabei mit relativ wenigen realen ARA-Daten kalibriert resp. verifiziert. Weiter fehlen insbesondere die Rückmeldungen aus der Praxis zur AnwenderInnen-Freundlichkeit der Werkzeuge vollständig. Wir empfehlen unbedingt, die Werkzeuge im Rahmen von Fallbeispielen vor Ort auf Kläranlagen unterschiedlicher Grösse auszutesten. Dies soll durch den Betrieb selber und begleitet z.B. durch den VSA, Ingenieurbüros oder die ZHAW erfolgen. Dadurch soll die Praxistauglichkeit und BenutzerInnen-Freundlichkeit der Werkzeuge evaluiert werden. Weiter sollen damit die Rückmeldungen aus der Praxis gesammelt und zur Verbesserung resp. Weiterentwicklung der Werkzeuge eingesetzt werden.

6.2.5 Neuauflage der Empfehlung

Wie beispielsweise oben angedeutet verstehen wir die Empfehlung generell als dynamisch, das heisst, in permanenter Entwicklung stehend (Verbesserung, Anpassung, Optimierung). Aus unserer wie auch der Sicht des VSA sollte eine Neuauflage der Empfehlung in ca. fünf Jahren angestrebt werden.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- Allen E., Wall D.M., Herrmann C., Murphy J.D. (2016). A detailed assessment of resource of biomethane from first, second and third generation substrates. *Renew. Energy* 87, 656–665. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.060>.
- Fasel A. und Schiller A. (2019). Arbeitshilfe für die Annahme von Co-Substraten. ara region bern ag, Herrenschanen.
- Rosenwinkel K.-H., Kroiss H., Dichtl N., Seyfried C.-F., Weiland P. (2015). *Anaerobtechnik: Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung*. Springer-Verlag.
- VSA (2020). Analytikdaten in ARA. Empfehlung, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Glattbrugg 2020.
- VSA und BFE (2010). Energie in ARA. Empfehlung, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) und Bundesamt für Energie (BFE), Glattbrugg und Bern 2010.

Vernehmlassungsversion

ANHANG

A.1 Kenngrössenwerkzeug und Hemmungsbeurteilung (Excel-Werkzeuge) sowie Erläuterungen

Diese Werkzeuge und Anleitungen sind der Empfehlung separat beigelegt.

A.2 Tabellen und Abbildungen zum Messkonzept und zur einfachen Methodik der Prozessbeurteilung

Tabelle 1: Mess- und Analysengrössen gemäss Abbildung 3, mit empfohlenen Messfrequenzen. Abgeleitete (berechnete) Grössen sind ebenfalls aufgeführt. ((VSA, 2020), verändert)

Tabelle 2: Berechnungsformeln für die berechneten (abgeleiteten) Grössen der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ((VSA, 2020), verändert)

Tabelle 3: Aussagen und Folgerungen zu den Mess-, Analysen- sowie abgeleiteten Daten der Faulung und Co-Vergärung (Tabelle 1 und Tabelle 2). Die Aussagen beruhen auf den wichtigsten Zusammenhängen der Vergärung. Es bedeuten: W und -> = Wirkung, U = Ursache, pk = positiv korreliert (abhängiger Wert steigt bei steigendem Eingangswert), nk = negativ korreliert (abhängiger Wert sinkt bei steigendem Eingangswert).

Abbildung 6 Prozessschema der anaeroben Vergärung (Rosenwinkel et al., 2015) und Anaerobe Schwefelprozesse: Sulfatrespiration.

Tabelle 4: Mess- und Analysengrössen gemäss Abbildung 3, mit empfohlenen Messfrequenzen. Abgeleitete (berechnete) Grössen sind ebenfalls aufgeführt. ((VSA, 2020), verändert)

Messorte, Probenahmestellen	Mess-, Analysengrösse	Einheit	Art der Grösse (Kenngrössen rot markiert)	Mess-, Analysenfrequenz, Häufigkeit	Begründung Häufigkeit	Bemerkungen
Zulauf Schlammstapel, alle Eigenschlämme (SCS-01)	Q	l/s	Inlinemessung			
	TR	g/l oder %	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Mischprobe mitteln)	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	GR	g/l oder % des TR	Analog TR	Analog TR	Analog TR	
	GV	Analog GR	berechnet aus TR und GR	Analog TR	Analog TR	Berechnung Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. , [1]
	CSB	g/l	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Mischprobe mitteln)	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	Ntot	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	Ptot	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	Fe	mg/l	Laboranalytik	halbjährlich	Fe-Bilanz	
	Y _{CH4}	l _N /kg GV	Laboranalytik			Resp. Wert aus Literatur verwenden
	Mikrokunststoffe	mg/l	Laboranalytik	halbjährlich	Kontrolle, Abzug beim GV	
Zulauf Schlammstapel, Fremdschlamm (SCS-02)	Q	l/s	Inlinemessung			
	TR	g/l oder %	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Mischprobe mitteln)	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	GR	g/l oder % des TR	Analog TR	Analog TR	Analog TR	
	GV	Analog GR	berechnet aus TR und GR	Analog TR	Analog TR	Berechnung Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. , [1]

Messorte, Probenah- mestellen	Mess-, Analysengrösse	Einheit	Art der Grösse (Kenngrossen rot markiert)	Mess-, Analysenfrequenz, Häufigkeit	Begründung Häufigkeit	Bemerkungen
	CSB	g/l	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Misch- probe mitteln)	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	Ntot	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	Ptot	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	Fe	mg/l	Laboranalytik	halbjährlich	Fe-Bilanz	
	Y _{CH4}	l _N /kg GV	Laboranalytik			Resp. Wert aus Literatur ver- wenden
	Mikrokunststoffe	mg/l	Laboranalytik	halbjährlich	Kontrolle, Abzug beim GV	
Zulauf Schlammstapel, Co-Substrat 1 ... n (SCS-03)	Q	l/s	Inline-, evtl. Offlinemessung			oder direkt Fracht an Frisch- masse, TR oder GV
	TR	g/l oder %	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Misch- probe mitteln)	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	GR	g/l oder % des TR	Analog TR	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	GV	Analog GR	berechnet aus TR und GR	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate / Berechnung Fehler! Verweisquelle k onnte nicht gefunden wer- den., [1]
	CSB	g/l	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Misch- probe mitteln)	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	Ntot	mg/l	Laboranalytik	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	Ptot	mg/l	Laboranalytik	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	Stot	mg/l	Laboranalytik	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate

Messorte, Probenah- mestellen	Mess-, Analysengrösse	Einheit	Art der Grösse (Kenngrossen rot markiert)	Mess-, Analysenfrequenz, Häufigkeit	Begründung Häufigkeit	Bemerkungen
	NO3	mg/l	Laboranalytik	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	NO2	mg/l	Laboranalytik	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	SO4	mg/l	Laboranalytik	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	Fe	mg/l	Laboranalytik	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	Fe(IV)	mg/l	Laboranalytik	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	Y _{CH4}	l _N /kg GV	Laboranalytik	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	pH		Labormessung	Variabel	Co-Substrat- resp. Produktion Co-Substrat-abhängig	Nachweis durch Lieferfirmen Co-Substrate
	Mikrokunststoffe	mg/l	Laboranalytik	halbjährlich	Kontrolle, Abzug beim GV	
Auslauf Schlammstapel (SCS-04)	Q	l/s	Inlinemessung			
	TR	g/l oder %	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Misch- probe mitteln)	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	GR	g/l oder % des TR	Analog TR	Analog TR	Analog TR	
	GV	Analog GR	berechnet aus TR und GR	Analog TR	Analog TR	Berechnung Fehler! Verweis- quelle konnte nicht gefun- den werden. , [1]
	CSB	g/l	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Misch- probe mitteln)	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	N _{tot}	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	P _{tot}	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	NO3	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	

Messorte, Probenah- mestellen	Mess-, Analysengrösse	Einheit	Art der Grösse (Kenngrossen rot markiert)	Mess-, Analysenf- requenz, Häufigkeit	Begründung Häufigkeit	Bemerkungen
	NO ₂	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	SO ₄	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	Fe(IV)	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	Y _{CH₄}	l _N /kg GV	Laboranalytik	jährlich	Kontrolle Bilanz Schlammsta- pel, Verlust Schlammstapel	
	Mikrokunststoffe	mg/l	Laboranalytik	halbjährlich	Kontrolle, Abzug beim GV	
Zulauf Faulraum, Co- Substrat 1 ... n (FAU-01)						Analog Zulauf Schlammsta- pel, Co-Substrat 1 ... n (SCS-03)
Faulraum (FAU-02)	pH		Inline-Messung			
	T	°C	Inline-Messung			
Auslauf Faulraum (FAU-03)	TR	g/l oder %	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Misch- probe mitteln)	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	GR	g/l oder % des TR	Analog TR	Analog TR	Analog TR	
	GV	Analog GR	berechnet aus TR und GR	Analog TR	Analog TR	Berechnung Fehler! Verweis- quelle konnte nicht gefun- den werden. , [1]
	CSB	g/l	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Misch- probe mitteln)	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	Essigsäure (HAc)	g/l	Laboranalytik Kenngrosse	Halbjährlich und bei Betriebsproblemen	Zeigt Probleme in der anae- roben Prozesskette	
	Org. Säuren (Summe Essig- säure + Propionsäure + But- tersäure+ Iso-Buttersäure + Valeriansäure + Iso-Valeri- ansäure)	g/l	Laboranalytik Kenngrosse	Halbjährlich und bei Betriebsproblemen	Zeigt Probleme in der anae- roben Prozesskette	
	H ₂	mg/l	Inline-Messung, Kenngrosse			

Messorte, Probenah- mestellen	Mess-, Analysengrösse	Einheit	Art der Grösse (Kenngrössen rot markiert)	Mess-, Analysenfrequenz, Häufigkeit	Begründung Häufigkeit	Bemerkungen
	Alkalinität (Puffervermögen)	meq/l	Laboranalytik	Halbjährlich und bei pH-Abfall		
	Y _{CH4}	l _N /kg GV	Laboranalytik	halbjährlich	Abbaubarkeit, Prozesskontrolle Faulraum	
Stapel/Eindicker (STE-01)	pH		Inline-Messung			
	T	°C	Inline-Messung			
Stapel/Eindicker, Auslauf Schlamm (STE-02)	Q	l/s	Inlinemessung			
	TR	g/l oder %	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Mischprobe mitteln)	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	GR	g/l oder % des TR	Analog TR	Analog TR	Analog TR	
	GV	Analog GR	berechnet aus TR und GR	Analog TR	Analog TR	Berechnung Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. , [1]
	CSB	g/l	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Mischprobe mitteln)	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	Essigsäure (HAc)	g/l	Laboranalytik Kenngrösse	Halbjährlich und bei Betriebsproblemen	Zeigt Probleme in der anaeroben Prozesskette	
	Org. Säuren (Σ Essigsäure + Propionsäure + Buttersäure + Iso-Buttersäure + Valeriansäure + Iso-Valeriansäure)	g/l	Laboranalytik Kenngrösse	Halbjährlich und bei Betriebsproblemen	Zeigt Probleme in der anaeroben Prozesskette	
	H ₂	mg/l	Inline-Messung, Kenngrösse			
	Alkalinität (Puffervermögen)	meq/l	Laboranalytik	Halbjährlich und bei pH-Abfall		
	Y _{CH4}	l _N /kg GV	Laboranalytik	halbjährlich	Abbaubarkeit, Prozesskontrolle Stapel/Eindicker	
Stapel/Eindicker, Auslauf Faulwasser						

Messorte, Probenah- mestellen	Mess-, Analysengrösse	Einheit	Art der Grösse (Kenngrossen rot markiert)	Mess-, Analysenfrequenz, Häufigkeit	Begründung Häufigkeit	Bemerkungen
(STE-03)						
Gas (FAU-04 und STE-04)	Q	l/s	Inlinemessung (mit Berechnung)			Gas getrocknet, Kondensat direkt in Faulraum und Sta- pel zurückgeführt. In l _N /s: Berechnung Fehler! V erweisquelle konnte nicht gefunden werden. , [2]
	CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S	%	Inline-Messung			
	H ₂	%	Inline-Messung, Kenngrosse			
Schlammmentwässerung, Zulauf Flockungshilfs- mittel (SCE-01)	Q_Flockungshilfsmittel	l/s	Inline-Messung			
Schlammmentwässerung, Abgabe Muldenstation (SCE-02)	Q	l/s	Inlinemessung			
	TR	g/l oder %	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Misch- probe mitteln)	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	GR	g/l oder % des TR	Analog TR	Analog TR	Analog TR	
	GV	Analog GR	berechnet aus TR und GR	Analog TR	Analog TR	Berechnung Fehler! Verweis- quelle konnte nicht gefun- den werden. , [1]
	CSB	g/l	Laboranalytik (Stichprobe, evtl. mehrere zu Misch- probe mitteln)	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	N _{tot}	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	P _{tot}	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	Stot	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wö- chentlich	Dynamik der Schlammzusam- mensetzungen	
	Fe	Mg/l	Laboranalytik	halbjährlich	Fe-Bilanz	

Messorte, Probenahmestellen	Mess-, Analysengrösse	Einheit	Art der Grösse (Kenngrössen rot markiert)	Mess-, Analysenfrequenz, Häufigkeit	Begründung Häufigkeit	Bemerkungen
	Y _{CH4}	l _N /kg GV	Laboranalytik Kenngrösse	halbjährlich	Veränderungen, Restgaspotenzial	
Schlammmentwässerung, Auslauf Faulwasser (SCE-03)						
Zulauf Faulwasserbehandlung (FAB-01)	Q	l/s	Inlinemessung			
	GUS	mg/l	Laboranalytik	monatlich	Leistung Schlammmentwässerungs prüfen	
	N _{tot}	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	P _{tot}	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	NH ₄	mg/l	Laboranalytik	Halbwöchentlich - wöchentlich	Dynamik der Schlammzusammensetzungen	
	Mikrokunststoffe	mg/l	Laboranalytik	halbjährlich	Kontrolle, Belastung Faulwasserbehandlung und Abwasserstrasse	
	Fe	mg/l	Laboranalytik	halbjährlich	Fe-Bilanz	
Mehrere/Alle Messorte, Probenahmestellen (AMO)	Frachten alle Grössen (= Mengen = Massen/Zeit) F_Grösse	kg/d	berechnet			Berechnung Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. , [3]
	Organische Faulraumbelastung RB	kgGV/m ³ /d	berechnet, Kenngrösse			GV = oTS / Berechnung Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. , [4]
	Organische Schlammbelastung SB	kgGV/kg_TR_Schlamm/d	berechnet, Kenngrösse			Berechnung Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. , [5]
	Gasproduktion Q_Gas	l _N /s, m ³ _N /a	berechnet			Gas getrocknet. Berechnung Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. , [6]

Messorte, Probenah- mestellen	Mess-, Analysengrösse	Einheit	Art der Grösse (Kenngrößen rot markiert)	Mess-, Analysenfrequenz, Häufigkeit	Begründung Häufigkeit	Bemerkungen
	Spezifische Gasproduktion Q_Gas_spez	l _N /kgGV	berechnet, Kenngrösse, falls anlagen- bezogen			Berechnung Fehler! Verweis- quelle konnte nicht gefun- den werden., [7]
	Methanproduktion Q_CH4	l _N /s, m ³ _N /a	berechnet			Berechnung Fehler! Verweis- quelle konnte nicht gefun- den werden., [8]
	Spezifische Methanproduk- tion Q_CH4_spez	l _N /kgGV	berechnet, Kenngrösse, falls anlagen- bezogen			Berechnung Fehler! Verweis- quelle konnte nicht gefun- den werden., [9]
	Y _{CH4s}	l _N /kgGV	berechnet, Kenngrösse, falls auf den Auslauf bezogen			Laborbestimmung, standardi- sierte Bedingungen. Berech- nung Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden wer- den., [10]
	GV-Abbau (oTS-Abbau)	%	berechnet, Kenngrösse, falls anlagen- bezogen			Berechnung Fehler! Verweis- quelle konnte nicht gefun- den werden., [11]
	Hydraulische Aufenthalts- zeit HRT (t_hydr)	d	berechnet, Kenngrösse			Berechnung Fehler! Verweis- quelle konnte nicht gefun- den werden., [12]
	Schlammaufenthaltszeit SRT	d	berechnet, Kenngrösse			Berechnung Fehler! Verweis- quelle konnte nicht gefun- den werden., [13]

Tabelle 5: Berechnungsformeln für die berechneten (abgeleiteten) Grössen der Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ((VSA, 2020), verändert)

Nummer	Berechnete (abgeleitete) Grösse (Kenngrössen rot markiert)	Berechnungsformel
[1]	GV	$GV = TR - GR$
[2]	Q	In l_N/s umrechnen (1bar, 273.15 K): $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$
[3]	Frachten alle Grössen (F_Grösse)	$F_Grösse = Q \cdot c_Grösse$
[4]	Organische Faulraumbelastung (RB), Kenngrösse	$RB = F_GV_Zulauf_Faulraum / V_Faulraum$
[5]	Organische Schlammbelastung (SB), Kenngrösse	$SB = F_GV_Zulauf_Faulraum / TR_Schlamm_Faulraum$
[6]	Gasproduktion (Q_Gas)	Aus gemessenem Betriebs-Q umgerechnet auf 1bar, 273.15 K, mit $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$
[7]	Spezifische Gasproduktion Q_Gas_spez, Kenngrösse, falls anlagenbezogen (siehe Formel)	$Q_Gas_spez = Q_Gas / F_GV_Zulauf_Faulraum$
[8]	Methanproduktion (Q_CH4)	$Q_CH4 = Q_Gas \cdot c_CH4$
[9]	Spezifische Methanproduktion (Q_CH4_spez), Kenngrösse, falls anlagenbezogen (siehe Formel)	$Q_CH4_spez = Q_Gas_spez \cdot c_CH4$
[10]	Y_{CH4} , Kenngrösse, falls auf den Auslauf bezogen	$Y_{CH4} = V_Gas \cdot c_CH4 / m_GV_eingesetzt$
[11]	GV-Abbau (oTS-Abbau) [%], Kenngrösse	$\rho = (F_GV_Zulauf_Faulraum - F_GV_Auslauf_Faulraum) / F_GV_Zulauf_Faulraum$
[12]	Hydraulische Aufenthaltszeit (HRT = t_{hydr}), Kenngrösse	$HRT = V_Faulraum / Q_Zulauf_Faulraum$
[13]	Schlammaufenthaltszeit (SRT), Kenngrösse	$SRT = TR_Schlamm_Faulraum / F_TR_Schlamm_Faulraum$

Tabelle 6: Aussagen und Folgerungen zu den Mess-, Analysen- sowie abgeleiteten Daten der Faulung und Co-Vergärung (Tabelle 1 und Tabelle 2). Die Aussagen beruhen auf den wichtigsten Zusammenhängen der Vergärung. Es bedeuten: W und -> = Wirkung, U = Ursache, pk = positiv korreliert (abhängiger Wert steigt bei steigendem Eingangswert), nk = negativ korreliert (abhängiger Wert sinkt bei steigendem Eingangswert).

Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysen-grösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
Zulauf Schlammstapel, alle Eigenschlämme (SCS-01)	Q	W: zusammen mit Konzentration: Fracht, Belastung (pk) W: HRT (nk)				
	TR	W: zusammen mit Q: Fracht als Masse, Belastung (pk), teilweise biol. Abbaubar, teilweise Nährstoffe				
	GR	W: zusammen mit Q: anorganische Fracht, Belastung (pk), teilweise Nährstoffe				
	GV	W: zusammen mit Q: organische Fracht, Belastung (pk), teilweise biol. abbaubar				
	CSB	W: zusammen mit Q: CSB-Fracht, Belastung (pk), teilweise biol. abbaubar				
	Ntot	W: zusammen mit Q: Ntot-Fracht, Belastung (pk), Nährstoffe hydrolysiert zu NH ₃ /NH ₄				
	Ptot	W: zusammen mit Q: Ptot-Fracht, Belastung (pk), Nährstoffe hydrolysiert teilweise zu PO ₄				P im Fällschlamm hydrolysiert nicht
	Stot	W: zusammen mit Q: Stot-Fracht, Belastung (pk), Nährstoffe hydrolysiert zu HS ⁻				
	Fe	Nährstoffe für Massenbilanzen (Kontrolle Messgeräte)				
	Y _{CH₄}	CH ₄ -Produktion und GV-Abbau im Labor (pk mit Y _{CH₄})				
	Mikrokunststoffe	W: Erhöhen Mikrokunststoffe im Auslauf (pk) inert, vom GV zu subtrahieren				

Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysengrösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
Zulauf Schlammstapel, Fremdschlamm (SCS-02)	Q, TR, GR, GV, CSB, Ntot, Ptot, Stot, Fe, Y _{CH4} , Mikrokunststoffe	analog alle Eigenschlämme				
Zulauf Schlammstapel, Co-Substrat 1 ... n (SCS-03)	Q, TR, GR, GV, CSB	analog alle Eigenschlämme				
	Ntot	analog alle Eigenschlämme hohe Werte -> hohes NH4 im Zulauf Faulwasserbehandlung				
	Ptot	analog alle Eigenschlämme hohe Werte -> hohes PO4 in Muldenstation, evtl. auch im Zulauf Faulwasserbehandlung				
	Stot	analog alle Eigenschlämme hohe Werte -> hohes H2S im Gas -> Korrosionsprobleme				
	NO3	W: zusammen mit Q: NO3-Fracht, Belastung (pk), W: Denitrifikation zu N2 -> Verbrauch abbaubarer GV, Erhöhung CO2-Fracht im Gas				
	NO2	W: zusammen mit Q: NO2-Fracht, Belastung (pk) W: Toxizität auf Biogasorganismen (bei hohen Konzentrationen)				
	SO4	W: zusammen mit Q: SO4-Fracht, Belastung (pk) W: Sulfatreduktion zu HS ⁻ -> H2S -> Verbrauch abbaubarer GV und Korrosionsprobleme, Erhöhung CO2-Fracht im Gas				
	Fe	analog alle Eigenschlämme				
	Fe(IV)	W: zusammen mit Q: Fe(IV)-Fracht, Belastung (pk)				

Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysengrösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
		W: Fe(IV)-Reduktion zu Fe(III) -> Verbrauch abbaubarer GV, Erhöhung CO ₂ -Fracht im Gas				
	Y _{CH₄}	analog alle Eigenschlämme				
	pH	verbraucht Pufferkapazität (bei hohem Q evtl. relevant)				
	Mikrokunststoffe	analog alle Eigenschlämme				
Auslauf Schlammstapel (SCS-04)	Q, TR, GR, GV, CSB, Ntot, Ptot, Stot, NO ₃ , NO ₂ , SO ₄ , Fe(IV), Y _{CH₄} , Mikrokunststoffe	analog Co-Substrate Massenbilanzen für Kontrollen, evtl. Abbau im Schlammstapel				
Zulauf Faulraum, Co-Substrat 1 ... n (FAU-01)						Analog Zulauf Schlammstapel, Co-Substrat 1 ... n (SCS-03)
Faulraum (FAU-02)	pH*	W: tiefer Wert hemmt ... blockiert Prozesse der anaeroben Prozesskette	6 - 8		Leistungsreduktion bis Komplettblockade der anaeroben Prozesskette	
	T	W: Alle Bioprozesse sind temperaturabhängig	35 – 40°C: Mesophiler Betriebsbereich 40 – 60°C: Thermophiler Betriebsbereich	W: Enzymdenaturierung -> Ausfall der Enzymfunktionen der Prozesse -> Ausfall von GV-Abbau und Gasproduktion	Reduktion der Stoffumsatzgeschwindigkeiten -> Reduktion des GV-Abbaugrades und der Gasproduktion	
Auslauf Faulraum (FAU-03)	TR	Erfassung Abbauprozesse im Faulraum				nicht notwendig, falls Faulraum nur zusammen mit dem Schlammstapel/Eindicker erfasst werden soll
	GR	zur Bestimmung GV (Zelle unten)				analog Zelle oben
	GV, CSB	Erfassung Abbauprozesse im Faulraum				analog Zelle oben

Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysengrösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
	Essigsäure (HAc)	Wichtiges Zwischenprodukt des anaeroben Abbaus, Produkt der Acetogenese, direktes Substrat der Methanproduktion (Methanogenese) zeigt Prozessgleichgewicht der Biogasprozesse	0 - 3000 mg/l für ausgewogenes Prozessgleichgewicht Biogasprozesse	Methanproduktion (Methanogenese) ungenügend	- Hydrolyse ungenügend - Acidogenese ungenügend	Ibu (2021) Kenngrösse
	Org Säuren (Summe Essigsäure + Propionsäure + Buttersäure + Iso-Buttersäure + Valeriansäure + Iso-Valeriansäure)	Wichtige Zwischenprodukte des anaeroben Abbaus, zeigen Prozessgleichgewicht der Biogasprozesse	Org. Säuren (Summe) 3850 mg/l Essigsäure 3000 mg/l Propionsäure 700 mg/l Buttersäure 20 mg/l Iso-Buttersäure 10 mg/l Valeriansäure 100 mg/l Iso-Valeriansäure 20 mg/l für ausgewogenes Prozessgleichgewicht Biogasprozesse	- Methanproduktion (Methanogenese) ungenügend - Evtl. Essigsäureproduktion ungenügend (andere Säuren zu hoch) - bei zu kleiner Pufferkapazität pH-Abfall -> Komplettblockade der Folgeprozesse	- Hydrolyse ungenügend - Acidogenese ungenügend	Ibu (2021) Kenngrösse
	H ₂	Wichtiges Zwischenprodukt des anaeroben Abbaus, direktes Substrat der Methanproduktion (Methanogenese), zeigt Prozessgleichgewicht der Vergärung/Biogasprozesse	Partialdruck p _{H₂} < 10 ⁻⁴ bar für ausgewogenes Prozessgleichgewicht der Vergärung/Biogasprozesse	Methanproduktion (Methanogenese) ungenügend, toxische Wirkung auf H ₂ -Produktion	H ₂ -Produktion ungenügend -> Methanproduktion (Methanogenese) ungenügend	Rosenwinkel et al. (2015) Kenngrösse
	Alkalinität (Puffervermögen)	W: Verhindert pH-Abfall bei Freisetzung org. Säuren (Acido- und Acetogenese) -> Vermeiden von Leistungsreduktion bis Komplettblockade der anaeroben Prozesskette Quotient Org. Säuren/Alkalinität sollte ... bis ... betragen (FOS/TAC-Wert)				
	Y _{CH₄}	Verminderung der spezifischen Labor-CH ₄ -Produktionskapazität über den Faulraum				nicht notwendig, falls Faulraum nur zusammen mit dem Schlammbett Stapel/Eindicker erfasst werden soll
Stapel/Eindicker	pH*	analog Faulraum	analog Faulraum	analog Faulraum	analog Faulraum	

Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysengrösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
(STE-01)						
	T	analog Faulraum	analog Faulraum	analog Faulraum	analog Faulraum	
Stapel/Eindicker, Auslauf Schlamm (STE-02)	Q, TR, GR, GV, CSB	ist kleiner als Q im Zulauf zum Faulraum (infolge Trübwasserabzug)				
	Essigsäure (HAc)	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	Kenngrösse
	Org Säuren (Summe Essigsäure + Propionsäure + Buttersäure + Iso-Buttersäure + Valeriansäure + Iso-Valeriansäure)	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	Kenngrösse
	H2	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	Kenngrösse
	Alkalinität (Puffervermögen)	analog Auslauf Faulraum				
	Y _{CH4}	analog Auslauf Faulraum				
Stapel/Eindicker, Auslauf Faulwasser (STE-03)						
Gas (FAU-04 und STE-04)	Q	W: zusammen mit Konzentration: Fracht, (pk)				muss bei separater Erfassung von Faulraum- und Stapel/Eindicker-Processen separat gemessen werden
	CH4	W: zusammen mit Q: CH4-Fracht (pk) CH4-Fracht: zu maximierende Zielgrösse bezüglich Energiegewinn				analog Zelle oben

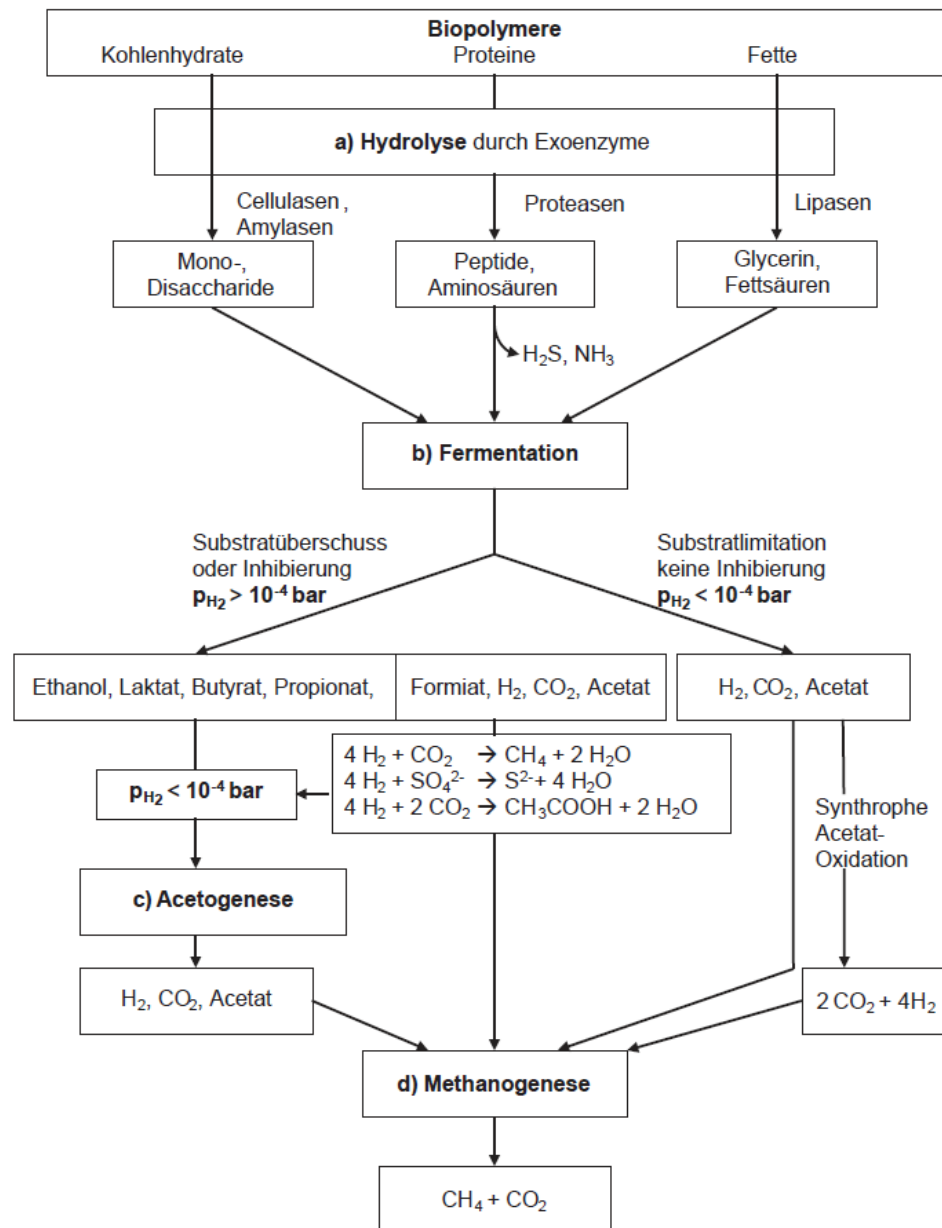
Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysengrösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
		Anwendung auch als stoffliche Ressource				
	CO2	W: zusammen mit Q: CO2-Fracht (pk) W: Verkleinert Brennwert des Biogases W: Abtrennungsaufwand bei Gasaufbereitung kann zur (Bio-)Methanisierung von H2 verwendet werden				analog Zelle oben
	CH4/CO2	Gaszusammensetzung bezüglich CH4 und CO2 U: mittlere Oxidationszahl von C in den Substraten (nk) andere Ursachen	aus energetischen Gründen je grösser desto besser			analog Zelle oben Fette haben tiefe C-Oxidationszahlen Kenngrösse
	NH3	W: zusammen mit Q: NH3-Fracht (pk) W: als NH4-Konzentration in Flüssigphase toxisch auf die Gärprozesse				muss bei separater Erfassung von Faulraum- und Stapel/Eindicker- Prozessen separat gemessen werden
	H2S	W: zusammen mit Q: H2S-Fracht (pk) W: Korrosionsprobleme W: als HS-Konzentration in Flüssigphase toxisch auf die Gärprozesse				analog Zelle oben
	H2	analog Auslauf Faulraum	0.05 – 0.5 mg/l in Flüssigphase, mittels Henry-Gesetz in Gas (%) umgerechnet, für ausgewogenes Prozessgleichgewicht der Vergärung/Biogasprozesse	analog Auslauf Faulraum	analog Auslauf Faulraum	muss für Faulraum und Stapel/Eindicker separat gemessen werden Kenngrösse
Schlammmentwässerung, Zulauf Flockungshilfsmittel (SCE-01)	Q_Flockungshilfsmittel	verbessert die Entwässerbarkeit des Schlammes				

Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysengrösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
Schlammmentwässerung, Abgabe Muldenstation (SCE-02)	Q	abgegebene volumetrische Schlammmenge (ausgefaulter Schlamm) W: Transportaufwand, Aufwand zur Trocknung zu minimierende Zielgrösse bezüglich Schlammabgabe				
	TR	W: zusammen mit Q: Fracht als Masse (pk) W: Transportaufwand, Verwertungsaufwand zu minimierende Zielgrösse bezüglich Schlammabgabe				
	GR	W: zusammen mit Q: GR-Fracht (pk) W: Transportaufwand, Verwertungsaufwand zu minimierende Zielgrösse bezüglich Schlammabgabe				
	GV	analog Zelle oben, für GV				erhöht zwar den Brennwert
	CSB	analog Zelle oben, für CSB				analog Zelle oben
	Ntot	W: zusammen mit Q: Ntot-Fracht (pk)				
	Ptot	W: zusammen mit Q: Ptot-Fracht (pk) W: Transportaufwand, Verwertungsaufwand P-Rückgewinnung zu maximierende Zielgrösse bezüglich P-Rückgewinnung				
	Stot	W: zusammen mit Q: Stot-Fracht (pk)				
	Fe	für Massenbilanzen (Kontrolle Messgeräte)				
	Y _{CH4}	Laborgrösse für Aktivität Abgabschlamm, Restgaspotenzial, zeigt optimalen Betrieb der gesamten Biogas-Prozesskaskade	0 – 50 l/kg oTS: für Minimierung Aktivität Abgabschlamm, Restgaspotenzial	Lagerprobleme, Geruchsprobleme, Umweltbelastung, Gesundheit, Sicherheit		Kenngrösse

Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysengrösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
			bei optimal funktionierender Biogas-Produktionskaskade	mindestens ein Prozess der Prozesskette funktioniert nicht optimal schlecht/langsam abbaubares Co-Substrat Anlagenüberlastung, RB zu gross, SB zu gross		
Schlammmentwässerung, Auslauf Faulwasser (SCE-03)						
Zulauf Faulwasserbehandlung (FAB-01)	Q	W: zusammen mit Konzentration: Fracht, Belastung (pk)				
	GUS	W: zusammen mit Q: Fracht als Masse, Belastung (pk)				
	Ntot	W: zusammen mit Q: Ntot-Fracht, Belastung (pk)				
	Ptot	analog Zelle oben, für Ptot				
	NH4	analog Zelle oben, für NH4				
	Mikrokunststoffe	analog Zelle oben, für Mikrokunststoffe sind inert				
	Fe	für Massenbilanzen (Kontrolle Messgeräte)				
Mehrere/Alle Messorte, Probenahmestellen (AMO)	Frachten alle Grössen (= Mengen = Massen/Zeit) F_Grösse	W: Belastungen (pk) absolute Abbauleistungen (pk) absolute Gasproduktionen (pk) absolute Abgabemengen (pk)				
	Organische Faulraumbelastung RB	Evtl. W: spez. Abbaugrade (nk) Evtl. spez. Gasproduktionen (nk) Evtl. Restmethanpotenzial (pk) --> von Prozesskinetik abhängig	optimaler Kompromiss mit Reaktorvolumen (-> Kosten) bei RB = 2.0 – 5.0 kg GV/(d*m3) --> von Prozesskinetik abhängig	Evtl. ungenügende spez. Abbaugrade und Gasproduktionen	Evtl. höhere spez. Abbaugrade und Gasproduktionen, aber in der Regel nicht wirtschaftlich (grosse Reaktorvolumina)	Zahlen Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. und

Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysengrösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
		Bei hoher Co-Substratdosierung möglicherweise wesentlich von der reinen Faulung abweichend! (gilt auch für die Aussagen aller Kolonnen rechts!)		--> von Prozesskinetik abhängig	--> von Prozesskinetik abhängig	Rosenwinkel et al. (2015) Kenngrösse
	Organische Schlammbelastung SB	W: spez. Abbaugrade (nk) Spez. Gasproduktionen (nk) Restmethanpotenzial (pk)	SB in der Praxis zur Zeit noch nicht verbreitet: Noch keine Optimalwerte verfügbar	ungenügende spez. Abbaugrade und Gasproduktionen	höhere spez. Abbaugrade und Gasproduktionen (höhere «Reserven» an aktiver Biomasse)	Allenfalls ausschliesslich dynamisch beim/nach Anstieg der Belastung (GV-Frachten), abhängig von Verfahrenstechnik Kenngrösse
	Gasproduktion Q_Gas	auf Normalbedingungen umgerechnete Gasproduktion				Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [2]
	Spezifische Gasproduktion Q_Gas_spez	Gasproduktion/GV-Fracht U: RB (nk), SB (nk), HRT (pk), SRT (pk), Hemmungen /Toxizitäten (nk)	$\eta^* Y_{CH_4} / c_{CH_4}$ im Gas η = Übergangsfaktor Labor nach Realität unter Optimalbedingungen = 0.9	ausserordentlich günstige Prozessbedingungen Mess-/Analysenfehler	RB, SB zu gross HRT, SRT zu klein Hemmungen /Toxizitäten	η siehe Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Kenngrösse, falls anlagenbezogen
	Methanproduktion Q_CH4	analog Gasproduktion, aber mit Faktor c_CH4 im Gas	Q_Gas * c_CH4 im Gas			
	Spezifische Methanproduktion Q_CH4_spez	analog spezifische Gasproduktion, aber mit Faktor c_CH4 im Gas U: analog spezifische Gasproduktion	$\eta^* Y_{CH_4}$ η = Übergangsfaktor Labor nach Realität unter Optimalbedingungen = 0.9	ausserordentlich günstige Prozessbedingungen Mess-/Analysenfehler	RB, SB zu gross HRT, SRT zu klein Hemmungen /Toxizitäten	η siehe Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Kenngrösse, falls anlagenbezogen
	GV-Abbau (oTS-Abbau) [%]	U: RB (nk), SB (nk), HRT (pk), SRT (pk), Hemmungen /Toxizitäten (nk)	40 – 60% für Faulung Abhängig von Co-Substraten bei Co-Vergärung	Faulung: ausserordentlich günstige Prozessbedingungen	Faulung: RB, SB zu gross HRT, SRT zu klein Hemmungen /Toxizitäten	Kenngrösse, falls anlagenbezogen

Messort, Probenahmestelle	Mess-, Analysengrösse, abgeleitete Grösse	Bedeutung - Grösse ist Folge von U - Grösse bewirkt W oder Grösse -> W - weitere Bedeutungen	Optimaler Wert resp. Wertebereich in Bezug auf das angegebene Kriterium (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls grösser (nur für Kenngrössen)	Bedeutung, Folgerung, falls kleiner (nur für Kenngrössen)	Bemerkungen
				Mess-/Analysefehler Zusätzlich bei Co-Vergärung: Abhängig von Co-Substraten	Zusätzlich bei Co-Vergärung: Abhängig von Co-Substraten	
	HRT	Kontaktzeit für Prozesse (pk) RB, falls Zulaufkonzentrationen unverändert (nk)	13 – 25 d (< SRT nur möglich mit Schlammabtrennung und Rückhalt/Rückführung)	Anlage unterlastet, Bauvolumen zu gross, sehr guter Abbau und Gasproduktion	evtl. RB zu hoch (siehe Kolonne «Bedeutung»), Anlage evtl. überlastet, evtl. schlechter Abbau, evtl. kleine Gasproduktion --> von Prozesskinetik abhängig Bei hoher Co-Substratdosierung möglicherweise wesentlich von der reinen Faulung abweichend!	Zahlen für 76 – 100% Abbaugrad des abbaubaren Schlammanteils (Allen et al., 2016) Faulraum und Schlammbett Stapel/Eindicker zusammen Kenngrösse
	SRT	Wachstum aktive Biomasse, Vermehrung Organismen(gruppen)	15 – 30 d (> HRT nur möglich mit Schlammabtrennung und Rückhalt/Rückführung)	Guter Abbau (und hohe Gasproduktion) auch schlecht/langsam abbaubarer Substrate (Co-Substrate) (Wachstum Abbauspezialisten)	Verminderung bis Totalverlust Abbauleistung und Gasproduktion infolge Auswaschens der aktiven Biomasse	> 12 d (Rosenwinkel et al., 2015) Faulraum und Schlammbett Stapel/Eindicker zusammen Kenngrösse



Sulfate respiration:

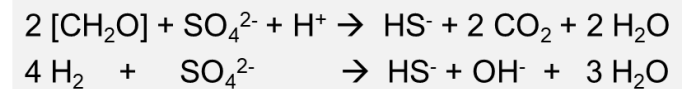


Abbildung 6 Links: Prozessschema der anaeroben Vergärung (Rosenwinkel et al., 2015). Rechts: Anaerobe Schwefelprozesse: Sulfatrespiration.

Vernehmlassungsversion



Verband Schweizer Abwasser-
Und Gewässerschutzfachleute (VSA)
Europastrasse 3
Postfach, 8152 Glattbrugg
sekretariat@vsa.ch
www.vsa.ch
Tel. 043 343 70 70