

TEXTE

149/2022

Bestimmung der biogenen Kohlenstoffgehalte von Klärschlamm und Faulgas und Untersuchung von Abhängigkeiten zu Kläranlagen-Basisdaten, Abwasserwerten und Klärschlammzusammensetzung

von: Gesine D. Lorenz, Susanne Voerkelius, Stephan Huxol
Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 149/2022

Projektnummer 59766

FB000928

Bestimmung der biogenen Kohlenstoffgehalte von Klärschlamm und Faulgas und Untersuchung von Abhängigkeiten zu Kläranlagen-Basisdaten, Abwasserwerten und Klärschlammzusammensetzung

von

Gesine D. Lorenz, Susanne Voerkelius, Stephan Huxol
Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Hydroisotop GmbH
Woelckestraße 9
85301 Schweitenkirchen

Abschlussdatum:

Oktober 2016

Redaktion:

Fachgebiet V 3.2 Chemische Industrie und industrielle Feuerungsanlagen
Hans J. Garvens

Publikationen als pdf:

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Bestimmung der biogenen Kohlenstoffgehalte von Klärschlamm und Faulgas und Untersuchung von Abhängigkeiten zu Kläranlagen-Basisdaten, Abwasserwerten und Klärschlammzusammensetzung

Die Studie untersucht anhand einer begrenzten Anzahl an Proben von Klärschlamm (20) und Faulgas (14) aus kommunalen Kläranlagen die Verteilung von biogenem und fossilem Kohlenstoff und mögliche Abhängigkeiten von Basisdaten der Kläranlagen.

Die Bestimmung des biogenen Kohlenstoffanteils der Klärschlämme und Faulgase erfolgt nach Verbrennung zu CO₂ über die Bestimmung der Kohlenstoff-14(¹⁴C)-Gehalte mit Flüssigszintillationsspektrometrie. Bei den Faulgasen wurde bereits vorhandenes CO₂ mit in die Messung einbezogen, da auch dieses aus dem Abbau der organischen Fracht der Abwässer stammt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass Klärschlämme aus kommunalen Anlagen mit untergeordneten gewerblichen Abwässern (<45 %, berechnet als mittlere Auslastung der Einwohnerwerte abzüglich der angeschlossenen Einwohnerzahl) ca. 80 % biogene Kohlenstoffanteile und Faulgase ca. 85 % biogene Kohlenstoffanteile aufweisen. Der fossile Kohlenstoff ist hierbei wahrscheinlich auf schwer abbau-bare synthetische Produkte bzw. fossile Rohstoffe zurückzuführen. Kommunale Abwässer mit hohem gewerblichen Anteil (≥ 45 %) können wesentlich geringere Anteile an biogenem Kohlenstoff aufweisen. Bestimmt wurden Anteile von ca. 28 bis 71 % im Klärschlamm und ca. 11 bis 88 % im Faulgas.

Numerische Abhängigkeiten zwischen Parametern des Abwassers, der Klärschlämme, der Kanalisation, oder der Größe und Verfahren der Kläranlagen und dem Anteil an biogenem Kohlenstoff konnten nicht identifiziert werden. Charakterisierungen der Klärschlämme eines Klärwerks für den biogenen Kohlenstoffanteil anhand vorhandener Daten der Kläranlagen sind nur als grobe Unterteilung hinsichtlich starker Indirekteinleitungen (≥45 %) insbesondere aus Industrien der Gebiete Chemie, fossile Energieträger u.Ä. sowie untergeordneter Indirekteinleitungen der genannten Industrien möglich.

Initiierung und Auftrag der Studie erfolgte durch das Umweltbundesamt Berlin (Deutsche Emissionshandelsstelle).

Abstract: Biogenic and fossil carbon in sewage sludge and digester gas determined by isotope investigation

Based on a limited number of samples of sewage sludge (20) and digester gas (14), derived from municipal waste water plants, the study analyses the distribution of biogenic and fossil carbon and potential dependencies of available data from the waste water plants.

The biogenic carbon contents of the sewage sludge and digester gas samples were determined by ana-lysing the carbon-14 (^{14}C) content by liquid scintillation spectrometry after combustion to CO_2 . Al-ready existing CO_2 in the digester gas samples was included to the analysis as also this CO_2 originates from the degradation of organic content of the sewage.

The results of the study show that sewage sludge from municipal waste water plants with minor portions of industrial waste water (<45 %, calculated as mean capacity utilisation of population equivalents minus affiliated citizen number) contains about 80 % biogenic carbon, while the respective digester gas contains about 85 % biogenic carbon. Hereby, the portion of fossil carbon is presumably attributed to persistent synthetic products and fossil raw material. The sewage from municipal waste water plants with higher portions of industrial waste water (≥ 45 %) can show significant smaller portions of biogenic carbon. In sewage sludge from such waste water plants, biogenic carbon contents of about 28 to 71 % were determined, while the respective digester gas contained about 11 to 88 % bio-genic carbon.

The portions of biogenic carbon in the samples showed no numerical dependency to chemical parameters of the waste water and sewage sludge, nor any correlation to the respective sewer system, or the size or the operation scheme of the waste water plants. Characterizations of the sewage sludge respecting biogenic carbon content by available waste water plant data is only feasible by a coarse classification regarding waste water with higher portions of industrial waste water discharge (≥ 45 %), especially from industries processing chemicals and fossil fuels, and waste water with less discharge from these industries.

The study was initiated and commissioned by the German Federal Environment Agency Berlin (German Emissions Trading Authority).

Danksagung

Wir danken sehr herzlich allen Kläranlagen, die sich zur Mitarbeit am Projekt bereit erklärt haben und uns mit Proben und Informationen zur Verfügung gestanden haben. Hier ist die freundliche Unterstützung der kommunalen Kläranlagen von Pfaffenhofen a.d. Ilm, Schweitenkirchen, Geroldshausen, Niederthann, Ampertshausen, Gmund/Tegernseer Tal, Tirschenreuth und Bonn/Salierweg zu nennen. Die Gespräche mit den hilfsbereiten und interessierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aller teilnehmenden Kläranlagen haben wertvolle Hinweise und Informationen geliefert. Trotz der häufig nicht geläufigen Informationen war man gerne bereit, unseren Fragebogen so weit wie möglich auszufüllen und fehlende Informationen zu beschaffen.

Wir danken darüber hinaus Herrn Garvens vom Umweltbundesamt/Deutsche Emissionshandelsstelle und seinen Kolleginnen und Kollegen für die interessante Projektinitiierung und die angeregte Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	12
Zusammenfassung.....	13
Summary	15
1 Projektansatz.....	17
1.1 Intention.....	17
1.2 Grundlagen der ¹⁴ C-Methodik.....	18
1.3 Grundlagen der ¹³ C-Methode	19
1.4 Recherche vorhandener Arbeiten und Veröffentlichungen zu Untersuchungen des Anteils an biogenem Kohlenstoff in Klärschlamm und Faulgas	20
2 Kläranlagen.....	22
2.1 Auswahl und Übersicht der Kläranlagen.....	22
2.2 Kohlenstoffstoffströme und biochemische Prozesse in Kläranlagen (Input/Herkunft, Umsetzung, Output und Rückführung)	24
2.3 Herkunft des Kohlenstoffs im Abwasser	27
3 Basisdatenerhebung Kläranlagen.....	29
4 Probenahme	35
5 Analyseverfahren	37
5.1 Bestimmung des biogenen Kohlenstoffgehaltes mittels ¹⁴ C-Gehaltsbestimmung.....	37
5.2 Präparation und Analyse von Klärschlamm und Faulgas	38
6 Analysenergebnisse mit Auswertung.....	40
6.1 Gasanalysen	40
6.2 Ergebnisse der $\delta^{13}\text{C}$ -Bestimmung.....	42
6.3 Biogener Anteil von Klärschlamm und Faulgas.....	43
6.3.1 Ermittelte Analysenwerte	43
6.3.2 Trenn- und Mischkanalisation	46
6.3.3 Gewerbliche Abwässer	48
6.3.4 Abwassergruppen der verschiedenen Gewerbe.....	49
6.3.5 Abwasserbasiswerte, Klärschlammanalysewerte und Gasanalysewerte im Vergleich mit den biogenen Anteilen	52
6.4 Heizwerte der Faulgase und Brennwerte der Klärschlämme	56
7 Evaluierung der Untersuchungen.....	58

8	Vorschlag zur Charakterisierung von Klärschlämmen.....	60
9	Quellenverzeichnis	61
A	Anhang	63
A.1	Übersichtstabelle der Messdaten, der erhobenen Basisdaten der Kläranlagen (Angaben Betreiber sowie Ergänzungen durch die Autoren) und der Klärschlammanalysen	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung des ^{14}C -Gehaltes in der Atmosphäre, bestimmt in Frankenweinen (Eichinger 1977), der Atmosphäre (Levin und Kromer 2004) und Kartoffelschnaps (BUNDESMONOPOLAMT o.J.)18
Abbildung 2:	Übersicht der beprobten Kläranlagen unter Berücksichtigung der mittleren Auslastung angegeben in Einwohnerwerten (gerundet).....22
Abbildung 3:	Vereinfachte Skizze der Kohlenstoff-Stoffströme in Kläranlagen25
Abbildung 4:	Vereinfachte Skizze einer typischen Kläranlage26
Abbildung 5:	Fragebogen zur Erhebung von Basisdaten zu den Kläranlagen30
Abbildung 6:	Probenahmeanweisung für Klärschlamm und Faulgas35
Abbildung 7:	Balkendiagramm der Gaszusammensetzung der Faulgase, sortiert nach aufsteigenden Einwohnerwerten40
Abbildung 8:	Darstellung des gemessenen Stickstoffgehalts (N_2) im Faulgas in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Abwassers ($\text{N}_{\text{ges.}}$) entsprechend der Angaben der Kläranlagen.....41
Abbildung 9:	Darstellung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte am TOC (Klärschlamm) und TC (Faulgas) in Abhängigkeit von den ^{14}C -Messwerten.....43
Abbildung 10:	Balkendiagramm der ^{14}C -Gehalte in Klärschlamm und Faulgas, sortiert nach Einwohnerwerten45
Abbildung 11:	Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas als Balkendiagramm mit farblicher Unterscheidung von Kläranlagen mit Misch- oder Trennkanalisation sowie Beschaffenheit der Probe (feucht/entwässert).....47
Abbildung 12:	Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit des gewerblichen Anteils an Abwasser (berechnet als Differenz aus mittlerer Auslastung und EZ); Hilfslinien zeigen die Bereiche von größer/kleiner 45 % gewerblichem Anteil bzw. größer/kleiner 75 % C_{bio} im Klärschlamm.48
Abbildung 13:	Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit der Basisparameter des Abwassers (Zulauf) von BSB ₅ , CSB, $\text{N}_{\text{ges.}}$ und $\text{P}_{\text{ges.}}$53
Abbildung 14:	Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit verschiedener C-, N- und P- Gehalte sowie von C/N-Verhältnissen in Abwasser, Faulgas und Klärschlamm54
Abbildung 15:	Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit von Analysedaten der Klärschlämme (mitgeteilt von den Betreibern).....55

Abbildung 16:	Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit von den AOX (Cl)-Messwerten der Klärschlämme (mitgeteilt von den Betreibern).....	56
Abbildung 17:	Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Abhängigkeit von den Brennwerten der Klärschlämme bzw. Heizwerten der Faulgase	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht von Messwerten aus Literatur und Datenbank der Hydroisotop GmbH.....	21
Tabelle 2:	Größenklassen der Kläranlagen.....	24
Tabelle 3:	Übersicht der Kläranlagen mit den angegebenen und berechneten gewerblichen Anteilen am Abwasser (angegeben als Einwohnergleichwerte und in Prozent).....	32
Tabelle 4:	Kohlenstoff-14-Messwerte an Kartoffelschnaps durch das Bundesmonopolamt (schriftl. Mitteilung vom 07.01.2016, 09.10.2013, 15.02.2012 und 11.08.2011)	37
Tabelle 5:	Übersicht der Messverfahren.....	39
Tabelle 6:	Übersicht der Kläranlagen mit gewerblichem Anteil und der ¹⁴ C-Messwerte sowie C _{bio} -Werte der Klärschlamm- und Faulgasproben	44

Abkürzungsverzeichnis

^{14}C	Kohlenstoff-14
AOX	Adsorbierbare Organisch gebundene Halogene
AU	Australien
BSB5	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
C	Kohlenstoff
C_{bio}	biogener Kohlenstoffanteil
C_{fossil}	fossiler Kohlenstoffanteil
CO	Kohlenmonoxid
CO₂	Kohlenstoffdioxid
C_{org.}	organischer Kohlenstoff
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DE	Deutschland
$\delta^{13}\text{C}$	Delta-Notation des stabilen Kohlenstoffisotopenverhältnisses $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$
EGW	Einwohnergleichwert
EW	Einwohnerwert
EZ	Einwohnerzahl
GC	Gas-Chromatographie
IRMS	Isotope ratio mass spectrometer; Isotopenverhältnis-Massenspektrometer
KA	Kläranlage
LSC	Liquid scintillation chromatography; Flüssigszintillation-Chromatographie
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
NL	Niederlande
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PET	Polyethylenterephthalat
TC	Total carbon; Gesamtkohlenstoff
TOC	Total organic carbon; gesamter organischer Kohlenstoff
VPDB	Isotopenstandard ViennaPeeDeeBee
WLD	Wärmeleitfähigkeitsdetektor

Zusammenfassung

Die Studie untersucht anhand einer begrenzten Anzahl an Proben von Klärschlamm (20) und Faulgas (14) die Verteilung von biogenem und fossilem Kohlenstoff und mögliche Abhängigkeiten von Basisdaten der Kläranlagen. Die beprobten Kläranlagen unterscheiden sich hinsichtlich Größe, angewandten Verfahren und Verteilung von kommunalen und gewerblichen Abwassereinleitungen. Es wurde eine möglichst repräsentative Auswahl typischer Anlagen in Deutschland mit Schwerpunkt auf den größeren bis größten kommunalen Abwasserentsorgern versucht. Rein industrielle Kläranlagen sind nicht mit einbezogen worden, aber Kläranlagen mit hohem industriellen bzw. gewerblichen Anteil verschiedener Industriezweige (Lebensmittel, Papier, Chemie, Raffinerie, Schwerindustrie etc.).

Die Erhebung von Basisdaten der Kläranlagen zu Einwohnerwerten, gewerblichen Indirekteinleitern, Abwasser- und Klärschlammzusammensetzung erfolgte über die Befragung der Kläranlagen mittels Fragebogen sowie zusätzlicher Internetrecherche. Zur Vergleichbarkeit wurde ein so genannter gewerblicher Abwasseranteil als Differenz von mittlerer Auslastung der Kläranlagen in Einwohnerwerten und der angeschlossenen Einwohnerzahl berechnet.

Die Bestimmung des biogenen Kohlenstoffanteils der Klärschlämme und Faulgase erfolgt nach Verbrennung zu CO₂ über die Bestimmung der Kohlenstoff-14(¹⁴C)-Gehalte mit Flüssigszintillationsspektrometrie. Bei den Faulgasen wurde bereits vorhandenes CO₂ mit in die Messung einbezogen, da auch dieses aus dem Abbau der organischen Fracht der Abwässer stammt.

In den Klärschlämmen aus zwanzig verschiedenen kommunalen Kläranlagen wurden biogene Kohlenstoffanteile von 28 bis 89 % bestimmt. Die Analysen der Faulgase von vierzehn Kläranlagen ergaben biogene Kohlenstoffanteile von 11 bis 96 %.

Besondere Abwasserfrachten der Chemieindustrie zeichnen sich durch extrem hohe fossile Kohlenstoffanteile aus.

Da auch Klärschlämme aus kommunalen Anlagen mit nur untergeordneten gewerblichen Abwässern (<45 %) signifikante fossile Kohlenstoffanteile (ca. 10 bis 30 %) aufweisen, werden als wahrscheinlichste Ursache für fossile Kohlenstoffanteile schwer abbaubare synthetische Produkte in häuslichen Abwässern angenommen, die mit Reinigungs- und Pflegemitteln eingetragen werden. Dies wird durch Proben aus dörflichen Ortschaften oder Kläranlagen mit dominierenden Einleitungen der Lebensmittelindustrie gestützt.

Numerische Abhängigkeiten zwischen Parametern des Abwassers, der Klärschlämme, der Kanalisation, der Größe und Abwasserbehandlungsverfahren oder des unspezifischen gewerblichen Abwasseranteils der Kläranlagen und dem Anteil an biogenem Kohlenstoff wurden nicht beobachtet. Schwache Hinweise sind über die AOX-Messdaten der Klärschlämme auf erhöhte fossile Kohlenstoffgehalte gegeben.

Möglichkeiten der Charakterisierung der Klärschlämme eines Klärwerks für den biogenen Kohlenstoffanteil anhand vorhandener Daten der Kläranlagen sind nur in der Unterteilung hinsichtlich starker Indirekteinleitungen (≥45 % bezogen auf Einwohnerwerte) aus den Branchen Chemie, fossile Energieträger u.ä. sowie untergeordneter Indirekteinleitungen der genannten Branchen möglich. Hierfür wurde eine Einteilung der Indirekteinleiter in fünf Abwassergruppen vorgenommen.

Indirekteinleiter aus der Abwassergruppe Fossile Energieträger und der Abwassergruppe chemische-mineralische Produktion und Verarbeitung liefern entsprechend der Studienergebnisse potentiell erhöhte fossile Kohlenstoffanteile im Klärschlamm oder auch im Faulgas.

Anderweitige Abwässer aus den Abwassergruppen Lebensmittel-/Futtermittelproduktion oder der Gruppe gemischte Produktion verursachen hinsichtlich der fossilen Kohlenstoffanteile keine signifikanten Abweichungen gegenüber überwiegend häuslich-kommunalen Abwässern.

Die gewerblichen Indirekteinleitungen in die Kläranlagen reichen von vernachlässigbar bis deutlich dominierend mit mehr als 85 %.

Für Kläranlagen mit weniger als 45 % gewerblichen Abwässern berechnet sich ein gewichteter Mittelwert der Klärschlämme (bezogen auf die Einwohnerwerte der mittleren Auslastung der Kläranlagen) von rund 80 % biogenem Kohlenstoff und ein gewichteter Mittelwert der Faulgase von rund 85 % biogenem Kohlenstoff.

Für Kläranlagen mit höheren gewerblichen Abwasserfrachten (≥ 45 %) wurden Werte von 28 bis 71 % biogenen Kohlenstoffanteil im Klärschlamm und 11 bis 88 % biogenen Kohlenstoffanteil im Faulgas bestimmt. Kläranlagen mit mehr als 45 % gewerblicher Abwasserfracht erfordern demnach individuelle Beurteilungen oder konservative Ansätze von 0 % für den biogenen Anteil im Klärschlamm.

Detaillierte Ermittlungen der Emissionen von fossilem CO₂ bei der Verbrennung von Faulgas und Klärschlamm einer spezifischen Kläranlage sind entsprechend der Ergebnisse der Studie nur über analytischem Weg – entweder der Schlämme und Faulgase – oder der Verbrennungsabluft möglich.

Da die Faulgase – mit Ausnahme von Abwasser mit starker Indirekteinleitung aus der Branche chemische Industrie – generell geringere fossile Kohlenstoffanteile aufweisen als die zugehörigen Klärschlämme, wird der Freisetzung von fossilem Kohlenstoff über den mikrobiellen Abbau in den Kanälen und den Kläranlagen, z.B. den Belebungsbecken, nur eine untergeordnete Rolle zugeschrieben.

Initiierung und Auftrag der Studie erfolgte durch das Umweltbundesamt Berlin (Deutsche Emissionshandelsstelle).

Summary

Based on a limited number of samples of sewage sludge (20) and digester gas (14), the study examines the distribution of biogenic and fossil carbon and potential dependencies of the distribution to available data from waste water plants. The studied waste water plants varied in sewage operation scheme, processed sewage volume and processed portions of municipal and industrial sewage inputs. The range of waste water plants selected for the study aimed to represent a collection of typical German municipal waste water plants with a focus on the big and biggest waste water disposal contractors. Therefore, waste water plants with completely industrial input were excluded from the study, whereas waste water plants with great portions of industrial waste water from different branches (food, paper, chemicals, refinery, heavy industries, etc.) were included.

The basal data survey of the waste water plants regarding population equivalents, industrial dischargers, compositions of waste water and sewage sludge was realised by questionnaires filled by the waste water plant operators and additional internet research. For comparison reasons, a so-called industrial waste water portion was calculated as the difference between average utilization of the waste water plant in population equivalents and the number of supplied population.

The biogenic carbon content of the sewage sludge and digester gas samples were determined by analysing the carbon-14 (^{14}C) content by liquid scintillation spectrometry after combustion to CO_2 . Already existing CO_2 in the digester gas samples was included to the analysis as also this CO_2 originates from the degradation of organic content of the sewage.

The biogenic carbon portions in the sewage sludge samples from twenty different municipal waste water plants varied between 28 and 89 %. The analyses of the digester gas samples from fourteen waste water plants resulted in biogenic carbon portions between 11 and 96 %.

Special waste water loading from chemical industry is characterised by extremely high fossil carbon portions.

However, also sewage sludge from municipal waste water plants with only minor industrial waste water portions (<45 %) have significant fossil carbon portions between about 10 to 30 %. It is therefore supposed that persistent synthetic products, brought in by cleaning and cosmetic care products, are responsible for these fossil carbon portions. This is supported by samples from rural waste water plants or from waste water plants with dominant inputs from food industries.

The portions of biogenic carbon in the samples showed no numerical dependency to chemical parameters of the waste water and sewage sludge, nor any correlation to the respective sewer system, or the size, or the operation scheme of the waste water plants. A weak link between the AOX-data of the sewage sludge and increased fossil carbon portions was found.

Characterization of the sewage sludge concerning biogenic carbon content by available waste water plant data is only feasible by a coarse classification regarding waste water with higher portions of industrial waste water discharge (≥ 45 %), especially from industries processing chemicals and fossil fuels, and waste water plants with less discharge from these industries. Therefore, the dischargers of waste water were classified into five classes.

The results show potentially increased fossil carbon portions in the sewage sludge and digester gas derived from the waste water class fossil fuels and chemical-mineral industry.

However, waste water from the class food-/feed production or the class mixed industry showed no significant difference from dominantly domestic-municipal waste water with respect to the fossil carbon portions.

The industrial inputs to the waste water plants range from negligible to clearly dominating with more than 85 %.

For the sewage sludge from waste water plants with industrial waste water portions less than 45 %, the biogenic carbon portion was determined to about 80 % as weighted mean of population equivalents numbers at average utilization of the waste water plants. For the respective digester gas, the biogenic carbon portion was determined to about 85 % (weighted mean).

Sewage sludge from waste water plants with larger portions of industrial waste water (≥ 45 %) showed biogenic carbon portions from 28 to 71 %. The respective digester gas showed biogenic carbon portions from 11 to 88 %. Therefore, waste water plants with industrial waste water inputs of more than 45 % require a determination on the individual basis, or the sewage sludge must be rated conservatively to biogenic carbon portions of 0 %.

According to the studies results, the detailed determination of fossil CO₂ emissions due to combustion of sewage sludge and digester gas from a specific waste water plant is only feasibly by analysis of the specific sewage sludge and digester gas or of the combustion gas.

Compared to the sewage sludge, the respective digester gas showed generally (with exception of the sewage with discharge from chemical industry) less fossil carbon portions. Therefore, the release of fossil carbon due to microbial degradation of the sewage in and from the canals and basins of the waste water plants is appraised as a minor issue.

The study was initiated and commissioned by the German Federal Environment Agency Berlin (German Emissions Trading Authority).

1 Projektansatz

1.1 Intention

In Deutschland fallen ca. 1,8 Mio. Tonnen Klärschlamm (Trockenmasse) jährlich aus der öffentlichen Abwasserbehandlung von kommunalen und industriellen Abwässern an (STATISTISCHES BUNDES-AMT 2016; UBA 2016). Durch die Ausfäulung der Klärschlämme in Faultürmen entstehen Kohlenstoff-dioxid (CO_2) und Methan (CH_4). Die energetische Nutzung dieses Methans in Blockheizkraftwerken unterstützt in modernen Anlagen die Stromversorgung der Kläranlagen (Druckbelüftung der Belebungsbecken, Pumpen, Rührwerke) und wird für die Entwässerung/Trocknung der Klärschlämme (Beheizung Faultürme) genutzt. Die Klärschlämme selbst werden heute mehrheitlich der thermischen Entsorgung zugeführt. Für das Jahr 2014 wird seitens des STATISTISCHEN BUNDESAMTES (2016) noch eine stoffliche Entsorgung in Landwirtschaft und Deponien von 0,72 Mio. t angegeben, es ist anzunehmen, dass in 2016 der Anteil weiter gesunken ist.

Sowohl bei der Verbrennung der Klärschlämme als auch bei der Verbrennung der Faulgase wird CO_2 in die Atmosphäre freigesetzt. Für Deutschland wird diese Emission pro Jahr mit über 1 Mio. t abgeschätzt¹. Abfallbehandlungsanlagen, wie Kläranlagen oder Klärschlammmonoverbrennungsanlagen unterfallen nicht dem TEHG (Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz). Es gibt allerdings eine Vielzahl von Energieanlagen und einige industrielle Anlagen, die Klärschlamm und Faulgas zusammen mit konventionellen Brennstoffen einsetzen. Diese müssen jährlich über die Emissionen aller Brennstoffe berichten. Im Emissionshandel wird beim Einsatz von Klärschlamm als Sekundärbrennstoff aktuell nur nach der Herkunft in „überwiegend kommunal“ oder „überwiegend industriell“ unterschieden.

Bislang wird kommunaler Klärschlamm als 100 % biogen² angesetzt (u.a. UBA 2006). Die Europäische Norm DIN EN 15440:2011 betrachtet in Anhang E „Klärschlamm“ und „Biogas aus Faulung“ als Biomasse, nimmt jedoch fossile Anteile dieser Materialien hiervon aus.

Kenntnisse, ob das durch kommunalen Klärschlamm und Faulgas in Deutschland freigesetzte CO_2 zu 100 % einer biogenen Herkunft entspricht oder anteilig die Freisetzung fossilen CO_2 erfolgt, bestehen nicht bzw. sind nicht publiziert. Für die Dokumentation der CO_2 -Emissionssituation ist Deutschland als Vertragsstaat internationaler Abkommen zum Klimaschutz gehalten, möglichst genaue Kenntnis der Zusammensetzung und Charakterisierung von Klärschlämmen und Faulgasen hinsichtlich der Verteilung des direkt und durch Verbrennung freigesetzten biogenen und fossilen Anteil des Kohlenstoffdioxids zu erwerben.

Die vorliegende Studie soll erste Ansätze zu systematisch und belastbaren Untersuchungen zur Verteilung des fossilen und biogenen Kohlenstoffs in Klärschlämmen und Faulgasen liefern. Des Weiteren sollen Kriterien oder Parameter ermittelt werden, die eine einfache Abschätzung der Verteilung anhand einfach zu erhebender oder vorhandener Daten von Kläranlagen erlauben. Die Charakterisierung soll möglichst durch die Kläranlagen selbst durchzuführen sein sowie fachlich und analytisch überprüfbar sein.

¹ zitiert nach der Leistungsbeschreibung der Ausschreibung zum Projekt Nr. 59766 vom Sept. 2015, Umweltbundesamt

² von lebenden Organismen in natürlichen Prozessen produziert, jedoch nicht versteinert oder von fossilen Ressourcen abgeleitet (DIN EN 15440:2011)

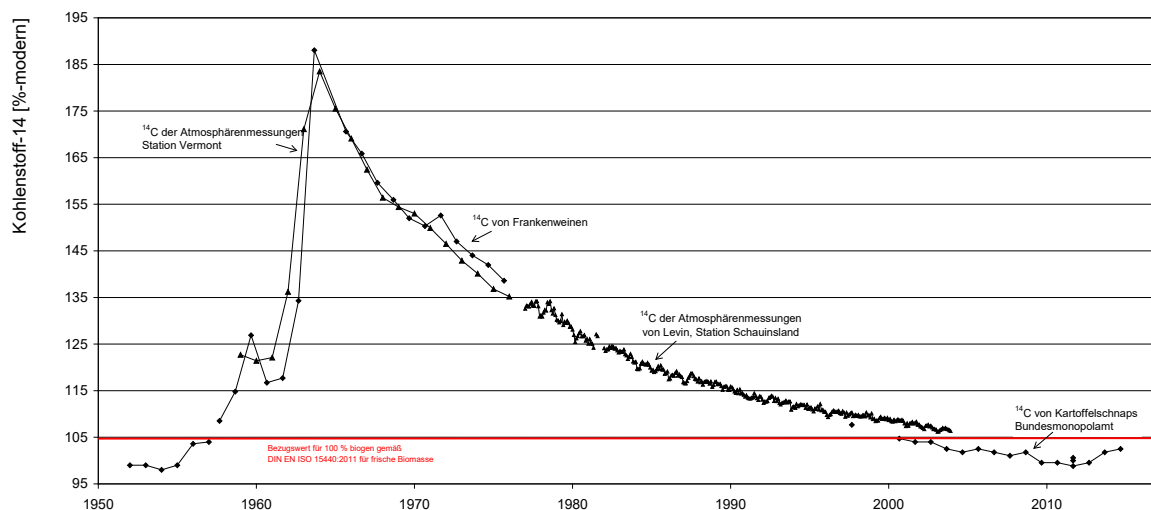
1.2 Grundlagen der ^{14}C -Methodik

Das β -strahlende Kohlenstoffisotop ^{14}C ist spurenweise in Form von Kohlenstoffdioxid (CO_2) in der Atmosphäre enthalten. Im Laufe der erdgeschichtlichen Entwicklung hat sich in der Atmosphäre eine Gleichgewichtskonzentration von $^{14}\text{CO}_2$ eingestellt. Sie entspricht derzeit 13,56 ^{14}C -Atom-Zerfällen je Gramm Kohlenstoff pro Minute. Dieser Gehalt ist definiert als 100 % moderner Kohlenstoff (auch 100 pmC, percent modern carbon, oder in Deutschland kurz: 100 %-modern; FRITZ und FONTES 1986). Bedingt durch seine Halbwertszeit von 5.760 Jahren lässt sich das Kohlenstoffisotop ^{14}C zur Altersbestimmung von historischen und prähistorischen Organismen und Substanzen (Kohlenstoff-Uhr, Radiocarbon-Methode) heranziehen.

Biologisches, d.h. pflanzliches Material wird über die Photosynthese aus dem in der atmosphärischen Luft enthaltenen Kohlenstoffdioxid aufgebaut. Der ^{14}C -Gehalt des Kohlenstoffs in rezenten³ Materialien pflanzlichen Ursprungs entspricht daher dem aktuellen ^{14}C -Gehalt des atmosphärischen CO_2 , also aktuell ca. 100 %-modern.

Der ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre wurde durch die oberirdischen Atombombenversuche als Spaltprodukt in den 1950iger Jahren stark erhöht (Bombenpeak) und hat seit Mitte der 60iger Jahre (Ende der oberirdischen Atomtests) sukzessive auf die Gehalte vor 1953 abgenommen (Abbildung 1). Die ^{14}C -Gehalte des CO_2 der Atmosphäre werden entweder direkt an Luftstationen oder auch über Wein oder Alkoholika bestimmt (siehe Kap. 5.1), deren verwendeten Ausgangsstoffe einem Anbaujahr entsprechen, da das CO_2 aus der Atmosphäre die ausschließliche Kohlenstoffquelle für das Wachstum der Pflanzen darstellt (Photosynthese). In den Feldfrüchten werden dann saisonale sowie Tages-Schwankungen der Atmosphäre gemittelt.

Abbildung 1: Entwicklung des ^{14}C -Gehaltes in der Atmosphäre, bestimmt in Frankenweinen (Eichinger 1977), der Atmosphäre (Levin und Kromer 2004) und Kartoffelschnaps (BUNDESMONOPOLAMT o.J.)



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

³ in der Gegenwart, unter gegenwärtigen Bedingungen stattfindend oder gebildet (Gegensatz zu fossil – vorzeitlich)

Der Kohlenstoff von synthetischen Produkten (z.B. Reinigungsmitteln) und Kunststoffen stammt auch heute noch praktisch ausschließlich aus fossilen Quellen (Erdöl). Dieses Material ist bereits so alt, dass keinerlei ^{14}C darin enthalten ist. Der ^{14}C -Gehalt des Kohlenstoffs aus den Kunststoffen entspricht somit 0 %-modern.

Zwischen diesen beiden Extremen der rezenten Biomasse (ca. 100 %-modern ^{14}C bzw. anthropogen überhöht) und den fossilen Quellen von organischem Material (0 %-modern ^{14}C) sind lediglich noch Torfe und Braunkohlen bei Brennmaterien der letzten 30.000 Jahre zu beachten, die ^{14}C -Gehalte von weniger als 100 %-modern aufweisen können. Generell ist es durch die beiden Extreme möglich, durch Mischungsrechnung aus dem ^{14}C -Gehalt eines Materialgemisches den Anteil an fossilem und biogenem Kohlenstoff zu ermitteln. Im einfachsten Fall eines Gemisches von frischer Biomasse und synthetischen Produkten ist für das Jahr 2016 direkt aus dem ^{14}C -Messwert in %-modern auf den biogenen Kohlenstoffgehalt in Prozent zu schließen.

Hinsichtlich der Anwendung des ^{14}C -Verfahrens zur Bestimmung des biogenen Kohlenstoffanteils in Klärschlämmen und Faulgasen kann als Risiko bei der Verfälschung noch die Beteiligung von radioaktiv belasteten Abwässern betrachtet werden. Findet keine gesonderte Behandlung von Abwässern aus dem medizinischen Bereich (Krankenhäusern, Arztpraxen, medizinische Einrichtungen), Forschungseinrichtungen und Kernkraftwerken statt, so ist das Risiko einer ^{14}C -Überhöhung durch künstliche Radioaktivität gegeben und muss im Einzelfall hinsichtlich möglicher Belastungen geprüft werden. Im Rahmen dieser Studie wurde hinsichtlich der berücksichtigten Kläranlagen eine derartige Überhöhung in relevanten Wertebereichen nicht befürchtet und somit nicht weiter berücksichtigt.

Im vorliegenden Text folgt die Verwendung des Wortes „biogen“ der Definition aus der DIN EN 15440:2011 (Seite 6), also „von lebenden Organismen in natürlichen Prozessen produziert, jedoch nicht versteinert oder von fossilen Ressourcen abgeleitet“. Bei der Beschreibung von Ergebnissen der ^{14}C -Analysen werden ^{14}C -Gehalte nahe 100 %-modern als „rezent“ bezeichnet.

Die Beschreibung der Messmethoden von ^{14}C und des im folgenden Kapitel erklärten Parameters $\delta^{13}\text{C}$ am gesamten organischen Kohlenstoff (TOC oder C_{org}) bzw. am Gesamtkohlenstoff (TC) erfolgt in Kap. 5.

1.3 Grundlagen der ^{13}C -Methode

Zur ^{14}C -Analyse wird parallel eine Analyse des stabilen Isotopenverhältnisses $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ durchgeführt. Diese Analyse dient der Überprüfung und Korrektur der ^{14}C -Messwerte sowie der Charakterisierung des Ausgangsmaterials bzw. der Beschreibung von Kohlenstoffumsetzungsprozessen.

Neben dem am häufigsten vorkommenden stabilen Kohlenstoffisotop ^{12}C und dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen radioaktiven ^{14}C liegt Kohlenstoff in der Umwelt natürlicherweise noch als weiteres, weit aus selteneres ^{13}C -Isotop vor.

Aufgrund der geringen Anzahl der ^{13}C -Isotope werden diese nicht in absoluter Anzahl angegeben, sondern zur besseren Lesbarkeit ins Verhältnis zu den am häufigsten vorkommenden Isotop ^{12}C gesetzt und mit einem Standardisotopenverhältnis (ViennaPeeDeeBelemite - VPDB) verglichen (FRITZ und FONTES 1986). Dies ist die sogenannte Delta-Notation ($\delta^{13}\text{C}$), siehe Formel (1).

$$\delta^{13}C = \frac{R_{Probe} - R_{Standard}}{R_{Standard}} \cdot 1000 \text{ (‰)} \quad (1)$$

$$\text{mit } R = \frac{{}^{13}C}{{}^{12}C}.$$

Da die Abweichungen der betrachteten Isotopenverhältnisse in der Regel sehr klein sind, werden die Isotopenwerte in der Delta-Notation mit 1000 multipliziert und in Promille (‰) angegeben.

Die ^{13}C -Isotope verhalten sich chemisch wie die anderen Kohlenstoffisotope, gehen also die gleichen chemischen Verbindungen ein. Da das ^{13}C -Isotop aber geringfügig schwerer ist und dadurch höhere Bindungsenergien besitzt, werden Verbindungen mit ^{13}C -Isotopen in Umwandlungsprozessen, zum Beispiel bei biologischer Umsetzung, langsamer umgewandelt als Verbindungen mit ausschließlich ^{12}C -Isotopen. In der Folge kommt es zur sogenannten „Isotopenfraktionierung“, aus welcher sich charakteristische Isotopenzusammensetzungen ergeben.

Anorganischer Kohlenstoff in Form von Gesteinen (zum Beispiel Kalksteinen) weist $\delta^{13}C$ -Werte nahe 0 ‰_{VPDB} auf. Der in der atmosphärischen Luft enthaltene Kohlenstoff im CO_2 weist einen $\delta^{13}C$ -Wert von ca. -7 ‰_{VPDB} auf. Die Assimilation des CO_2 durch Photosynthese bewirkt eine Verminderung der ^{13}C -Isotope im Pflanzenmaterial, so dass pflanzliches, und letztlich auch tierisches, Bulkmaterial mittlere $\delta^{13}C$ -Werte von -24 bis -28 ‰_{VPDB} aufweist. Fossiler organischer Kohlenstoff zeigt oft noch negativere $\delta^{13}C$ -Werte.

Die $\delta^{13}C$ -Werte im Faulgas und im Klärschlamm werden geprägt durch die Isotopenzusammensetzung des Ausgangsmaterials und die ablaufenden Abbau- und Umbauprozesse. Sie bieten deshalb die Möglichkeit, die Herkunft des Kohlenstoffs im untersuchten Klärschlamm und Faulgas abzuleiten und die Ergebnisse der ^{14}C -Analyse zu überprüfen.

1.4 Recherche vorhandener Arbeiten und Veröffentlichungen zu Untersuchungen des Anteils an biogenem Kohlenstoff in Klärschlamm und Faulgas

Bislang sind wenige Studien zur Herkunft des Kohlenstoffs in Abwässern, Klärschlämmen und Faulgasen veröffentlicht. Als Beispiele sind die Arbeiten von LAW et al. (2013), PALSTRA und MEIJER (2014) und MOHN et al. (2008) zu nennen. In Tabelle 1 sind ausgewählte Messdaten aus diesen Veröffentlichungen sowie unveröffentlichte Auszüge aus der Datenbank der Hydroisotop GmbH zusammengestellt.

Alle Daten der Veröffentlichungen zeigen die dominierend rezente Herkunft des organischen Kohlenstoffs in Klärschlamm und Faulgas an. Zwei Proben aus der Datenbank dagegen lassen deutliche Anteile von ca. 20 bzw. 12 % fossilem Kohlenstoff am gesamten organischen Kohlenstoff erkennen.

LAW et al. (2013) interpretieren ihre Untersuchungen dahingehend, dass die Anteile von fossilem Kohlenstoff bei etwa 10 % liegen.

Tabelle 1: Übersicht von Messwerten aus Literatur und Datenbank der Hydroisotop GmbH

Quelle	Herkunft	Probe	$^{14}\text{C-TC}$ / org. (%-modern)	$\delta^{13}\text{C-TC}$ / org. (‰V _{PDB})
Law et al. (2013)	Brisbane, AU	„sludge“, „WAS“ und „biosolids“	90,5 ± 0,3 to 103,5 ± 0,4	-25,3 to -22,5
Datenbank Hydroisotop (2012)	(vermutlich D)	Klärschlamm	87,8 ± 3,4	-25,3
Datenbank Hydroisotop (2012)	(vermutlich D)	Klärschlamm	80,0 ± 3,2	-25,1
Datenbank Hydroisotop (2012)	(vermutlich D)	Klärschlamm	102,6 ± 3,6	-22,2

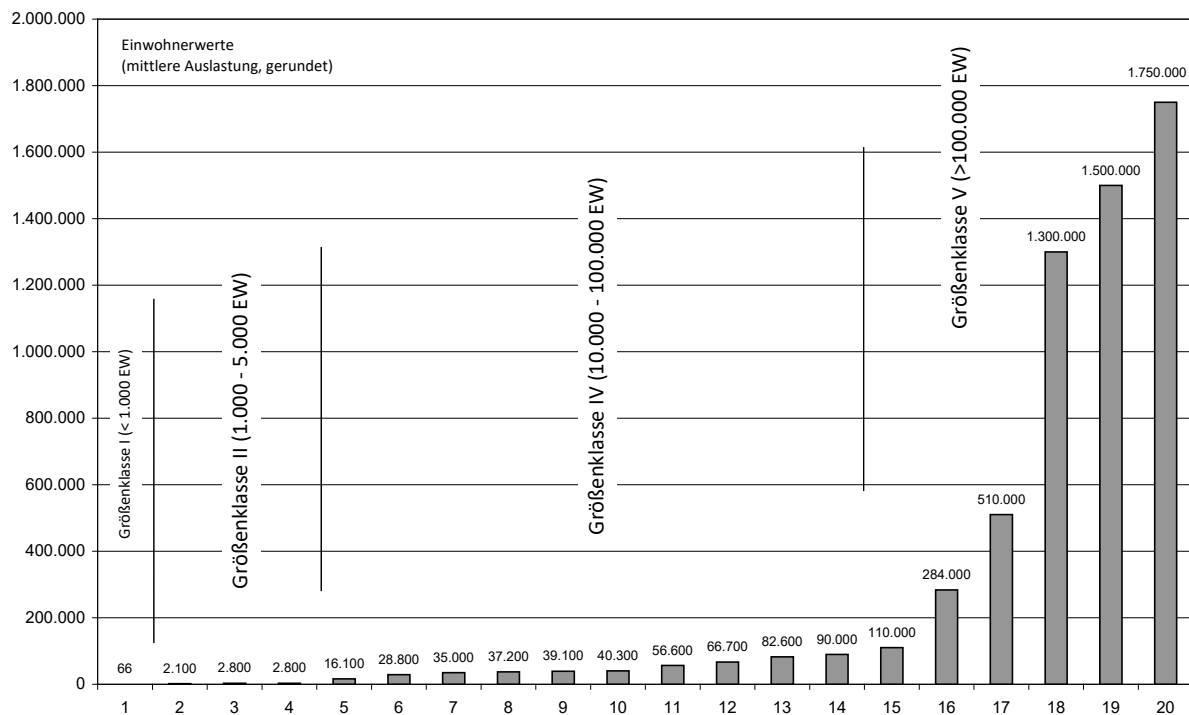
Die Messmethoden und Korrekturen variieren leicht, teils erfolgte die Messung am TC, teils am C_{org} „WAS“: wasted activated sludge

2 Kläranlagen

2.1 Auswahl und Übersicht der Kläranlagen

Ziel des Projektes war es, eine Übersicht der biogenen Anteile in Klärschlämmen von – vorwiegend kommunalen – Kläranlagen von Deutschland zu erhalten. Durch die in der Ausschreibung veranschlagte geringe Anzahl von 15 war nur die Verwirklichung eines groben Überblicks verschiedener Kläranlagen hinsichtlich Größe, Region, Indirekteinleiter, angewandte Verfahren etc. möglich. Darüber hinaus musste die Bereitschaft der Teilnahme der Kläranlagen berücksichtigt werden. Die Auswahl sowie die telefonische und schriftliche⁴ Ansprache der Kläranlagen erfolgte vorrangig unter Berücksichtigung der Diversität der oben angesprochenen Kriterien, aber auch von persönlichen Kontakten und interessanten industriellen Indirekteinleitern. Recherche und Information über Kläranlagen und potentielle Indirekteinleiter erfolgte ausschließlich über das Internet.

Abbildung 2: Übersicht der beprobten Kläranlagen unter Berücksichtigung der mittleren Auslastung angegeben in Einwohnerwerten (gerundet)



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

⁴ d.h. schriftlich auf elektronischem Wege

Die Auswahl der Kläranlagen deckt die volle Spannbreite der Auslegungsgröße von kommunalen Kläranlagen von 180 Einwohnerwerte (EW) bis hin zu den größten Kläranlagen Deutschlands von 2,4 Mio. Einwohnerwerten ab (Abbildung 2, Anlage1). Auf die Einbeziehung von Hauskläranlagen wurde verzichtet, da die Sickergruben mit Schlammabsatz nicht einfach zugänglich und im Rahmen des Projektes repräsentativ beprobbar waren. Der Schwerpunkt der untersuchten Kläranlagen wurde auf größere Anlagen gelegt, da die Größenklassen IV und V (>10.000 EW) mehr als 90 % des Abwassers in Deutschland behandeln (FRICKE 2009).

Die Stichprobe deckt Kläranlagen aus fünf Bundesländern ab. Hierbei wurden Bundesländer mit sehr hohem Abwasseraufkommen verstärkt einbezogen. Es ist sowohl der ländliche als auch rein urban geprägte Raum berücksichtigt. Die urbanen Räume sind teils stark industriell geprägt, teils dominiert durch den behördlichen und den Dienstleistungssektor. Die Berücksichtigung verschiedener (industrieller) Indirekteinleiter mit höherem Abwasseranteil konnte einerseits durch die geringe Probenanzahl, andererseits durch die Zurückhaltung zur Teilnahme von privaten Kläranlagenbetreibern nicht in allen Bereichen verwirklicht werden. Die Auswahl an Kläranlagen deckt dennoch Lebensmittelproduzenten, Brauereien, Gastronomie und Tourismus, Wäschereien, Autohöfe, Pharmaproduzenten, Chemieindustrie, Schwerindustrie, Papierproduktion, Verarbeitung von Erdöl und Kohle, CP-Anlagen (chemisch-physikalische Abfallbehandlungsanlagen) sowie zahlreiche weitere Bereiche mit ab (siehe auch Kap. 3). Singuläre Industriekläranlagen eines Betriebes sind nicht vertreten, jedoch Gemeinschaftsanlagen für Abwässer aus Kommunen und Chemie Parks sowie Kommunen und Großwirtschaftsräumen.

Die Kläranlagen sind mehrheitlich an Mischkanalisation angeschlossen. Lediglich zwei der Anlagen gaben an, ausschließlich durch Abwässer aus Trennkanalisation gespeist zu werden.

Die Mehrzahl der Anlagen wenden mechanisch-biologisch-chemische Verfahren an und betreiben Belebtschlammbecken sowie anaerobe Schlammstabilisierung. Jedoch sind auch ältere oder hochmoderne neuere Verfahren mit aerober Stabilisierung in Betrieb. Es wurden Teichkläranlagen, Rotationskörper, Tropfkörper, Belebtschlammbecken, Kaskadenbelebungen, Wirbelschichtanlagen, SBR (sequentielle biologische Reinigung), DNF (dissolved nitrogen flotation), Bio-P (biologische Phosphor-Elimination) und Bio-Reaktoren durch die Betreiber angegeben (A Anhang).

Die Kläranlagen betreiben nur zum Teil die Ausfäulung des Schlammes in Faultürmen zur Energiegewinnung. Dementsprechend wurden von 20 Kläranlagen Klärschlammproben untersucht, jedoch nur von 14 Anlagen Faulgas. Die Klärschlammproben wurden mit unterschiedlichen Gehalten von Wasser gezogen, von sehr flüssig (Nassschlamm, Wassergehalt ca. 80 %) bis hin zu nahezu trocken (Wassergehalt ca. 15 %). Klärschlamm, aber auch vorgeklärtes Abwasser, wird zum Teil von den Kläranlagen an andere Kläranlagen weitergeleitet, weshalb die Abwässer nicht aller Kläranlagen die für die Einleitung in offene Gewässer geforderten Werte erreichen müssen. Die – energieintensive – Trocknung der ausgefäulten Klärschlämme wird ebenfalls zum Teil von den Kläranlagen selbst betrieben und zum Teil von den Anlagen, die die Klärschlämme verbrennen (u.a. Monoklärschlammverbrennungsanlagen, Heizkraftwerke). Die starke Auslastung einiger Verbrennungsanlagen führt dazu, dass manche Klärschlämme aktuell über weite Transportwege zur Verbrennungsanlage gefahren werden. Nur noch untergeordnet kommt es zur Auftragung von gering bis wenig belasteten Klärschlämmen auf die Felder.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die geringe Probenanzahl dennoch gut das Spektrum von kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen inklusive mitbehandelter industrieller Abwässer von Deutschland – auch im Hinblick auf Volumina und Zusammensetzung der behandelten Abwässer – abdeckt (Tabelle 2). Kläranlagen der Größenklasse 5 sind laut STATISTISCHES BUNDESAMT und DWA (2014) rückläufig.

Tabelle 2: Größenklassen der Kläranlagen

Größenklasse	Kapazität der Einwohnerwerte (EW)	(Statistisches Bundesamt und DWA, 2014) behandelte Jahresabwassermenge von Deutschland. in %	Anzahl Klärschlammproben (diese Studie)
1	<1.000	1,1	1
2	1.000 - 5.000	5,3	3
3	5.001 - 10.000	5,1	0
4	10.001 - 100.000	41,2	10
5	>100.000	47,3	6

2.2 Kohlenstoffstoffströme und biochemische Prozesse in Kläranlagen (Input/Herkunft, Umsetzung, Output und Rückführung)

Den Kläranlagen werden Abwässer mit sehr verschiedenen organischen Verbindungen zugeführt. Menschliche Ausscheidungen und Abwässer aus der Produktion von Lebensmitteln sowie von pflanzlichen und tierischen Materialien liefern rezenten (bzw. biogenen) organischen Kohlenstoff.

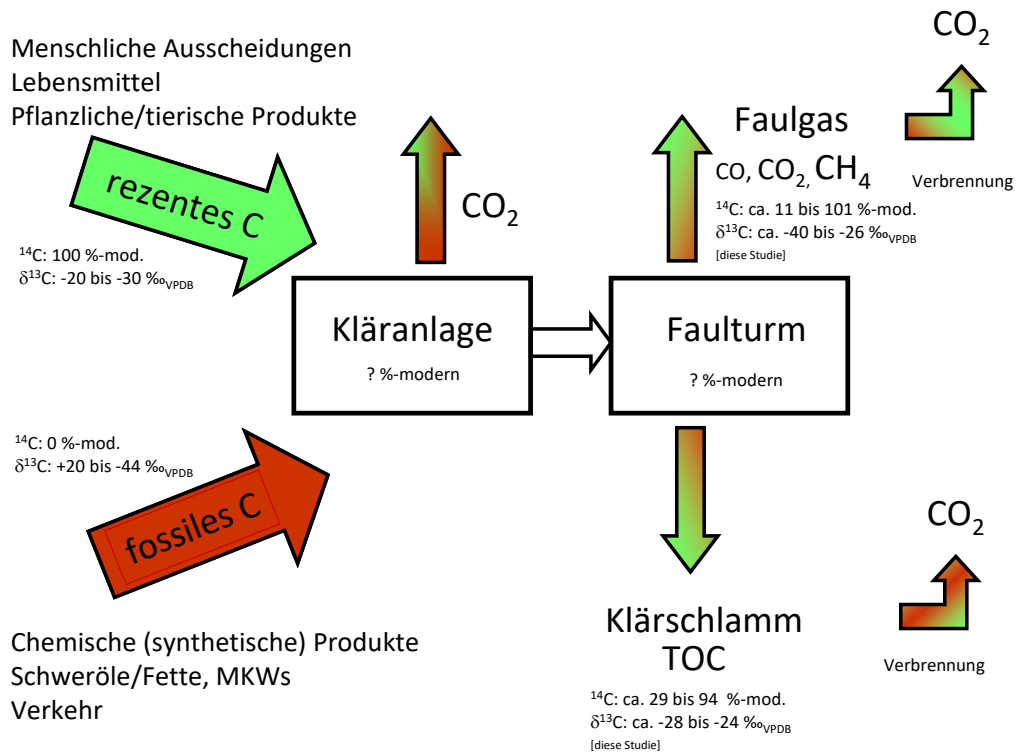
Abwässer mit Rückständen aus synthetischen Produkten, wie z.B. Hygiene- und Gesundheitsprodukte, Pharmazeutika, Tenside, Komplexbildner, Klebstoffe sowie Rückstände von Schwerölen und Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) dagegen liefern fossilen organischen Kohlenstoff, da diese Verbindungen im Wesentlichen aus Kohlen und Erdöl hergestellt werden.

In den Kläranlagen werden diese Gemische unterschiedlicher Herkunft unter aeroben Bedingungen zum größten Teil zu CO₂ veratmet. Die hierbei in den Kläranlagen entstehende Biomasse der Mikroorganismen sowie der schwer abbaubare Anteil der Organik landen im Faulturm, wo unter anaeroben Bedingungen ein weiterer Teil zu CH₄ verstoffwechselt wird. Im Faulturm selbst entsteht weiteres CO₂ und ein geringer Anteil CO. Im ausgefaulten Klärschlamm verbleibt außer der durch die Mikroorganismen entstandenen Biomasse der Rest der Verbindungen, der der Verbrennung zugeführt oder auch auf Felder aufgetragen oder deponiert wird.

Bereits im Kanalsystem kann es bei ausreichender Sauerstoffzufuhr zu mikrobiellem Abbau und CO₂-Freisetzung kommen. Im Kanalsystem findet der Abbau vorwiegend in der Sielhaut, den Biofilmen an den Kanalwänden, statt.

Abbildung 3 skizziert grob die Stoffströme des organischen Kohlenstoffinputs, während Abbildung 4 die Stoffströme in Kläranlagen verdeutlichen soll.

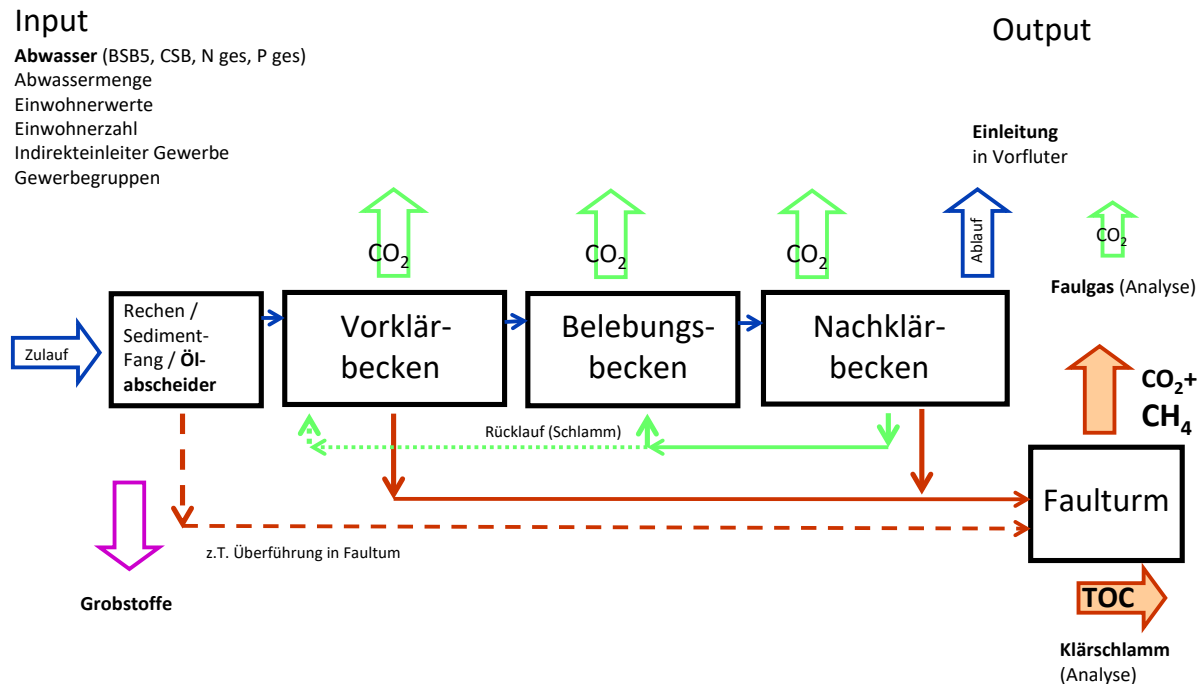
Abbildung 3: Vereinfachte Skizze der Kohlenstoff-Stoffströme in Kläranlagen



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

Inwieweit sich das Kohlenstoffgemisch des Abwassers in den verschiedenen C-Medien in gleichem Verhältnis abbildet, ist abhängig von der Abbaubarkeit der Verbindungen sowie den adsorptiven Eigenschaften.

Abbildung 4: Vereinfachte Skizze einer typischen Kläranlage



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

Ein weiterer Aspekt ist die Rückführung des Belebtschlammes in die Belebungsbecken der Kläranlagen. Die Mikroorganismen veratmen die organischen Verbindungen der Abwässer teilweise zu CO_2 (Dissimilation), während sie jedoch hierbei auch erhebliche Anteile an Biomasse aufbauen (Assimilation). Hierbei kann es zur Differenzierung kommen, welche organischen Verbindungen von den Mikroorganismen wie verstoffwechselt werden, so dass Verbindungen mit biogenem oder auch fossilem Kohlenstoff verschiedene Verteilung erfahren können.

Zusätzlich nehmen einige Kläranlagen Fremdschlämme in ihre Faultürme auf. Diese Fremdschlämme stammen von gewerblichen, privaten oder auch kommunalen Kläranlagen ohne Faulturm. Damit entsteht ein zusätzlicher Kohlenstoffinput, der eine andere Biogen-Fossil-Verteilung tragen kann als der Klärschlamm der Kläranlage.

Nach dem Faulturm werden dem ausgefaulten Klärschlamm häufig noch Polymere meist synthetischer Herkunft zugesetzt, um die folgende Entwässerung zu verbessern.

Für eine Verfolgung derjenigen Prozesse, die eine Ungleichverteilung des Kohlenstoffs sowie eine Rückführung auf bestimmte organische Verbindungen im Hinblick auf biogen-fossil erlaubt, wäre eine Stufenuntersuchung der Abwässer je Klärstufe, Klärgase je Klärstufe und der Schlämme vor und nach Faulung sowie Entwässerung notwendig. Hierbei ist dann neben der Bestimmung des Anteils an biogenem Kohlenstoff auch die Bestimmung des $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes hilfreich, da hierdurch Rückschlüsse auf die Herkunft und Umsetzungsprozesse möglich sind.

Da jedoch in dieser Studie nur das Ergebnis von Klärschlamm sowie des Faulgases zählt, bleiben diese Prozesse ebenso wie die biochemischen Abbauprozesse der verschiedenen organischen Verbindungen im Detail unberücksichtigt. Einige Aspekte werden dennoch durch die verschiedenen agierenden Kläranlagen (z.B. mit / ohne Klärschlammfäulung, Behandlungsverfahren) bzw. durch nicht vorgegebene Probenahmeorte und -zeitpunkte (z.B. Ausfäulungsgrad) berücksichtigt bzw. für die Kohlenstoffverteilung als nicht relevant nachgewiesen.

Die Bestimmung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Klärschlamm und Faulgas werden einbezogen und im Hinblick auf die mögliche Herkunftsunterschiede ausgewertet (Kap. 6.2).

2.3 Herkunft des Kohlenstoffs im Abwasser

Um Charakterisierungen der Klärschlämme in Bezug auf bekannte Daten der Anlagen, der Abwässer oder auch der Schlämme im Hinblick auf die biogenen und fossilen Kohlenstoffanteile zu ermitteln, ist die Herkunft des fossilen Kohlenstoffs von organischen Verbindungen, die gelöst im Abwasser vorhanden sind, bestimmend.

Hinsichtlich der generellen Zusammensetzung von Klärschlämmen wird auf die Studie von WIECHMANN et al. (2012) verwiesen. Der Kohlenstoffgehalt von Klärschlämmen liegt gemäß Zitaten in dieser Studie, OLIVIA et al. (2009) sowie BRANDT (2011) bei 33 bis 50 %, der Anteil organischer Verbindungen kann 45 bis 95 % der Trockenmasse betragen. Die Hauptmasse der organischen Verbindungen in Klärschlämmen sollte auf die Biomasse der beim Abbau aktiven Bakterien zurückgehen. Beschrieben wird Klärschlamm allgemein als hochkomplexe Mischung aus organischen Molekülen sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs: Proteine, Peptide, Cellulose, Hemicellulose, Lipide, Phenole, Aliphate, synthetische Polymere, Aromaten, PAKs, MKWs, PCBs, Phthalate, Tenside, Chlorbenzole, Pestizide, Medikamente usw. (KUCHAŘOVÁ et al. 2014; HARRISON et al. 2006; FRAGEMANN in: WIECHMANN et al. 2012; HARTMANN et al. 2004).

Biogene organische Kohlenstoffverbindungen im Abwasser entstammen menschlichen und tierischen Ausscheidungen, pflanzlichen und tierischen Substanzen der Lebensmittel- und Getränkeproduktion, Überresten bei der Verarbeitung von tierischen Produkten wie Fellen, Horn, Knochen und Fetten, Überresten bei der Verarbeitung von pflanzlichen Produkten wie Fasern und Holz, aber auch pflanzlichen Ölen.

Fossile organische Kohlenstoffverbindungen im Abwasser sowohl der Haushalte, aber auch in hohem Maße der Lebensmittel- und Getränkeproduktion, der Gastronomie und Wäschereien als auch Gerbereien etc. gehen auf den Eintrag von Reinigungsmitteln für Körper, Textilien, Oberflächen und Behältnissen (z.B. Flaschen) und auf Körperpflegemittel zurück. Die Rohstoffe für diese organischen Verbindungen entstammen zu weit über 90 % aus Erdöl und Kohle. Bislang gibt es nur wenige marktreife Produktionslinien (z.B. Scheuermittel, Autoshampoo), die auf nachwachsend produzierte Rohstoffe umgestiegen sind. Bei der Kennzeichnung von Reinigungsmitteln als „nachhaltig“ ist die Herkunft der Rohstoffe bislang nicht berücksichtigt (EU 2011/383/EU; UBA 2011).

Hinsichtlich der Massenbetrachtung stellen Reinigungs- und Pflegemittel nach den genannten rezenten organischen Verbindungen im Abwasser den größten Anteil sowohl in kommunalen, als auch in den oben genannten Gewerben. Die in diesen Mitteln enthaltenen Tenside müssen entsprechend des Wasch- und Reinigungsmittelgesetzes (WRMG i.d.F. 31.08.2015) zu über 80 % innerhalb von ca. 30 Tagen mikrobiologisch abbaubar sein. Somit gelangt noch ein guter Anteil an schwer abbaubaren Substanzen mit dem Abwasser in die Kläranlagen.

In anderweitigen gewerblichen Abwässern sind insbesondere in der chemischen Industrie Überreste von organischen Verbindungen aus fossilen Rohstoffen möglich. In der Schwerindustrie, Maschinenbau, Verarbeitung und Nutzung fossiler Energieträger, Drucktechnik, Färbereien etc. gelangen sowohl über in der Produktion eingesetzte Wässer, aber auch über Reinigungsmaßnahmen, Abrieb und Staub organische Verbindungen ins Abwasser. Werden nicht eigene Vorkläranlagen, effektive Öl- und Fettabscheider oder Abwasserbehandlung in CP-Anlagen betrieben, so können schwer abbaubare Verbindungen fossiler Herkunft über Tenside im Abwasser gelöst verbleiben.

Eine weitere These für Substanzen aus fossilen Rohstoffen im Abwasser beinhaltet den Asphalt- und Reifenabrieb sowie den Straßenstaub, der über die Mischkanalisation den Kläranlagen zugeführt wird. Straßenabrieb und Straßenstaub ist in höherem Maße mit Überresten aus Abgasen und Reifen belastet, die überwiegend auf fossilen Rohstoffen beruhen. Unter Beihilfe von tensidhaltigen Abwässern können diese organischen Verbindungen in Lösung gehalten oder auch als Mikropartikel mitgeschwemmt werden und schlussendlich in den Klärschlämmen landen.

Nicht gelöste organische, schwer abbaubare Materialien können nur bei geringen Durchmessern die mechanischen Filter der Kläranlagen passieren. Hier sind demnach Kleinst- und Nanopartikel zu nennen, die zu ca. 82-88 % im Klärschlamm verbleiben (MEIER et al. 2012). Ob dieser Beitrag zum Klärschlamm massenmäßig relevant ist, kann nicht beurteilt werden, da zwar zahlreiche Studien zur Umweltverträglichkeit und dem Passieren von Kläranlagen vorliegen, jedoch keine zum Anteil in Klärschlämmen.

Welche Bedeutung bei kommunalen oder gewerblichen Abwässern vor allem in sehr kleinen Anlagen Fehleinleitungen wie z.B. Altöle, Lacke haben, kann nicht numerisch bewertet werden. Bei den Klärschlammproben der kleinen Kläranlagen wurden jedoch deutlich geruchliche Auffälligkeiten wie „Schweinestall“, „Parfüm“ und „Erdölkohlenwasserstoffe“ festgestellt, wie sie Proben von großen Kläranlagen nicht aufwiesen.

Die in den Faulgasen und Klärschlämmen vorgefundenen fossilen Kohlenstoffanteile aus schwerer abbaubaren, organischen Verbindungen können somit sowohl aus kommunalen Haushaltsabwässern als auch aus gewerblichen Abwässern und aus Stoffeinträgen aus in die Kanalisation abfließendem Regenwasser stammen.

3 Basisdatenerhebung Kläranlagen

Für die Charakterisierung der Klärschlämme im Hinblick auf die Verteilung von biogenem und fossilem Kohlenstoff sollen möglichst einfach verfügbare Daten identifiziert werden, die es den Kläranlagen erlauben, diese selbst anzugeben und ihre Emission an fossilem CO₂ abschätzen zu können. Diese Charakterisierung muss extern fachlich und analytisch überprüfbar sein.

Folgende Anforderungen an die Daten wurden definiert:

- ▶ Die Daten sollten den Klärwerksbetreibern bekannt sein bzw. einfach zu erheben sein.
- ▶ Die Parameter sollten für verschiedene Kläranlagengrößen und Verfahren anwendbar sein.
- ▶ Jahresschwankungen sollten gemittelt sein.
- ▶ Die Daten sollten unabhängig, evtl. analytisch überprüfbar sein.
- ▶ Vorzugsweise sind die Daten nicht analytischer Natur, es sei denn, diese Daten werden sowieso erhoben wie z.B. in den Abwasseranalysen.

Eine Datenerhebung für eine Kläranlage hinsichtlich der Abwassereinleiter (Einwohnerzahl und Indirekteinleiter) erfolgt in aller Regel nur bei der Konzipierung und dem Bau der Anlage bzw. bei einer notwendigen größeren Sanierungsmaßnahme oder Energieeinsparungsmaßnahme. Weitere Datenerhebungen finden ansonsten nur auf Eigeninitiative einiger großer Entsorgungsbetriebe oder einzelner Bundesländer (Beispiel NRW ELWAS-Web⁵) statt. Kenntnisse über die Einleiter bestehen bei den Ämtern der Wasserwirtschaftsverwaltung bzw. der Stadtentwässerungen („Einleiterkataster“), die auch die Prüfungen von Einleitererlaubnis und Eigenüberwachung sowie Sondermaßnahmen, z.B. Einleitungen bei Baumaßnahmen, Langzeitpumpversuchen, durchführen.

Kläranlagen werden individuell konzipiert und haben Betriebsdauern über Jahrzehnte. Es bestehen diverse Anlagenformen, wobei nahezu alle Anlagen mechanisch-biologisch-chemische Verfahren anwenden und anaerobe Schlammstabilisierung betreiben. Ein einfaches Klassifizierungssystem für Kläranlagen besteht nicht.

Je nach Bundesland und Überwachungsbehörde sind die Anforderungen an die von den Kläranlagen vorzuhaltenden Betriebsdaten unterschiedlich. Auch die Klärschlammanalysen, die mehrheitlich entsprechend der Klärschlammverordnung (AbfKlärV i.d.F. 31.08.2015) durchgeführt werden, obwohl eine landwirtschaftliche Nutzung entfällt, zeigen lokale Variationen bei den untersuchten Parametern.

Um all diesen Aspekten sowie dem eigentlichen Ziel der möglichen Zusammenhänge von Kohlenstoff-Stoffströmen (siehe Kap. 2.3) und Kohlenstoffherkunft gerecht zu werden und eine möglichst praxisnahe Datenerhebung, d.h. an die Kenntnisse und Möglichkeiten der verschiedenen Klärwerksmeister angepasst, zu gewährleisten, wurde ein Fragebogen mit bekannten Basisdaten technischer und analytischer Form, aber auch mit einem als experimentell zu bezeichnenden Teil für die Datenerhebung erstellt (Abbildung 5).

⁵ URL: <https://www.elwasweb.nrw.de>

Abbildung 5: Fragebogen zur Erhebung von Basisdaten zu den Kläranlagen

Fragebogen Kläranlage			
Wir bitten außerdem um Überlassung einer Klärschlammanalyse, und Abwasseranalysen (Ab-Zulauf) sowie - falls vorhanden - von Prospekt über die Kläranlage und dem Jahresreport oder ähnliches.			
Name, Adresse: _____			
☐ Anonymität ☐ Dankenswerte, namentliche Nennung ☐ egal			
Angewandtes Verfahren: _____		Fällung/Flockung: _____	
☐ Faulturm ☐ anaerobe Schlammstabilisierung ☐ Trennkanalisation ☐ Annahme von Fremdschlamm für Faulung; wenn ja, wie viel? _____		☐ Gasgewinnung ☐ aerobe Schlammstabilisierung ☐ Mischkanalisation ☐ Entsorgung Rückstände Ölabscheider über Faulturm	
Mittlerer Trockenwetterzulauf: _____ (Einheit angeben)		_____ (Einheit angeben)	
Abwasservolumen pro Jahr: _____ cbm/Jahr		_____ cbm/Jahr	
Schmutzwasservolumen pro Jahr: _____		_____	
Faulgasvolumen pro Jahr: _____ (Einheit angeben)		_____ (Einheit angeben)	
Klärschlamm pro Jahr: _____ cbm/Jahr Anteil Trockenmasse		_____ Tage	
durchschnittl. Verweilzeit im Faulturm _____		kg/Jahr	
Einsatz Fe-/ Al-Salze pro Jahr _____		_____	
BSB 5 Zulauf _____ mg/l		Ablauf _____ mg/l	
CSB Zulauf _____ mg/l		Ablauf _____ mg/l	
N ges Zulauf _____ mg/l		Ablauf _____ mg/l	
NH ₄ -N _____ mg/l		Ablauf _____ mg/l	
P ges Zulauf _____ mg/l		Ablauf _____ mg/l	
Auslegung der Kläranlage (Reinigungskapazität): _____		EW (Einwohnerwerte) _____	
mittlere Auslastung _____		EW _____	
Einwohnerzahl: _____		Einwohner _____	
Indirekteinleiter Gewerbe: _____		EW _____	
(von - bis, Jahresmittel)			
Wir bitten Sie, uns Ihre gewerblichen Indirekteinleiter mit den durchschnittlichen (geschätzten) Einwohnerkennzahlen in folgenden 5 Gruppen zusammenzufassen. Die Gruppen haben wir entsprechend der Anlage der Abwasserverordnung (AbwV) gebildet (siehe Anlage).			
Gruppe 1: Häusliches und kommunales Abwasser		_____ EW	
Gruppe 2: Lebens-/Futtermittel		_____ EW	
Gruppe 3: gemischte Produktion		_____ EW	
Gruppe 4: Fossile Energieträger		_____ EW	
Gruppe 5: Chemische und mineralische Produktion und Verarbeitung		_____ EW	

Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

Im technischen Bereich wurde Auskunft zu folgenden Punkten erbeten:

- ▶ angewandte Verfahren
- ▶ Einsatz von Fällung/Flockung
- ▶ Vorhandensein eines Faulturms
- ▶ Möglichkeit der Gasgewinnung
- ▶ Anwendung von anaerober oder aerober Schlammstabilisierung
- ▶ Anschluss von Trenn- oder Mischkanalisation
- ▶ Annahme von Fremdschlamm für den Faulturm; wenn ja wie viel
- ▶ Entsorgung der Rückstände des Ölabscheiders über den Faulturm

Hinsichtlich der Volumeneinordnung und Größe der Kläranlagen wurden folgende Angaben abgefragt:

- ▶ mittlerer Trockenwetterzulauf, Abwasser- und Schmutzwasservolumen pro Jahr
- ▶ Faulgas- und Klärschlammvolumen pro Jahr
- ▶ durchschnittliche Verweilzeit im Faulturm
- ▶ Einsatz von Fe-/Al-Salzen pro Jahr
- ▶ Auslegung der Kläranlage
- ▶ mittlere Auslastung
- ▶ angeschlossene Einwohnerzahl
- ▶ Indirekteinleiter Gewerbe

Kenntnisse zum behandelten Abwasser wurden hinsichtlich der durchschnittlichen Analysedaten von Zu- und Ablauf auf die wesentlichen, allgemein im Abwasserbehandlungsbetrieb verwendeten Daten beschränkt:

- ▶ BSB5 Zu-/Ablauf
- ▶ CSB Zu-/Ablauf
- ▶ N ges. Zu-/Ablauf, NH_4 im Ablauf
- ▶ P ges. Zu-/Ablauf

Für zusätzliche analytische Daten wurde um Überlassung einer typischen Klärschlammanalyse gemäß Klärschlammverordnung (AbfKlärV) angefragt.

Im experimentellen Teil wurden die Klärwerksmeister gebeten, den gewerblichen Anteil der Abwässer in Einwohnerwerten abzuschätzen und in vorgegebenen fünf Gruppen mit Untergruppen entsprechend der Abwasserklassen nach der Abwasserverordnung (AbwV i.d.F. 02.04.2014) einzusortieren. Dies wurde vor dem Hintergrund versucht, dass ein Zusammenhang zwischen verschiedenen Gewerben und dem Anteil an fossilem Kohlenstoff besteht. In mündlichen Befragungen und auch später in den ausgefüllten Fragebögen wurden von einigen Klärwerksmeistern – besonders von Großstadtkläranlagen – dieser Gewerbeanteil generell als „unerheblich“, „nicht relevant“ bzw. „uninteressant“ bis hin zu „nicht vorhanden“ angegeben. Es kamen bereits im Vorfeld die Aussagen, dass alle Indirekteinleiter eigene Vorklärung betreiben müssen. In der Abwasserbehandlung wird urbanen gewerblichen Einleitern keine besondere Bedeutung zugemessen, bzw. diese werden gar nicht als gewerbliche Einleiter betrachtet. Als Beispiele können kleine Betriebe wie Imbissbuden, Handwerksbetriebe, Fitnesscenter etc. genannt werden. Diese Ansicht ist dahingehend verständlich, dass die mittlere Auslastung der Kläranlagen, berechnet als Einwohnerwerte auf Grundlage von BSB5 oder CSB-Messwerten, bei Groß- und Kleinstädten häufig die Einwohnerzahl nicht stark überschreitet. Darüber hinaus sind den Klärwerksbetreibern selten ihre Indirekteinleiter – sofern nicht mit größeren Problemen beim Abwasser behaftet – im Detail bekannt. Jedoch mussten auch bei großen Anlagen die Einwohnergleichwerte der gewerblichen Einleiter z.T. durch die Autoren selbst recherchiert werden, da Angaben durch die Kläranlagen fehlten.

Bei sehr kleinen Anlagen ist gut ersichtlich, dass die mittlere Auslastung an Einwohnerwerten die Einwohnerzahl deutlich unterschreiten kann (Tabelle 3). So wurde auch von einem Teil der Kläranlagen der gewerbliche Anteil als Differenz von Einwohnerwerten und Einwohnerzahl angegeben. Andere Kläranlagen dagegen gaben weitaus höhere Anteile an gewerblichen Abwässern an, als diese Berechnung ergibt. In Tabelle 3 wurden außer den Angaben der Betreiber zum gewerblichen Anteil (in EGW) ein theoretisch berechneter Wert des Gewerbeanteils als Differenz aus mittlerer Auslastung und Einwohnerzahl angegeben (im Folgenden als „gewerblicher Anteil“ bezeichnet), um eine gemeinsame Vergleichsbasis zu schaffen.

Tabelle 3: Übersicht der Kläranlagen mit den angegebenen und berechneten gewerblichen Anteilen am Abwasser (angegeben als Einwohnergleichwerte und in Prozent)

Kläranlage	Auslegung	Mittlere Auslastung (gerundet)	Einwohnerzahl (EZ)	Indirekteinleiter Gewerbe (Angabe Kläranlage) ⁶		Mittlere Auslastung minus Einwohnerzahl (berechnet)	
	(EW)	(EW)		(EGW)	(%)	(EGW)	(%)
1	180	66	172	0	0,0	-106	0,0
2	3.000	2.100	300	1.800	85,7	1.800	85,7
3	3.500	2.800	1.780	1.000	35,7	1.020	36,4
4	4.500	2.800	2.035			765	27,3
5	25.000	16.100	9.021			7.061	43,9
6	40.000	28.800	17.684			11.158	38,7
7	91.000	35.000	(35.000) ⁷		0,0	0	0,0
8	45.000	37.200	30.869			6.352	17,1
9	50.000	39.100	40.860	4.067	10,4	-1.762	0,0
10	54.000	40.300	33.000	22.000	54,6	7.300	18,1
11	60.000	56.600	44.600	15.400	27,2	12.000	21,2
12	115.000	66.700	66.828	3.726	5,6	-144	0,0
13	110.000	82.600	49.500	40.000	48,4	33.103	40,1
14	90.000	90.000	60.000			30.000	33,3
15	260.000	110.000	95.000	15.000	13,6	15.000	13,6
16	307.000	284.000	175.000	103.101	36,3	108.615	36,3
17	585.833	510.000	65.892	444.396	87,1	444.396	87,1
18	2.000.000	1.300.000	1.150.000	150.000	11,5	150.000	11,5
19	1.340.000	1.500.000	709.546	782.080	52,1	782.080	52,4
20	2.400.000	1.750.000	887.869	863.812	49,4	863.812	49,3

Leere Zellen: Wo keine Angaben der Kläranlagen vorliegen bzw. durch die Autoren ermittelt werden konnten, bleiben die Zellen leer.

⁶ z.T. anderen Quellen entnommen

⁷ Dieser Kläranlage ist nicht einmal die Einwohnerzahl (EZ) bekannt.

Im experimentellen Teil, wo nur ein Teil der Kläranlagen Angaben gemacht hat, wurden die 57 verschiedenen Abwasserklassen der Abwasserverordnung in fünf Gruppen aufgeteilt und um Abschätzung der Abwasseranteile bezogen auf Einwohnergleichwerte gebeten (siehe Fragebogen in Abbildung 5). Die Bildung der fünf Gruppen erfolgte auf Basis der Herkunft der organischen Kohlenstoff-Einträge im Abwasser. Eine Einordnung in Wirtschaftszweige nach vergleichbarem Muster wird auch von AUSTERMANN-HAHN und WITTE (2014) bei der Bewertung von CO₂-Emissionen in Industriekläranlagen außerhalb der Faulgasverbrennung verwendet.

Gruppe 1: Häusliches und kommunales Abwasser

Diese Gruppe umfasst die häuslichen und kommunalen Abwässer. Der Kohlenstoff wurde in dieser Gruppe mit sehr hohem Anteil als biogen angenommen, da der Kohlenstoff aus menschlichen Ausscheidungen und Küchenabwässern vermutlich dominiert. Fossile Kohlenstoffanteile sind überwiegend aus synthetischen Produkten von Körperpflege und Reinigung, aber auch durch Verkehr und Medizinprodukte zu erwarten.

Gruppe 2: Lebens-/Futtermittelproduktion

Diese Gruppe beinhaltet hohe Kohlenstoff-Stoffströme aus rezenten Pflanzen und Tieren. Fossiler Kohlenstoff ist verstärkt über Tenside bei der Reinigung (z.B. Flaschenspülanlagen) zu erwarten.

Gruppe 3: gemischte Produktion

Diese Gruppe beinhaltet die gemischte Produktion, wo pflanzliche und tierische Produkte (biogener Kohlenstoff) unter erhöhtem Einsatz chemischer Mittel aus synthetischer Herkunft verarbeitet werden, also auch fossiler Kohlenstoff in größerer Menge ins Abwasser gelangen könnte, z.B. Bleichmittel, Tenside, Bindemittel, Klebstoffe, Farbstoffe etc..

Gruppe 4: Fossile Energieträger

In der Gruppe der fossilen Energieträger sind höhere organische Bestandteile im Abwasser von fossiler Herkunft auf direktem Wege vorauszusagen.

Gruppe 5: Chemische und mineralische Produktion und Verarbeitung

In der Gruppe der Abwässer aus chemischer und mineralischer Produktion werden eigentlich zwei Gruppen zusammengefasst. Von den rein mineralischen Produktionen sind keine größeren Abwasserlasten mit organischen Bestandteilen zu erwarten. Diese geringeren Anteile sind hinsichtlich der Verteilung der Kohlenstoffherkunft biogen-fossil jedoch schwer einzuschätzen. Ebenso sind die Abwässer verschiedener chemischer Produktionen mal mehr und mal weniger mit organischen Verbindungen sowohl aus fossilen als auch aus rezenten Rohstoffen belastet. Hierbei spielen besondere Industrieproduktionen eine Rolle, die hinsichtlich ihrer organischen Abwasserlasten bekannt sind.

Unter Berücksichtigung derartiger Indirekteinleiter wurden für Deutschland kommunale oder Gemeinschaftsanlagen recherchiert, die gewerbliche Abwässer aus den verschiedenen Industriebereichen mit behandeln. Die beprobten Kläranlagen beinhalten somit auch eine Vielzahl der angesprochenen Gewerbe. Von besonderem Interesse war in dieser Studie die Einbeziehung von Papierproduktion, Schwerindustrie und/oder fossile Energieträger und chemische Produktion, was auch verwirklicht werden konnte.

Die Angaben der zurückgesandten Fragebögen sind mehrheitlich in der Übersichtstabelle von A Anhang eingetragen, nur wenige Angaben wurden durch den Autor ergänzt bzw. numerische Angaben in andere Einheiten überführt.

4 Probenahme

Drei Kläranlagen wurden durch Mitarbeiter der Hydroisotop GmbH selbst beprobt, die restlichen Kläranlagen durch deren Betreiber. Für die Faulgasproben wurden Gasbeutel (2 x 15 L) zur Verfügung gestellt. Die Beprobung getrockneter, ausgefallter Klärschlämme fand mittels Plastikbeutel und Eimer statt (ca. 1 – 2 kg). Für die Beprobung von Nassschlämmen wurden Weithalsgefäße (PE-Flaschen) verwendet (ca. 2 – 5 L). Die Proben wurden teilweise von Mitarbeitern der Hydroisotop GmbH bei den Kläranlagen abgeholt, teilweise von Klärwerksmeistern persönlich abgegeben oder per Post versandt.

Der Klärschlamm sollte jeweils in dem Zustand beprobt werden, wie er von der Kläranlage der Weiterverwertung zu geführt wird. Bei Vorhandensein von Faultürmen ist dies der ausgefallte Klärschlamm, der nach weiterer Entwässerung jeweils zu den Verbrennungsanlagen transportiert wird. Bei Kläranlagen ohne Faultürme wurde der – nicht ausgefallte, ohne Kühlung stark gärende - Klärschlamm in flüssiger Form zur Verfügung gestellt.

Für die Beprobung von Faulgas wurde eine Probenahmeanweisung erstellt (Abbildung 6).

Vorrangig wurde um Beprobung des Faulgases vor Reinigung und Trocknung gebeten. In einigen Fällen, wo ein erhöhtes Risiko bei Versendung oder der Beprobung angenommen wurde, ist das Faulgas nach Gaswäsche untersucht worden.

Abbildung 6: Probenahmeanweisung für Klärschlamm und Faulgas

Probenahmeanleitung Klärschlamm Der Klärschlamm sollte in dem Zustand beprobt werden, in dem er zur Verbrennung/Weiterverwertung bereitgestellt wird. Von dem Klärschlamm wird eine repräsentative Probe von ca. 1-2 kg in einen Probenbeutel oder Eimer gegeben. Probenbeutel bitte verschließen. Faulgas Das Faulgas kann entweder im Rohzustand, also vor der Gaswäsche, oder nach Gaswäsche (bitte angeben) beprobt werden. Es sollen die 2 bereitgestellten Gasbeutel mit dem Faulgas gefüllt werden. Dazu sollte die Gasleitung vor der Probenahme erst einige Zeit mit dem ausströmenden Klärgas gespült werden, damit etwaig sich in der Leitung befindliches Kondenswasser ausgeblasen werden kann. Nach Anschluss des Probenahmeschlauches an die Gasleitung wird dieser ebenfalls einige Sekunden gespült, um atmosphärische Luft aus dem Schlauch zu verdrängen. Erst nach dem Spülen des Gasausslasses und des Schlauches werden die Probenahmebeutel über das Ventil mit dem Schlauch verbunden. Das Ventil wird mit einer Linksdrehung geöffnet. Das Faulgas dann solange in die Beutel einströmen lassen, bis er gut gefüllt (nicht prall) ist. Den Beutel nach der Probenahme durch eine Rechtsdrehung des Ventils sicher verschließen. Das Prozedere mit dem zweiten Gasbeutel wiederholen und nach der Probenahme beide Gasbeutel in zusätzlichen Plastiksack stecken und in einem Paket versenden. Falls Fragen auftreten sollten, stehen wir Ihnen gerne telefonisch zur Verfügung:
--

Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

Die Probenanzahl der vorliegenden Datenerhebung hinsichtlich der biogenen Anteile von Klärschlamm war ursprünglich mit 15 Kläranlagen angesetzt. Im Endeffekt wurden 20 Klärschlammproben von 20 verschiedenen Kläranlagen und 14 Faulgasproben untersucht. Da der Schwerpunkt auf einer ersten Übersichtserhebung und der Suche nach Charakterisierungsmerkmalen der Kläranlagen im Hinblick auf die biogenen Kohlenstoffanteile der Klärschlämme und energetisch nutzbaren Faulgase lag, wurden keine Untersuchungen zur Prüfung der Repräsentativität der einzelnen Kläranlagen und Proben durchgeführt. D.h. es wurden keine Mehrfachbeprobungen im Hinblick auf jahreszeitliche Variationen, langjährige Temperaturschwankungen, Lagerungszeiten der Klärschlämme oder Mehrfachbeprobungen des Faulgases je nach erreichtem Ausfäulungsgrad des Schlammes durchgeführt. Bewusst wurde jedoch auch auf Vorgaben zur Beprobung verzichtet, um eine zufällige Auswahl verschiedener Proben zu erhalten bzw. eine praxisnahe Probenahme zu gewährleisten.

Eine Überprüfung, ob insbesondere die Temperaturen Unterschiede im Abbauverhalten der Belebungsbecken eine Rolle hinsichtlich der noch im Klärschlamm verbleibenden Kohlenstoffanteile hinsichtlich ihrer Herkunft machen, kann somit nur in weitergehenden Untersuchungen geklärt werden. Auch bei sehr kleinen Kläranlagen sind signifikante Variationen im Ergebnis aufgrund variabler Abwassereinträge nicht auszuschließen. Variationen bei den Faulgasen sind bei nicht kontinuierlicher Bestückung der Faultürme je nach Ausfäulungsgrad denkbar. Entsprechend der Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Studie ist jedoch anzunehmen, dass Variationen mit Ausnahme der kleinen Anlagen nur innerhalb eines Wertebereiches von maximal 10 % bestehen und für jede Kläranlage individuell zu ermitteln wären.

Prozesstechnisch wird in den Kläranlagen – sowohl in den Klärbecken als auch in den Faultürmen – eine große Durchmischung der Klärschlämme erreicht.

5 Analyseverfahren

5.1 Bestimmung des biogenen Kohlenstoffgehaltes mittels ^{14}C -Gehaltsbestimmung

Für die Bestimmung des biogenen Anteils des Kohlenstoffs (C_{bio}) der Klärschlämme sowie der Faulgase werden die Vorgaben der DIN EN 15440:2011 für die Bestimmung des Gehaltes an Biomasse in Sekundärbrennstoffen nach dem ^{14}C -Verfahren (Anhang C, Punkt C.8. Verfahren zur ^{14}C -Bestimmung mit dem Proportional-Szintillationszähler-Verfahren) angewendet. Die Berechnung des Gehalts an Biomasse auf Grundlage des biogenen Kohlenstoffgehaltes entfällt.

Entsprechend des Anhangs C Punkt C.7.1 *Korrektionsfaktoren* ist aus dem ^{14}C -Messwert der biogene Kohlenstoffgehalt über einen Korrektionsfaktor zu berechnen. Für die Korrektion ist für den Zeitraum von 2010 bis 2013 bei Sekundärbrennstoffen unbekannter Zusammensetzung und Herkunft der Wert von 112 %-modern anzusetzen. Bei frischer Biomasse soll auf den Wert 105 %-modern korrigiert werden, der für das Jahr 2008 angegeben ist. Eine Anpassung der Korrektionsfaktoren soll mit Überarbeitung der DIN-Norm erfolgen. Diese steht bislang (Stand Juni 2016) noch aus.

In Abbildung 1 in Kap. 1.2 ist der Verlauf der ^{14}C -Gehalte in der Atmosphäre anhand von Messdaten in Weinen, direkter Atmosphärenmessungen und von Kartoffelschnaps dargestellt. Das Bundesmonopolamt hat abweichend für das Jahr 2008 einen ^{14}C -Gehalt auf Grundlage von Kartoffelschnaps von 101,8 %-modern angegeben (Tabelle 4).

Tabelle 4: Kohlenstoff-14-Messwerte an Kartoffelschnaps durch das Bundesmonopolamt (schriftl. Mitteilung vom 07.01.2016, 09.10.2013, 15.02.2012 und 11.08.2011)

Wachstumsjahr	Kohlenstoff-14 (^{14}C) (%-modern) ⁸
2008	101,8
2009	99,6
2010	99,6
2011	98,8
2012	99,6
2013	101,8
2014	102,5

Klärschlamm und Faulgas ist vorrangig als (sehr) frische Biomasse zu betrachten. Zusätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass Abwässer auch einen bedeutenden Anteil an Toilettenpapier – teils bereits in verschiedenen Stadien des Abbaus – mit sich führen. Die Klärschlamm- und Faulgasproben wurden nunmehr im Jahr 2015 und 2016 gezogen. Auch die für Toilettenpapier verwendeten Altpapier- und Frischholzanteile sind mittlerweile deutlich im ^{14}C -Gehalt zurückgegangen. Hinsichtlich der ^{14}C -Gehalte der Atmosphäre für 2014 könnten Messwerte des Bundesmonopolamtes herangezogen werden, die auf Grundlage von Kartoffelschnaps jährlich ermittelt wurden. Laut mündlicher Mitteilung stellt das Bundesmonopolamt die jährlichen

⁸ Schriftliche Mitteilung der Messwerte durch das Bundesmonopolamt in der Messeinheit Bq pro Gramm Kohlenstoff, Umrechnung in %-modern durch die Autoren dieser Studie.

Bestimmungen jedoch ein. Welche Bezugswerte zukünftig verwendet werden können, steht damit zur Diskussion.

Für 2014 wurde ein ^{14}C -Gehalt von 102,5 %-modern ermittelt (Tabelle 4). Als Bezugswert für frische Biomasse für die in dieser Studie untersuchten Proben wird jedoch eine Berechnung des biogenen Kohlenstoffanteils entsprechend des Korrekturfaktors für 2008 (105 %-modern) der DIN-Norm durchgeführt. Angesichts der vom Bundesmonopolumt für 2008 bis 2014 in Kartoffelschnaps bestimmten ^{14}C -Gehalte ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass diese Korrektur der Messdaten durchaus relevante Unterschiede im angegebenen biogenen Kohlenstoffgehalt bewirken können: z.B. entspricht der ^{14}C -Messwert von 100,8 %-modern einem biogenen Kohlenstoffanteil von 96 % bezogen auf den Bezugswert 105 %-modern, jedoch einem biogenen Kohlenstoffanteil von 100 % bei Bezugswert 101 %-modern.

5.2 Präparation und Analyse von Klärschlamm und Faulgas

Die Klärschlammproben wurden über einige Tage luftgetrocknet und nach Bedarf gemischt und homogenisiert. Ein Aliquot der jeweiligen Probe wird anschließend im Trockenschrank bei ca. 40 bis maximal 60 °C getrocknet. Je nach Wassergehalt dauert die Trocknung einige Tage. Da in der gängigen Praxis vor der Verbrennung von Klärschlämmen ebenfalls eine Trocknung ohne Temperatur-Kontrolle durchgeführt wird, wurde das mögliche Entweichen leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe und CO_2 bei der Trocknung nicht verhindert und nicht evaluiert. Der Effekt dieser Prozesse auf die Zusammensetzung des Kohlenstoffs in den Proben wird als untergeordnet, d.h. im analytischen Fehlerbereich der ^{14}C -Messung liegend, betrachtet. CO_2 -Emissionen in der Abwasserbehandlung vor der Verbrennung von Faulgas und Klärschlämmen werden u.a. von AUSTERMANN-HAHN und WITTE (2014), LAW et al. (2013) oder auch MOHN et al. (2008) untersucht. Abbauprozesse, die in den flüssigen, nicht ausgefaulten Proben aktiv sind, werden durch die Trocknung gestoppt.

Die Bestimmung des ^{14}C -Gehaltes sowie des $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes der getrockneten Klärschlammproben erfolgt nach Verbrennung von ca. 20 g Probe in einem Bombenkalorimeter. Hierbei wird der in den Proben enthaltene Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid (CO_2) oxidiert. Eine vorgeschaltete Säurebehandlung zur Entfernung von anorganischem Kohlenstoff erfolgte nicht, einerseits, weil der anorganische Kohlenstoffanteil in Klärschlämmen im Vergleich zum organischen Kohlenstoff gering ist, und andererseits, weil der Verbrennungsprozess den üblichen Entsorgungsweg für Klärschlamm abbildet. Eventuell durch den Verbrennungsprozess freigesetztes CO_2 aus Karbonat ist Teil der CO_2 -Emission von fossilem Kohlenstoff.

Von den Faulgasproben werden ca. 15 L ohne weitere Präparation in einem Kupferoxidofen zu CO_2 verbrannt. Eine chromatographische Abtrennung des in den Rohgasproben bereits enthaltenen CO_2 und eventuell vorhandenen CO (Kohlenmonoxid) erfolgt nicht, da dieses ausschließlich dem mikrobiellen Abbau entstammt.

Für die ^{14}C -Bestimmung wird das bei der Präparation gewonnene CO_2 (sowie bereits vorhandenes CO_2) nach Aufreinigung – d.h. Abtrennung des aus der Verbrennung noch enthaltenen Sauerstoffs und anderer gasförmiger Verbrennungsprodukte – durch Einleiten in eine Absorberflüssigkeit in Lösung gebracht, nach Zugabe einer Szintillatorlösung zu einer Messprobe (Cocktail) angesetzt und in einem Flüssigszintillationsspektrometer (LSC) gemessen. Beim verwendeten Gerät handelt es sich um einen Packard Canberra Tri-Carb 2770 TR/SL. Die Messzeit beträgt ca. 1600 min. Die Bestimmung des biogenen Kohlenstoffgehaltes aus dem ^{14}C -Messwert erfolgt entsprechend den Vorgaben von DIN 15440:2011 Anhang C8 (siehe Kap. 5.1).

Die Bestimmung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des gewonnenen CO_2 erfolgt mittels Isotopenverhältnis-Massenspektrometer (IRMS). Eine $\delta^{13}\text{C}$ -Korrektur des ^{14}C -Messwertes ist bei dieser Messmethode nicht zwingend erforderlich.

Die Bestimmung der Brennwerte (Hs) an einem getrockneten Aliquot der Klärschlämme erfolgte kalorimetrisch nach DIN EN 15170 ohne Säurekorrektur durch die ASG Analytik-Service GmbH in 86356 Neusäss⁹.

Die Zusammensetzung der Faulgase wurde mittels Gaschromatographie (GC) mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) auf Ihre Zusammensetzung hin untersucht. Aus der Gasanalyse wird der Heizwert errechnet.

Die Bestimmung des Gehalts an Biomasse, die Bestimmung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte sowie die Bestimmung der Gaszusammensetzung sind vom Analyselabor nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert. In Tabelle 5 sind die angewandten Messmethoden nochmals zusammengestellt.

Tabelle 5: Übersicht der Messverfahren

Prüfparameter	Prüfverfahren	
Sauerstoff (O_2)	Gaschromatographie GC-WLD	
Stickstoff (N_2)	Gaschromatographie GC-WLD	
Kohlenstoffdioxid (CO_2)	Gaschromatographie GC-WLD	
Methan (CH_4)	Gaschromatographie GC-WLD	
Schwefelwasserstoff (H_2S)	Gaschromatographie GC-WLD	
Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C}$ -TC/-TOC)	Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (IRMS); 1sigma $\pm 0,3$ ‰	
Kohlenstoff-14 (^{14}C -TC/-TOC)	DIN EN 15440; Flüssigszintillationsspektrometrie (LSC); Angabe mit 2sigma-Fehler	
Brennwert Hs (Klärschlamm)	DIN EN 15170 (ohne Säurekorrektur)	*
Heizwert Hu (Faulgas)	berechnet aus Gasanalyse ohne Berücksichtigung von H_2	x

*) Analytik in Kooperation mit ASG Analytik-Service GmbH, Neusäss

x) Berechnung nicht akkreditiert

⁹ vermittelt über AIR Analytik Institut Rietzler GmbH in 90471 Nürnberg

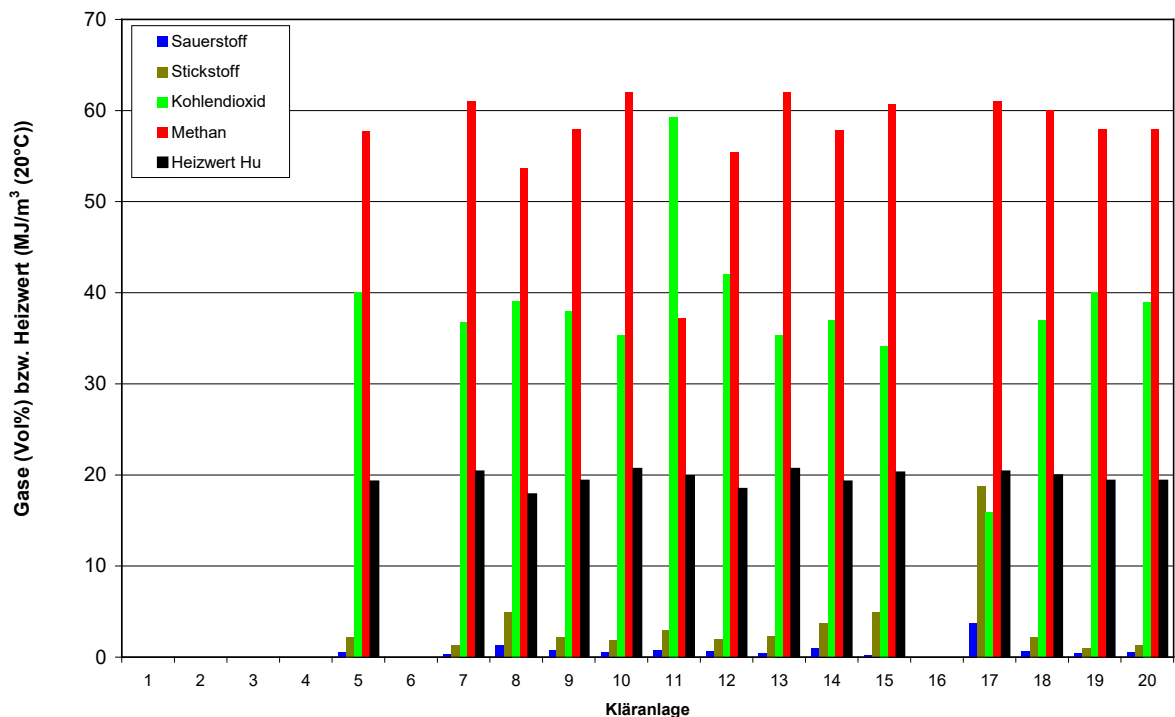
6 Analysenergebnisse mit Auswertung

Alle Analysendaten sind zusammen mit den Datenerhebungen in A Anhang beigelegt.

6.1 Gasanalysen

Die Analyse der Gaszusammensetzung der Faulgase wurde überwiegend am Rohgas und in einigen Fällen am gereinigten Gas (nach Gaswäsche) durchgeführt. Bei diesen Anlagen war der Zugang zum Rohgas erschwert bzw. wurde vom Versand von Rohgas aus Sicherheitsgründen abgesehen. Die Gaswäsche hat bezogen auf die Analyse hauptsächlich Einfluss auf den Schwefelwasserstoffgehalt, der mit <0,5 bis 400 vpm bestimmt wurde. Die Sauerstoffgehalte gehen teilweise auf die Probenahme (ungenügende Spülung der Zuleitung) und teilweise auf oxidative Verfahren der Schlammstabilisierung zurück.

Abbildung 7: Balkendiagramm der Gaszusammensetzung der Faulgase, sortiert nach aufsteigenden Einwohnerwerten



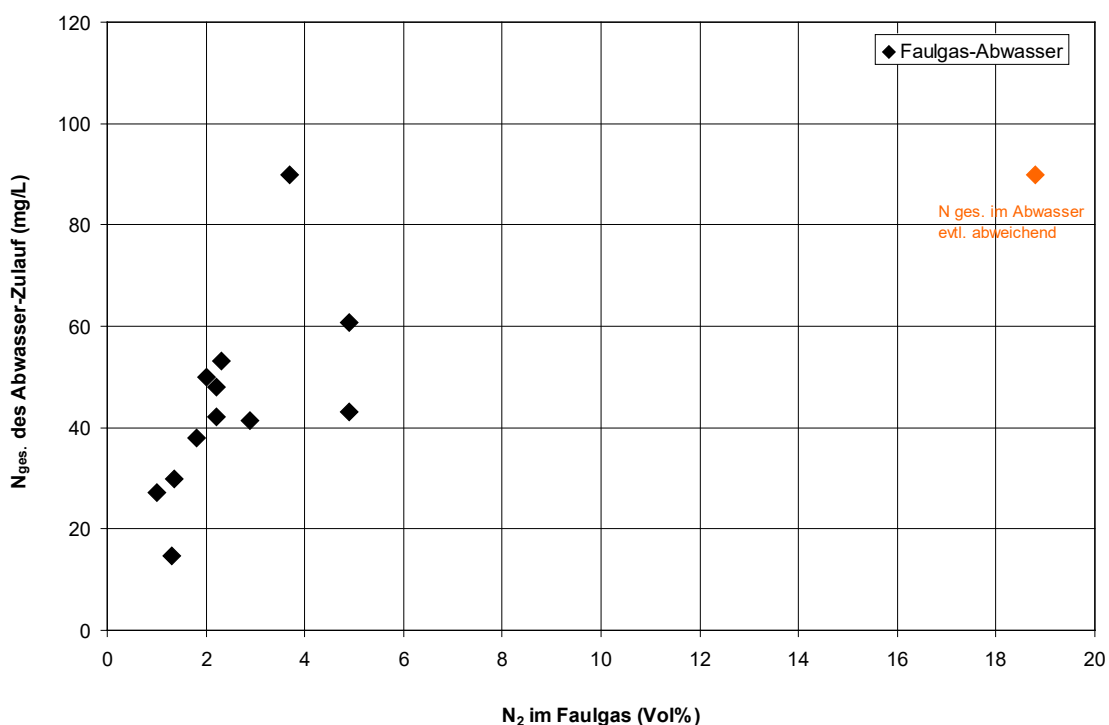
Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

Die typische Verteilung zeigt ein $\text{CH}_4\text{:CO}_2$ -Verhältnis von 3:2, jedoch wurden auch wesentlich höhere und wesentlich geringere CO_2 -Gehalte beobachtet (Abbildung 7). Die Methangehalte wurden innerhalb eines engen Bereichs mit 54 bis 62 Vol% bestimmt. Nur eine Ausnahme wies lediglich 37 Vol% CH_4 auf. Die berechneten Heizwerte (H_u) der Faulgase liegen bei 17,9 bis 20,7 MJ/m^3 (20°C). Die Verteilungen von CH_4 und CO_2 werden vorrangig durch die verschiedenen Zeitpunkte der Beprobung erklärt. Es gab keine Vorgabe hinsichtlich des Probenahmezeitpunktes. Die Faultürme werden z.T. kontinuierlich und z.T. schubweise bestückt und entleert. Der durchschnittliche Verbleib des Faulschlammes im Faulturm, der von der Dimensionierung und weiteren technischen Details der Faultürme abhängt, wurde seitens der Klärwerke mit 3 bis 40 Tage (Mittelwert 24) angegeben.

Weitere Aspekte, die die Zusammensetzung der Faulgase bestimmen, sind durch die Abwässer und deren organischer Fracht sowie der Schlammgewinnung und -stabilisierung bedingt. Wesentlich ist auch, wie effektiv bereits im Vorfeld der Abbau der Organik in den Belebungsbecken abläuft.

Von besonderem Interesse ist der Gehalt an Stickstoff im Faulschlamm, da leicht abbaubare Organik einen höheren Stickstoffgehalt aufweist als schwer abbaubare Organik (hier besonders fossile Organik) (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). Eine schwache Korrelation zwischen den gemessenen Stickstoffgehalten im Faulgas zu den Gesamtstickstoffgehalten der Abwassereinleitungen kann beobachtet werden (Abbildung 8), jedoch keine Korrelation zwischen Stickstoff und dem biogenen Anteil (siehe Kap. 6.3.5 und Abbildung 14). Der abweichend hohe Stickstoffgehalt im Gas der Anlage mit Anschluss eines Chemieparks (18,8 Vol%) ist durch das speziell genutzte Abwasser bedingt.

Abbildung 8: Darstellung des gemessenen Stickstoffgehalts (N_2) im Faulgas in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Abwassers ($\text{N}_{\text{ges.}}$) entsprechend der Angaben der Kläranlagen



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

6.2 Ergebnisse der $\delta^{13}\text{C}$ -Bestimmung

Alle Klärschlämme und Faulgase wurden auf die Isotopenwerte des Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C}$) am organischen Kohlenstoff (C_{org} bzw. TOC) bzw. am Gesamtkohlenstoff (CO_2 und CH_4) hin untersucht, um einerseits die ^{14}C -Analyse kontrollieren zu können und andererseits Hinweise auf die unterschiedliche Herkunft des Kohlenstoffs zu erhalten. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Faulgas und im Klärschlamm werden geprägt durch die $\delta^{13}\text{C}$ -Signatur des Ausgangsmaterials und der Abbau- und Umbauprozesse.

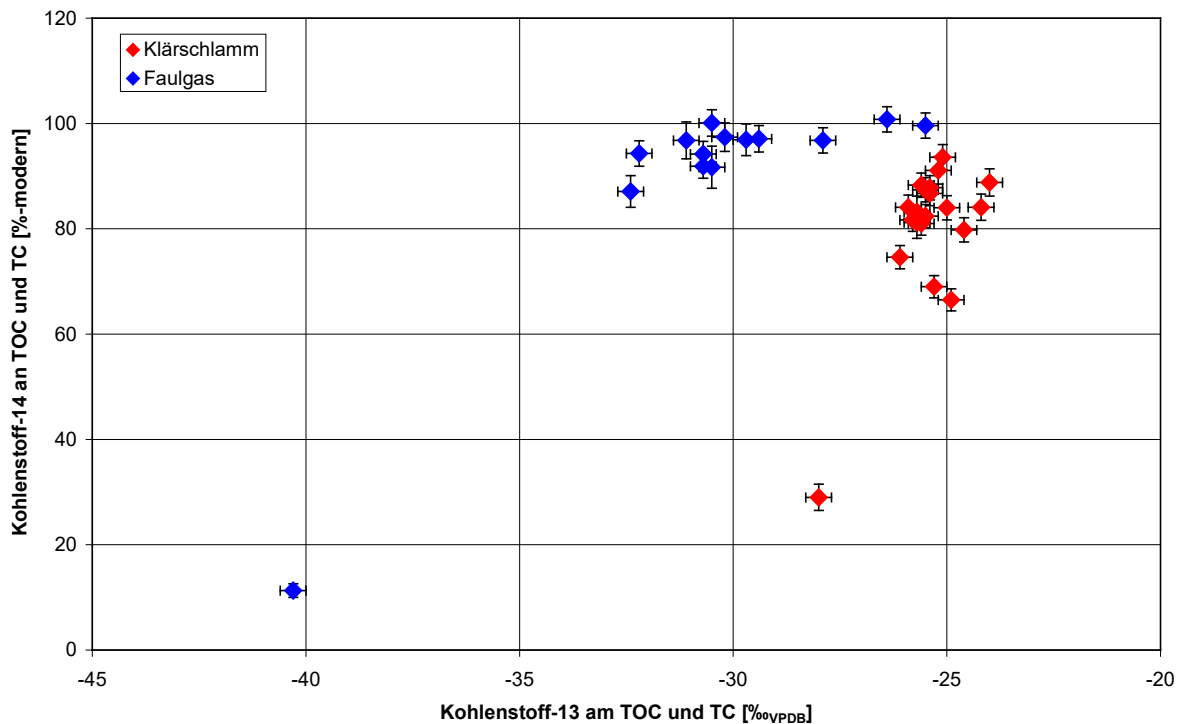
Pflanzliches und tierisches Material im Rohzustand zeigt mittlere $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von -24 bis -28 ‰_{VPDB}, hiervon weichen C4-Pflanzen durch schwerere Werte ab. Einzelne Substanzklassen des organischen Materials (z.B. Zucker, Fette), insbesondere jene des pflanzlichen Sekundärstoffwechsels (z.B. Phenole, Lignine) können deutlich negativere („leichtere“) oder positivere („schwerere“) Werte aufweisen.

Gasförmiges Methan (CH_4) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus dem mikrobiellen Abbau von organischem Material zeigt negativere Isotopenwerte, da Bakterien immer die leichten Isotope bevorzugen. Dementsprechend ist auch in allen Faulgasproben ein leichterer Isotopenwert als im Klärschlamm zu beobachten. Der Isotopenwert nähert sich jedoch mit zunehmendem Abbau dem der Ursprungssubstanz (hier Nassschlamm) an. Dies ist eine Erklärung dafür, dass zwei der Faulgase eine schwere Isotopensignatur von >-26 ‰_{VPDB} zeigen, die dem Wertebereich der Klärschlämme entspricht. Bei ähnlicher Klärschlammzusammensetzung ist der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert des Faulgases als Indiz der Ausfäulung zu betrachten. Jedoch kann auch eine abweichende Herkunft des organischen Materials eine abweichende Signatur des Faulgases bedingen. So weicht sowohl der Klärschlamm als auch das Faulgas der Gemeinschaftskläranlage (KA 17) mit Anschluss eines Chemieparks durch wesentlich leichtere Isotopenwerte ($-40,3$ ‰_{VPDB} im Faulgas) ab, was auf Rohstoffe aus Erdöl und Kohle hinweisen kann, aber auch auf chemische Produkte, die aufgrund der Produktionsweise spezifische Isotopensignaturen aufweisen.

Zwei weitere Faulgasproben mit tendenziell leichteren Isotopensignaturen von -32,2 und -32,4 ‰_{VPDB} (KA 15 und 18) entstammen dagegen nicht Klärwerken, die relevante Einleitungen aus der chemischen Industrie erhalten. Zwar ist in Abbildung 9 eine Tendenz der Korrelation des ^{14}C -Gehaltes von Faulgas und Klärschlamm mit den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten erkennbar, diese ist jedoch nicht numerisch einzugrenzen. Diese Korrelation ist dadurch erklärbar, dass rezente, frische Biomasse leichter abzubauen ist und eine schwerere Isotopensignatur im $\delta^{13}\text{C}$ aufweist als fossile Kohlenwasserstoffe.

Die Bestimmung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte können herangezogen werden, um Hinweise auf hohe Anteile von Abwässern aus der chemischen Industrie zu identifizieren. Da es sich hier jedoch um einen analytischen Parameter handelt, der bei gängigen Kläranlagen nicht erhoben wird, wird er nicht für eine Charakterisierung von Klärschlämmen und Faulgasen vorgeschlagen.

Abbildung 9: Darstellung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte am TOC (Klärschlamm) und TC (Faulgas) in Abhängigkeit von den ^{14}C -Messwerten



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

6.3 Biogener Anteil von Klärschlamm und Faulgas

6.3.1 Ermittelte Analysenwerte

In den 20 Klärschlammproben wurden ^{14}C -Gehalte von $29,0 \pm 2,5$ bis $93,6 \pm 2,4$ %-modern bestimmt, in den 14 Faulgasproben ^{14}C -Gehalte von $11,3 \pm 1,3$ bis $100,8 \pm 2,4$ %-modern (Tabelle 6, Abbildung 10). Dies entspricht – bezogen auf den Korrektionsfaktor für 2008 (s. Kap. 5.1) – biogenen Kohlenstoffanteilen C_{bio} von ca. 28 bis 89 % im Klärschlamm und ca. 11 bis 96 % im Faulgas.

Berücksichtigt man die Unsicherheiten bei der Abschätzung des ^{14}C -Gehaltes der Atmosphäre in 2016 sowie Anteile an älterer Biomasse wie z.B. Altpapier, so enthalten alle Klärschlammproben fossile Anteile an Kohlenstoff (C_{fossil}) von mindestens 10 %. Bei den Faulgasen dagegen sind deutlich höhere ^{14}C -Gehalte zu beobachten, die an 100 % biogen nahe heranreichen. Im Durchschnitt enthält der Klärschlamm 5 bis 20 % mehr fossilen Kohlenstoff als die Faulgase.

Tabelle 6: Übersicht der Kläranlagen mit gewerblichem Anteil und der ^{14}C -Messwerte sowie C_{bio} -Werte der Klärschlamm- und Faulgasproben

KA	Mittlere Auslastung (gerundet)	Einwohnerzahl (EZ)	Anteil Gewerbe (berechnet) %	Klärschlamm		Faulgas	
	(EW)			^{14}C -TOC (%-mod.)	C_{bio} (%)	^{14}C -TC (%-mod.)	C_{bio} (%)
1	66	172	0	84,1 ± 2,3	80		
2	2.100	300	86	74,6 ± 2,2	71		
3	2.800	1.780	36	93,6 ± 2,4	89		
4	2.800	2.035	27	81,7 ± 2,2	78		
5	16.100	9.021	44	81,2 ± 3,0	77	99,6 ± 2,4	95
6	28.800	17.684	39	88,8 ± 2,6	85		
7	35.000	k.A.	0	86,7 ± 2,3	83	96,9 ± 3,0	92
8	37.200	30.869	17	87,4 ± 2,3	83	97,1 ± 2,5	93
9	39.100	40.860	0	81,0 ± 2,2	77	94,2 ± 2,4	90
10	40.300	33.000	18	84,0 ± 2,3	80	97,4 ± 2,7	93
11	56.600	44.600	21	83,2 ± 3,0	79	96,8 ± 3,5	92
12	66.700	66.828	0	82,4 ± 2,2	79	96,8 ± 2,4	92
13	82.600	49.500	40	91,1 ± 2,6	87	100,8 ± 2,4	96
14	90.000	60.000	33	88,3 ± 2,3	84	100,1 ± 2,5	95
15	110.000	95.000	14	84,1 ± 2,5	80	94,3 ± 2,4	90
16	284.000	175.385	36	87,8 ± 2,3	84		
17	510.000	65.892	87	29,0 ± 2,5	28	(11,3 ± 1,3)	(11)
18	1.300.000	1.150.000	12	79,8 ± 2,3	76	87,1 ± 3,0	83
19	1.500.000	709.546	52	66,5 ± 2,1	63	(91,9 ± 2,3)	(88)
20	1.750.000	887.869	49	69,0 ± 2,1	66	(91,7 ± 4,0)	(87)

(...): Faulgasprobe nicht direkt zugehörig zur Klärschlammprobe

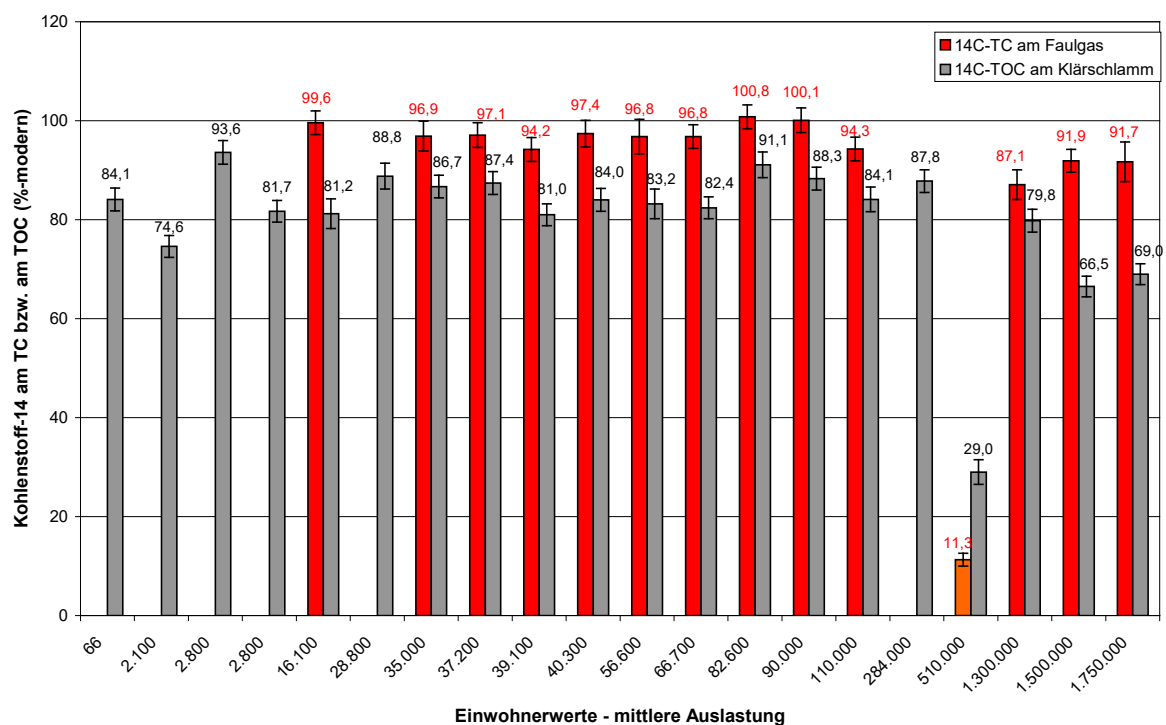
C_{bio} : berechnet über Korrektionsfaktor für 105 pmC

k.A. keine Angabe

Anteil Gewerbe berechnet als Differenz von mittlerer Auslastung und Einwohnerzahl

Die höheren biogenen Kohlenstoffanteile im Faulgas sind dadurch zu erklären, dass biogener Kohlenstoff überwiegend leichter abbaubar ist und somit bei der Ausfäulung des Schlammes noch zu CO₂ und CH₄ abgebaut wird. Die hierin abweichende Probe der Kläranlage 17 mit Abwasser aus einem Chemiapark zeigt im Faulgas einen geringeren biogenen Anteil, da in dieser Kläranlage verschiedene Teilströme des Abwassers separat behandelt werden. So wird den Faultürmen nur ein Teil des Klärschlammes (vorrangig Klärschlamm des Chemiaparks) zugeführt, aus denen Gas mit besonders hohem Heizwert gewonnen wird. Gemäß Telefongesprächen mit anderen Chemiaparks wird die Gewinnung hoch effektiver Faulgase aus besonderen Abwässern angestrebt, sofern es Einleiter mit derartigen Abwässern gibt.

Abbildung 10: Balkendiagramm der ¹⁴C-Gehalte in Klärschlamm und Faulgas, sortiert nach Einwohnerwerten



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

Der Vergleich der fossilen Anteile in Klärschlamm und Faulgas erbringt keine klare Abhängigkeit von den Einwohnergleichwerten oder von den Einwohnerzahlen (s. auch Kap. 6.3.3). Höhere fossile Kohlenstoffanteile werden in Kläranlagen jeder Größe beobachtet.

Auch ist keine Abhängigkeit des Ausfäulungsgrades des Klärschlammes, d.h. der Zustand, in dem der Klärschlamm der Weiterverarbeitung zugeführt wird, zu beobachten (siehe auch Abbildung 11). Die in Flüssigform gelieferten Proben der Kläranlagen (Anlage 1 bis 4, 6 und 16) ohne eigene Faultürme sind daran zu erkennen, dass keine Faulgasanalysen durchgeführt wurden (Abbildung 10). Außerdem wurden die Klärschlämme der Anlagen 19 und 20 in flüssiger Form, d.h. nicht ausgefäultem Zustand, bereitgestellt.

6.3.2 Trenn- und Mischkanalisation

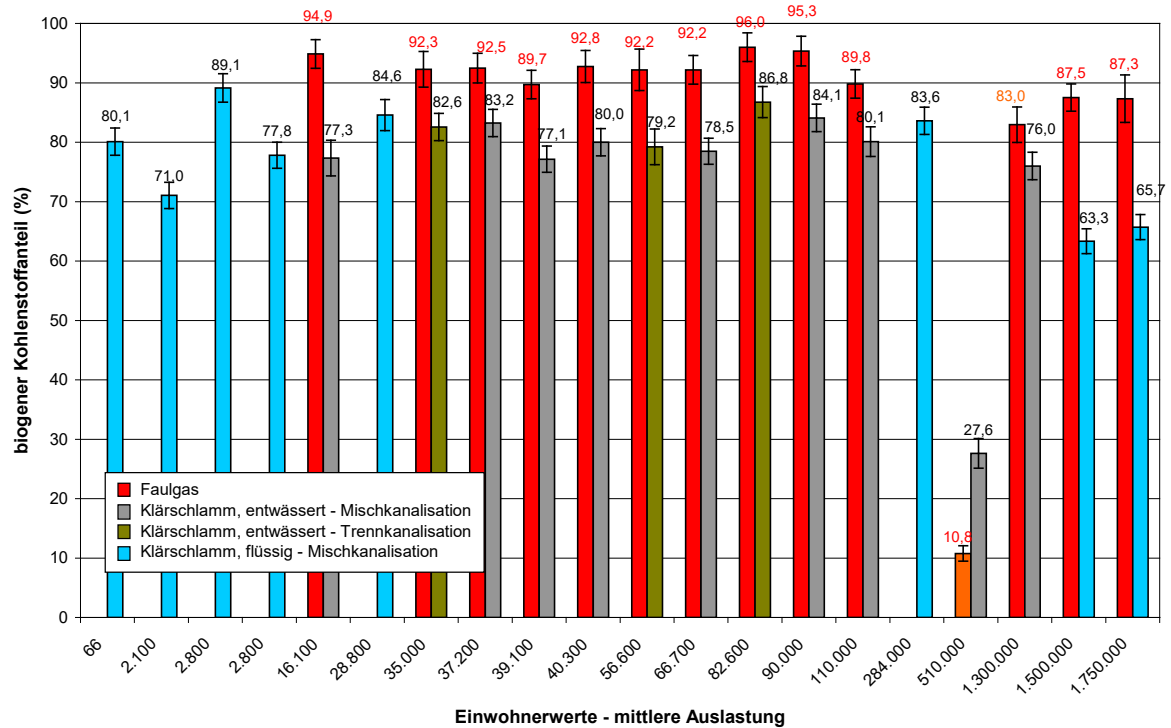
Lediglich zwei der Kläranlagen gaben an, ausschließlich Abwasser aus Trennkanalisation zu erhalten. Eine weitere Kläranlage (KA 7) ist als Trennkanalisation angegeben, der Betreiber vermutet jedoch einen hohen Fremdwasseranteil. Alle übrigen Anlagen erhalten Abwasser weitgehend aus Mischkanalisation.

Eine These zum signifikanten Beitrag von fossilem Kohlenstoff im Klärschlamm diskutiert den Beitrag von Straßenabrieb und Straßenstaub, der erhebliche Mengen an z.B. polyzyklischen Kohlenwasserstoffen (PAK) enthalten kann. Diese fossilen Kohlenwasserstoffe können dann über tensidhaltige Abwässer in Lösung gehen und schlussendlich zum fossilen Kohlenstoffanteil im Klärschlamm beitragen. Abwasser aus Trennkanalisation, wo die über befestigte Straßen und Flächen abfließenden Niederschläge nicht enthalten sind, sollte dieser These nach also höhere biogene Kohlenstoffanteile aufweisen, sofern dieser Kohlenstoffanteil mengenmäßig eine Rolle spielt.

Die zwei Kläranlagen 11 und 13 mit ausschließlicher Trennkanalisation zeigen biogene Kohlenstoffanteile von ca. 79 und 87 %, Kläranlage 7 zeigt 83 %. Sie zeichnen sich damit im Vergleich zu anderen Kläranlagen nicht durch besonders geringe fossile Anteile aus (Abbildung 11). Dem Verkehr – Straßenabrieb und Straßenstaub – wird dementsprechend kein signifikanter Einfluss auf die Klärschlammzusammensetzung zugesprochen, d.h. es können keine erhöhten fossilen Kohlenstoffanteile in Klärschlämmen aus Mischkanalisation beobachtet werden. Hierbei ist berücksichtigt, dass Regenwasser neben Stoffeinträgen von Straßenstaub und –abrieb auch Stoffeinträge von Pflanzen- (Blüten, Pollen, Laub etc.) und Tierüberresten (Insekten etc.) erhält. Eine detaillierte Beweisführung zum Einfluss von Verkehr auf die fossilen Kohlenstoffanteile von Klärschlamm ist jedoch nur in aufwändigen Untersuchungen mit höherer Probenanzahl möglich.

Weitere Vergleiche hinsichtlich des Einflusses von Oberflächenabfluss, industrieller Flächennutzung und Verkehr wurden über die Angaben von Trockenwetterabfluss, Schmutz- und Abwasseraufkommen pro Jahr angestellt, doch keinerlei Zusammenhänge mit den ermittelten biogenen Kohlenstoffgehalten vorgefunden.

Abbildung 11: Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas als Balkendiagramm mit farblicher Unterscheidung von Kläranlagen mit Misch- oder Trennkanalisation sowie Beschaffenheit der Probe (feucht/entwässert)



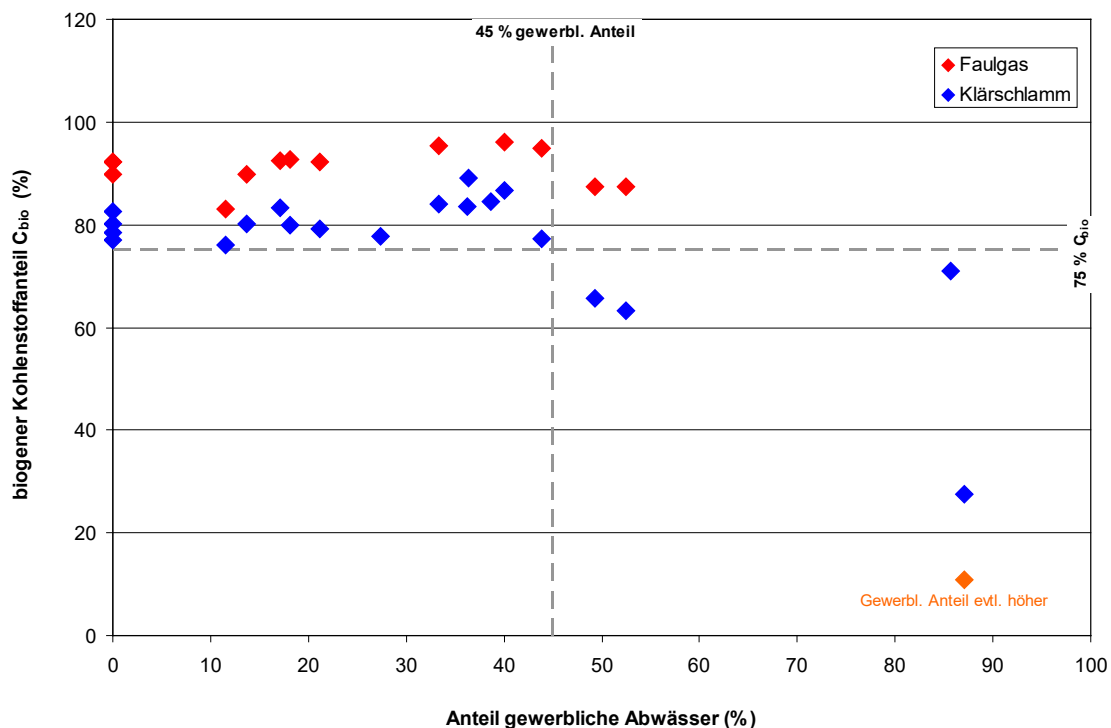
Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

6.3.3 Gewerbliche Abwässer

Die in dieser Studie untersuchten zwanzig Kläranlagen wurden im Hinblick auf verschieden hohe Beimischungen von gewerblichen Abwässern (Indirekteinleiter) verschiedener Industrie- und Gewerbebereiche hin ausgewählt (siehe Kap. 2.1 und 3).

Vergleicht man den gewerblichen Anteil der Abwässer der Kläranlagen, berechnet als Differenz aus mittlerer Auslastung und Einwohnerzahl (siehe auch Tabelle 3), mit den biogenen Anteilen von Klärschlamm und Faulgas, so ist erst ab hohen Anteilen von mehr als 45 % eine Tendenz zu geringeren biogenen Anteilen ($<75\% C_{bio}$) vermerkbar, jedoch keine eindeutige Korrelation (Abbildung 12). Bei Null bis 45 % ist kein Einfluss durch die Höhe des gewerblichen Abwasseranteils auf den biogenen Kohlenstoffanteil im Klärschlamm zu verzeichnen.

Abbildung 12: Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit des gewerblichen Anteils an Abwasser (berechnet als Differenz aus mittlerer Auslastung und EZ); Hilfslinien zeigen die Bereiche von größer/kleiner 45 % gewerblichem Anteil bzw. größer/kleiner 75 % C_{bio} im Klärschlamm.



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

Der mit den Einwohnerwerten gewichtete Mittelwert der 16 Kläranlagen mit einem gewerblichen Anteil $<45\%$ berechnet sich mit $78,5\%$ biogenen Kohlenstoffanteil für Klärschlamm (gerundet 80%) und 86% für Faulgas (gerundet 85%). Hierbei ist anzumerken, dass die große Kläranlage 18 einen starken Einfluss auf den gewichteten Mittelwert ausübt.

6.3.4 Abwassergruppen der verschiedenen Gewerbe

Die Abwasserklassen der Abwasserverordnung (AbwV) wurden entsprechend der Erwartung von dominierenden Anteilen an fossilem Kohlenstoff im Abwasser in fünf Gruppen eingeteilt (siehe Kap. 3). Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass der fossile Kohlenstoffanteil der Klärschlämme im Wesentlichen erst ab einer gewerblichen Abwassereinleitung im Bereich von mehr als 45 % kenntlich ist. Das gewerbliche Abwasser der Kläranlagen 17, 19 und 20 ist zu einen größeren Teil den Abwasserklassen 4 und 5 zuzuordnen, während das gewerbliche Abwasser der Kläranlage 2 im Bereich der Abwasserklassen 2 und 3 angesiedelt ist. Anhand einzelner Kläranlagen mit hohem Abwasseranteil aus der jeweiligen Gruppe wird im Folgenden ein verstärkter Einfluss der Abwassereinleiter im Detail bewertet.

Gruppe 1: Häusliches und kommunales Abwasser

Mit Ausnahme der Kläranlagen 2, 17, 19 und 20 erhalten die Kläranlagen Abwasser aus Gruppe 1 von mehr als 45 %, d.h. kommunale Abwässer. Entsprechend den Angaben der Betreiber sind in den Kläranlagen 1, 7, 9, 12 und 18 weniger als 12 % gewerbliche Indirekteinleiter hinsichtlich der organischen Kohlenstoffanteile vorhanden. Die Klärschlämme dieser Kläranlagen weisen biogene Kohlenstoffanteile von 76 bis 83 % auf. Zwar ist z.T. für diese Kläranlagen auch Gewerbe der Bereiche Schwerindustrie, Maschinenbau etc. angegeben, der die hohen fossilen Kohlenstoffanteile erklären könnte, jedoch nur mit stark vernachlässigbarem Kohlenstoffeintrag im Abwasser. Es ist daher anzunehmen, dass häusliche und kommunale Abwässer im Jahr 2016 fossile Kohlenstoffanteile im Klärschlamm von 17 bis 24 % verursachen. Dies wird insbesondere an Kläranlage 1, einem Bauerndorf mit 172 Einwohnern, und einem fossilen Kohlenstoffanteil im Klärschlamm von ca. 80 % nachgewiesen. Als Ursache sind hier Reinigungs- und Pflegemittel (Körperpflege, Textil, Küche, Bad, Böden) der häuslichen Abwässer als dominierender Eintrag die wahrscheinlichste Ursache für fossilen Kohlenstoff, von gelegentlichen Fehleinleitungen (Öle, Farben etc.) abgesehen. Nur bei einer zunehmenden Umstellung der Rohstoffe bei der Produktion von Reinigungsmitteln von fossilen zu nachwachsend produzierten Rohstoffen ist eine Abnahme der fossilen Kohlenstoffanteile im Abwasser zu erwarten. Angesichts der geringen Größe der Kläranlage ist jedoch auch von größeren Schwankungen im biogenen Kohlenstoffgehalt des Klärschlammes auszugehen.

Die Faulgase der Kläranlagen 7, 9, 12 und 18 wiesen biogene Kohlenstoffanteile von ca. 83 bis 92 % auf, also ebenfalls höhere Gehalte an fossilem Kohlenstoff. Der fossile Kohlenstoffanteil im Faulgas ist durchschnittlich ca. 10 % höher als derjenige der zugehörigen Klärschlämme.

Gruppe 2: Lebens-/Futtermittelproduktion

Betrachtet man Kläranlagen mit hohen Abwassereinleitungen der Gruppe 2 (Lebensmittelproduktion, Brauereien, Gastronomie und Hotellerie), so ist insbesondere Kläranlage 10 zu nennen, aber auch die Kläranlagen 2, 11 und 15. Auch die drei größten Kläranlagen erhalten jeweils 12 bzw. 28 % an EGW aus Abwässern der Lebensmittelproduktion und Brauereien. Bei den großen Kläranlagen sind jedoch andere gewerbliche Abwässer stärker bestimmend. Kläranlage 10 einer mittleren Kleinstadt, wo saisonal und episodenhaft je nach Produktion bis zu 40 % aus der Lebensmittelproduktion stammen können, wird der biogene Kohlenstoffanteil mit 80 % im Klärschlamm bestimmt. Kläranlage 2 behandelt Abwasser aus einer landwirtschaftlichen Ortschaft mit Autohof, wo neben der Gastronomie möglicherweise noch Einflüsse von einer Fahrzeugwaschanlage (Abwasser Gruppe 3, s.u.) erwartet werden dürfen, wenngleich diese eine Vorklärung durchführt. Kläranlage 11 ist außer durch Gastronomie, Hotellerie und Brauerei zusätzlich noch stark über eine Papierfabrik belastet. Kläranlage 15 einer Stadt mit größerem Anschluss des ländlichen Umfeldes schätzt bei insgesamt nur ca. 13 % angegebenen gewerblichen Indirekteinleitern einen Entfall von 10 % auf die Lebensmittelproduktion und Brauerei. Der ermittelte Wert für den biogenen Kohlenstoffanteil mit 80 % unterscheidet sich damit nicht von Kläranlagen mit Dominanz von Abwässern aus Gruppe 1 und 2. Auch bei der Lebensmittelindustrie und Brauwirtschaft wird neben den Einflüssen der biogenen Rohstoffe auf die Abwässer ein verstärkter Eintrag von Reinigungsmitteln in den Fertigungsanlagen sowie durch die Flaschenreinigung angenommen. Abwässer der Gastronomie und Hotellerie entsprechen, wenn nicht sogar mit verstärktem Einsatz von Reinigungsmitteln zu rechnen ist, häuslichen Abwässern. Die Faulgase von Kläranlage 10 mit einem biogenen Kohlenstoffanteil von ca. 93 % und von Kläranlage 15 mit ca. 90 % liegen geringfügig höher als die dominierend kommunal geprägten Anlagen, was möglicherweise auf die leichter abbaubaren Substanzen der Lebensmittelproduktion zurückzuführen ist.

Gruppe 3: gemischte Produktion

Betrachtet man Kläranlagen, wo höhere Belastungen durch Gewerbe der **Gruppe 3** (z.B. Wäschereien, Papierproduktion, Textilproduktion) vorliegen, so ist vorrangig bereits die oben genannte Kläranlage 11 mit bis zu 25 % Abwasserfracht aus der Papierproduktion zu nennen. Kläranlage 5 erhält möglicherweise ca. 30 % aus der Textilindustrie. Außerdem sind die Kläranlage 2 (Fahrzeugwaschanlage, jedoch Vorklärung), Kläranlage 6 (Textilveredelung), Kläranlage 8 (Druckerzeugnisse) und Kläranlage 16 (Wäschereien, Kautschuk/Latex-Verarbeitung) nicht mit Dominanz, aber immerhin mit höheren Anteilen von Abwässern für diese Gruppe zu nennen. Kläranlage 11 zeigt mit 79 % biogenem Kohlenstoff im Klärschlamm und 92 % im Faulgas einen mit kommunalen Abwässern vergleichbaren Anteil im oberen Bereich.

In der Papierproduktion wird in höherem Maße anorganischer Kalk eingesetzt, der somit im Abwasser hohe Anteil an anorganischem Kohlenstoff erwartet lässt. Wenngleich eine mikrobielle Umsetzung oder Austausch von anorganischem Kohlenstoff nicht zu erwarten ist, war dennoch ein möglicher Stoffstrom des ^{14}C -freien anorganischen Kohlenstoffs zu betrachten. Weder im Faulgas noch im Klärschlamm ist ein Stoffstrom aus dem anorganischen Kohlenstoff ersichtlich. Auch die Messwerte des $\delta^{13}\text{C}$ zeigen keine signifikante Beteiligung von anorganischem Kohlenstoff im Klärschlamm – anorganischer Kohlenstoff zeigt typischerweise signifikant negativerer $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (s. Kap. 1.3).

Kläranlage 5 mit nur ca. 77 % biogenem Anteil im Klärschlamm und ca. 95 % im Faulgas dagegen könnte ein Kandidat für erhöhte fossile Anteile im Abwasser sein, die auf den Einsatz von Produkten aus fossilen Rohstoffen durch die Textilindustrie hinweist. Hier kann es sich um Farben und Tenside handeln, aber auch um Textilrohstoffe selbst. Jedoch muss beachtet werden, dass Kläranlage 5 im Einzugsgebiet weitere Industrien im Bereich des Maschinenbaus beheimatet, die jedoch von der Kläranlage als unbedeutende Indirekteinleiter genannt werden.

Die Kläranlagen 2, 6, 8 und 16 zeigen biogene Anteile im Klärschlamm von ca. 71 bis 85 % und im Faulgas (nur Kläranlage 8) von ca. 93 % auf. Dementsprechend wäre nur Anlage 2 sowohl mit hohem Anteil Abwasser aus Gastronomie (Gruppe 2) als auch möglicherweise aus Waschanlagen ein potentiell Beispiel für starke fossile Kohlenstoffanteile aus Reinigungsmitteln.

Gruppe 4: Fossile Energieträger

Kläranlagen mit Indirekteinleitern aus Gruppe 4 sind nur bei den großen Anlagen 19 und 20 gegeben, die Einträge von ca. 12 % an EWG aus dieser Gruppe abschätzen. Vernachlässigbare Anteile werden auch für Anlage 8 angegeben. Häufig betreiben Unternehmen dieser Abwassergruppe betriebseigene Kläranlagen. Ebenso wie Anlagen mit hohen Abwassereinträgen aus Gruppe 5 sind hier zumindest für die schwer abbaubaren Verbindungen hohe Anteile an fossilem Kohlenstoff im Abwasser zu erwarten. Nicht zu vernachlässigen ist aber, dass Rückstände aus Gewerbe im Bereich fossiler Energieträger überwiegend nicht gelöst vorliegen, sondern bereits über Öl- und Fettabscheider dem Abwasser entzogen werden. Weiterhin kann eine Vorreinigung durch CP-Anlagen (chemisch-physikalische Abfallbehandlungsanlagen) mit Fällung und Abpressung der organischen Fracht erfolgt sein.

Gruppe 5: Chemische und mineralische Produktion und Verarbeitung

Gruppe 5 vereinigt Abwässer aus der chemischen und mineralischen Produktion sowie des Maschinenbaus. Neben den großen Kläranlagen 19 und 20 mit ca. 25 % Beteiligung EGW des gesamten Abwasserzustroms tritt besonders die Gemeinschaftskläranlage aus kommunalem Abwasser und Abwasser eines Chemieparks mit 87 % der EGW hervor. Die relativ kleinen Kläranlagen 8 und 9 erhalten neben ihrer deutlichen Dominanz an kommunalen Abwässern gewerbliche Anteile ebenfalls aus der Gruppe 5.

Die Kläranlage 17 mit Dominanz der Chemieindustrie zeigt mit einem geringen biogenen Anteil von 28 % im Gesamtklärschlamm deutlich die fossile Herkunft der organischen Fracht im Abwasser. Die Faulgasgewinnung eines Teilstroms der Abwasserbehandlung weist mit nur ca. 11 % noch geringere biogene Kohlenstoffanteile auf. Auch bei den Kläranlagen 19 und 20 werden die verringerten biogenen Kohlenstoffanteile im Klärschlamm von ca. 63 bis 66 % auf Abwässer der Gruppe 5 (und 4) zurückgeführt. Die Faulgase mit 87-88 % biogenem Anteil zeigen auch bei den leichter abbaubaren Verbindungen fossile Rohstoffe an. Überraschend werden diese verringerten biogenen Kohlenstoffanteile im Faulgas von der dritten großen Kläranlage 18 ohne nennenswerte Beteiligung von Abwässern aus Gruppe 4 und 5 mit einem Anteil von nur 83 % deutlich unterschritten. Hierbei ist der Verbleib des Schlammes im Faulturm mit nur 20 Tagen deutlich unterhalb der 23 bis 30 Tage der Anlagen 19 und 20. Jedoch liegt ein Mehrfaches der Faulgasgewinnung in Anlage 18 vor, also ein weitaus höherer Anteil an noch mikrobiell abbaubaren Kohlenstoffverbindungen. Hier ist ein starker Einfluss der Behandlungsverfahren der Kläranlagen und der Kanal- bzw. Abwasserzuführung anzunehmen.

Die kleine Kläranlage 9 zeigt mit ca. 77 % biogenem Kohlenstoffanteil im Klärschlamm, also ebenfalls signifikanten fossilen Kohlenstoffanteilen, möglicherweise Hinweise auf Abwässer der Gruppe 5. Bei Kläranlage 8 ist mit 83 % biogenem Anteil im Klärschlamm weder Abwasser aus Gruppe 4 noch 5 zuordbar. Ob bei der dörflichen Kläranlage 4 Abwasser aus der Kunststofftechnik, Metallbau oder doch eine sporadische Fehleinleitung für den verringerten biogenen Anteil von ca. 78 % verantwortlich ist, kann nicht ausgesagt werden.

Bei den bislang nicht genannten Kläranlagen ist keine Einordnung vorrangiger gewerblicher Abwässer in die fünf Gruppen bekannt.

Insgesamt zeigen die Auswertungen der biogenen Kohlenstoffanteile im Klärschlamm und Faulgas im Hinblick auf Einflüsse durch kommunale und verschiedene gewerbliche Abwässer, dass

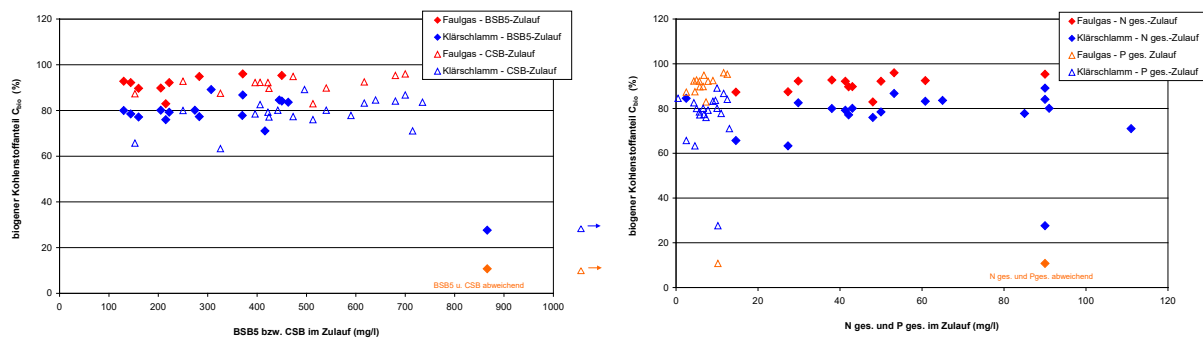
- ▶ überwiegend häuslich-kommunale Abwässer, aber auch kommunale Abwässer mit signifikanten Beimischungen von gewerblichen Abwässern aus Gastronomie, Lebensmittelindustrie, des Brauwesens, der Papierindustrie, Textilindustrie, Wäschereien u.ä. (Gruppe 1, 2 und 3) rund 10 bis 30 % fossilen Kohlenstoff im Klärschlamm und etwa 5 bis 20 % im Faulgas aufweisen;
- ▶ Klärschlämme von Abwässern aus der Chemischen Industrie starke, aufgrund der hier erhobenen Daten nicht vorhersagbare Anteile an fossilem Kohlenstoff enthalten;
- ▶ Kläranlagen mit Indirekteinleitern aus chemischer und mineralogischer Produktion, Schwerindustrie, Maschinenbau und Bereichen der fossilen Energieträger (Gruppe 4 und 5) nur geringe Erhöhungen des fossilen Anteils im Klärschlamm (maximal 37 %) über kommunale Abwässer hinaus aufweisen bzw. im Faulgas mit maximal 13 % nicht auffällig sind;
- ▶ die fossilen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas nicht mit der Auslastung einer Kläranlage bezogen auf Einwohnerwerte im Hinblick auf die Verteilung von kommunalem und gewerblichem Anteil sowie der Art der Gewerbe in Korrelation gebracht werden können.

6.3.5 Abwasserbasiswerte, Klärschlammanalysewerte und Gasanalysewerte im Vergleich mit den biogenen Anteilen

Die Basiswerte, die von Kläranlagen für den Betrieb verwendet werden, sind die in Zu- und Ablauf des Abwassers bestimmten Werte des BSB5 (biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen), des CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) sowie die Stickstoff- und Phosphor-Gesamtgehalte (N ges., P ges.). Viele Anlagen ermitteln ihre Einwohnerwerte anhand der BSB5- oder CSB-Werte. Je nach Jahreszeit und gewerblichen, saisonal arbeitenden Gewerben können diese Basiswerte in einem gewissen, jeder Kläranlage bekannten Wertebereich schwanken.

Unter der Annahme, dass frische, biogene Biomasse leichter abbaubar ist, wurde vom Vergleich der Basisparameter von BSB5, CSB und N ges. eine Abhängigkeit zum biogenen Kohlenstoffgehalt in Faulgas und Klärschlamm erwartet. Der Parameter P ges., der u.a. beim Gebrauch von Reinigungsmitteln in das Abwasser gelangt, sollte dagegen mit dem Gehalt an fossilem Kohlenstoff korrelieren. Der Vergleich der von den Anlagenbetreibern mitgeteilten Werte ihrer Abwässer mit den bestimmten biogenen Kohlenstoffanteilen zeigt jedoch keinerlei Abhängigkeiten (Abbildung 13).

Abbildung 13: Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit der Basisparameter des Abwassers (Zulauf) von BSB5, CSB, N ges. und P ges.

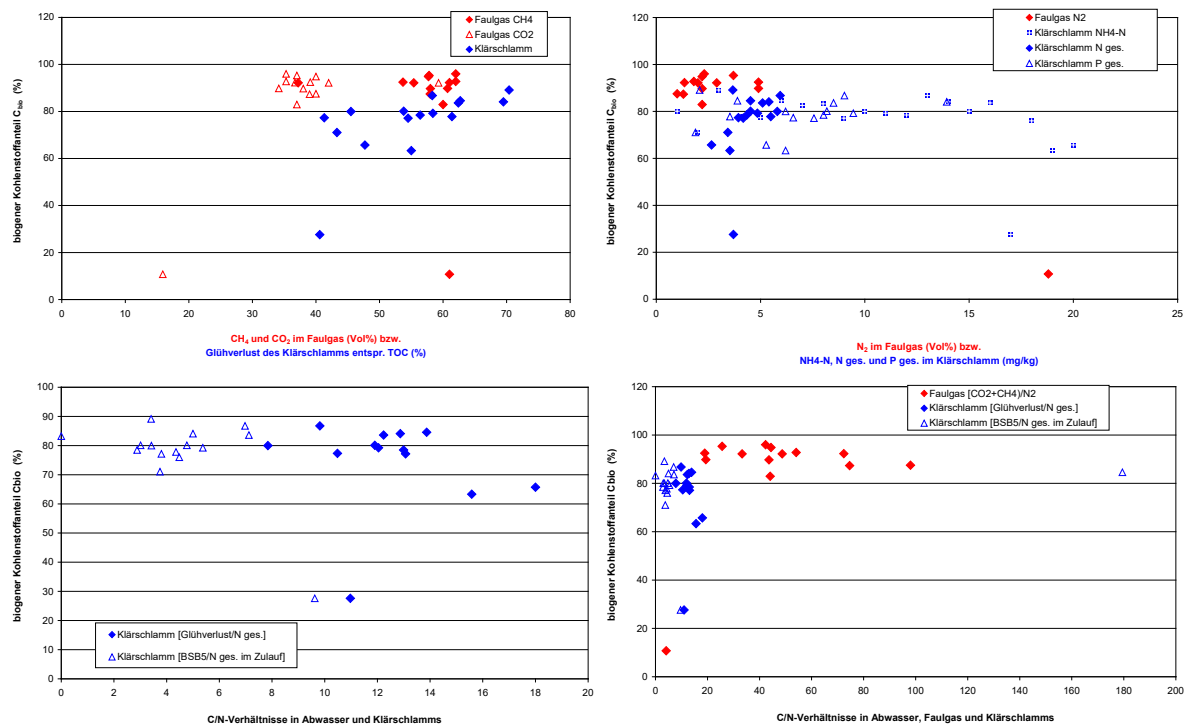


Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

Die Basisparameter des behandelten Ablaufwassers wurden ebenfalls erfragt, da diese jedoch durch die Behandlungsverfahren sowie durch Vorgaben für die weitere Behandlung des Abwassers und der Einleitung bedingt sind, werden die Basiswerte des Ablaufs nicht weiter verwendet. Korrelationen mit den biogenen Kohlenstoffanteilen sind nicht erkennbar.

Um die Zusammenhänge von höherem Stickstoffgehalt in frischer, biogener Biomasse und der leichteren Abbaubarkeit weiter zu verfolgen (u.a. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002), wurden außerdem noch die Klärschlammanalysen hinsichtlich N ges., $\text{NH}_4\text{-N}$, P ges., Glühverlust (als Parameter für den organischen Kohlenstoffgehalt / TOC) sowie das C/N-Verhältnis herangezogen. Da die C/N-Verhältnisse nicht direkt vorliegen, wurden in Näherung die Verhältnisse von $[(\text{CO}_2 + \text{CH}_4)/\text{N}_2]$ der Faulgase, von $[\text{Glühverlust (in \%)/N ges. (in mg/kg)}]$ der Klärschlämme und von $[\text{BSB5/N ges.}]$ im Abwasserzulauf mit den biogenen Kohlenstoffgehalten der Klärschlämme und Faulgase verglichen (Abbildung 14). Zusammenhänge sind nicht zu beobachten.

Abbildung 14: Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit verschiedener C-, N- und P-Gehalte sowie von C/N-Verhältnissen in Abwasser, Faulgas und Klärschlamm



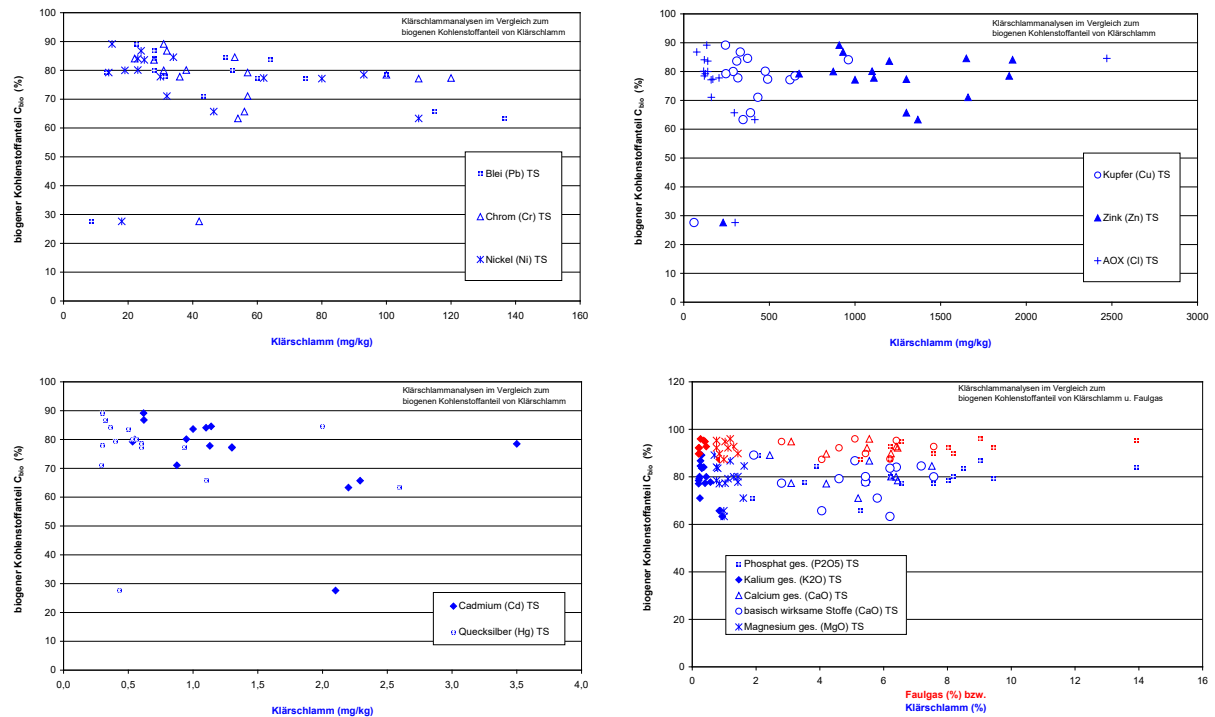
Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

In Klärschlämmen konzentrieren sich verschiedene Schwermetalle (Blei, Chrom, Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium, Quecksilber), die aufgrund der früher praktizierten landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlämmen im Rahmen der Klärschlammüberwachung analysiert werden. Diese Schwermetalle werden vorrangig mit Belastungen aus verschiedenen gewerblichen Abwässern in Verbindung gebracht. Dementsprechend wurden die Abhängigkeiten von fossilen Kohlenstoffanteilen in den Klärschlämmen betrachtet. Weiterhin werden hinsichtlich der Einträge über z.B. Tenside verschiedene Kationen (Calcium, Magnesium, Kalium, Phosphor) im Klärschlamm untersucht, ebenso wie der Parameter AOX (adsorbierbare organische Halogenverbindungen).

Der Vergleich all dieser Klärschlammparameter zeigt mit Ausnahme von AOX (Abbildung 16) nur geringe Korrelationen (Abbildung 15). Zwar weisen einige Schwermetalle wie Cadmium und Quecksilber oder auch das Kation Kalium erwartungsgemäß bei höheren fossilen Kohlenstoffanteilen auch leicht höhere Klärschlammbelastungen auf, jedoch können auch Klärschlämme mit hohen biogenen Kohlenstoffanteilen aus Kläranlagen mit vernachlässigbarem gewerblichen Eintrag hohe Schwermetallgehalte aufweisen.

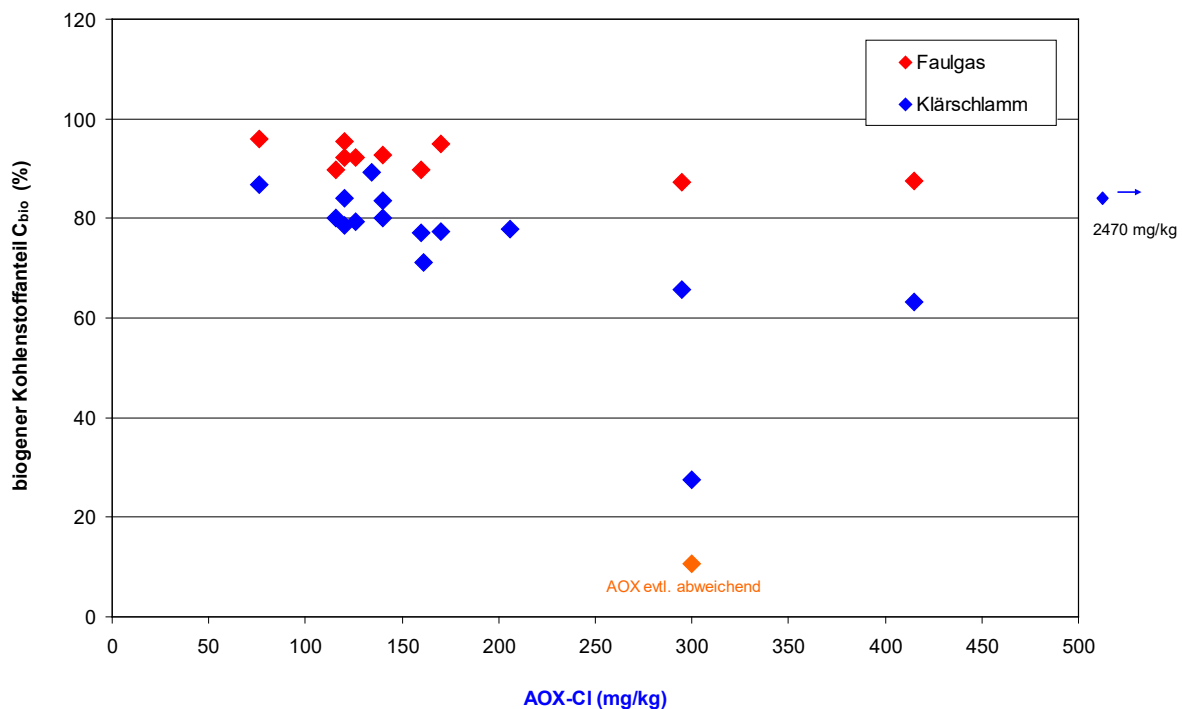
Vergleicht man die vorliegenden zwölf Klärschlammanalysen des Parameters AOX, der speziell als Gruppenparameter für Belastungen von kommunalen und industriellen Abwässern mit synthetischen Produkten entwickelt wurde, mit dem biogenen Kohlenstoffgehalt der Klärschlämme und Faulgase in Abbildung 16, so ist mit einer Ausnahme bei Klärschlämmen mit mehr als 150 mg/kg AOX-Nachweis auch ein geringerer biogener Kohlenstoffgehalt von <78 % vorhanden.

Abbildung 15: Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit von Analysedaten der Klärschlämme (mitgeteilt von den Betreibern)



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

Abbildung 16: Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlamm und Faulgas in Abhängigkeit von den AOX (Cl)-Messwerten der Klärschlämme (mitgeteilt von den Betreibern)



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

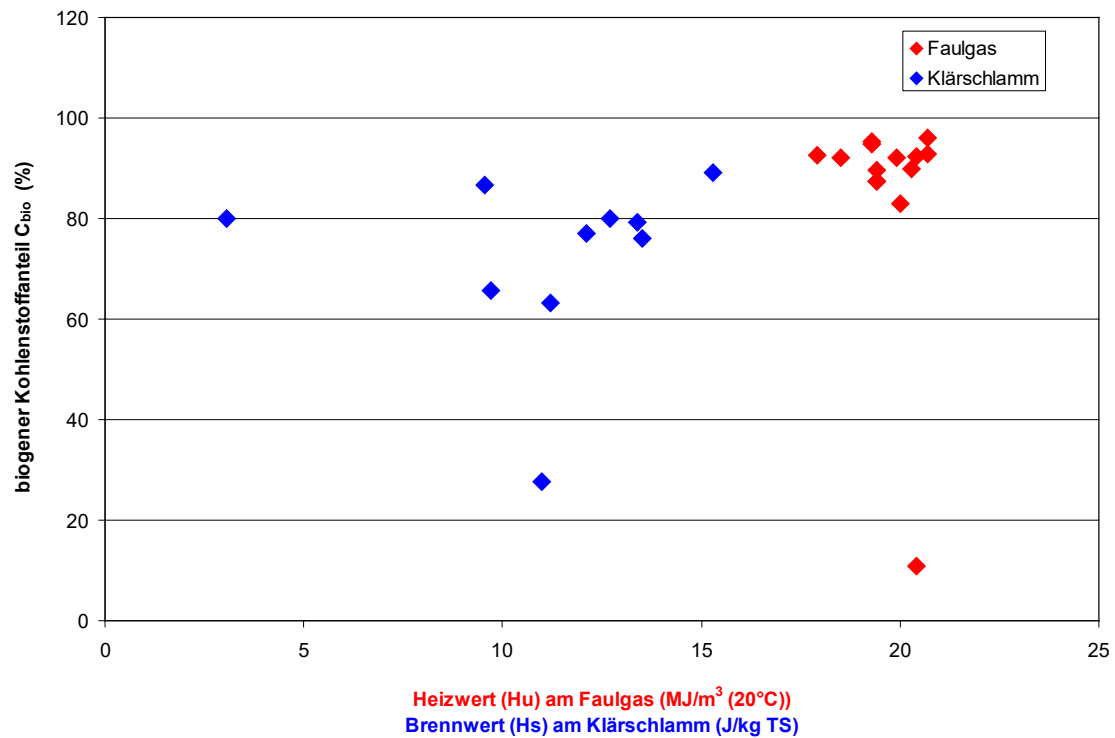
Der Vergleich des in den Anlagen gewonnenen Faulgasvolumens je Abwasservolumen pro Jahr mit den biogenen Kohlenstoffgehalten der Klärschlämme und Faulgase erbrachte ebenfalls keine erkennbaren Zusammenhänge, die eine Charakterisierung erlauben.

6.4 Heizwerte der Faulgase und Brennwerte der Klärschlämme

Da Faulgase energetisch genutzt und Klärschlämme der Verbrennung zugeführt werden, ist parallel auch eine Betrachtung der Heiz- und Brennwerte zu den biogenen Kohlenstoffanteilen von Interesse. Während die Faulgase hinsichtlich der Heizwerte (H_u) von 17,9 bis 20,7 MJ/m³ wenig Streubreite zeigen, wiesen die Klärschlämme Brennwerte (H_s) von 3.060 bis 15.300 kJ/kg TS auf. Korrelationen mit den biogenen Kohlenstoffanteilen sind nicht zu beobachten (Abbildung 17). Auch Einflüsse der Faulung, der Behandlungsverfahren oder der Kläranlagengröße liegen nicht vor, da sowohl der geringste als auch der höchste Klärschlamm-brennwert bei den Kläranlagen 1 und 3 der kleinen Ortschaften mit den nicht ausgefaulten Klärschlämmen auftreten. Die Klärschlämme der großen Kläranlagen sowie der Schlamm der Anlage mit Chemiapark zeigen ebenfalls keine erhöhten Brennwerte, die auf höhere oder geringere Anteile fossiler Brennstoffe im Schlamm hindeuten.

Ein Vergleich von Brennwert des Klärschlammes mit dem Heizwert des zugehörigen Faulgases lässt keine Gesetzmäßigkeit erkennen.

Abbildung 17: Darstellung der biogenen Kohlenstoffanteile in Abhängigkeit von den Brennwerten der Klärschlämme bzw. Heizwerten der Faulgase



Quelle: eigene Darstellung, Hydroisotop GmbH

7 Evaluierung der Untersuchungen

Die Analysenergebnisse der ^{14}C -TOC bzw. ^{14}C -TC der Klärschlämme und Faulgase werden mit einem 2sigma-Fehler angegeben, der für jede Probe gesondert ermittelt wird. Die Qualität der Präparation und Messungen wird laufend geprüft und ist über eine Akkreditierung nach DIN EN ISO 17025 abgesichert. Interne Qualitätsprüfungen finden zusätzlich über die Bestimmung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte jeder Probe statt. Die Messfehler werden für den verwendeten Counter sowie individuell für jede Probe erhoben. Ringtests für ^{14}C -Bestimmungen werden vom Bundesamt für Strahlenschutz nicht angeboten. Die LSC-Methode nach DIN EN 15440: 2011 (s. auch Kap. 5.1) verlangt für die Bestimmung des biogenen Kohlenstoffanteils außer einem Korrektionsfaktor für den aktuellen Atmosphärenwert bzw. für die Materie Klärschlamm keine weiteren Anpassungen. Eine erhöhte Unsicherheit bei der Ermittlung des biogenen Kohlenstoffgehaltes entsteht demnach vorrangig durch den verwendeten Korrektionsfaktor, so dass die Anpassung der DIN EN 15440: 2011 dringend anzupfehlen ist.

Die Probenahme von Gas und Schlamm fand überwiegend seitens der Kläranlagen selbst statt. Es liegen keine Gründe vor, warum an der Repräsentativität der Proben zu zweifeln ist. Dennoch ist anzumerken, dass die Probenahme nicht unter klar definierten Kriterien stattfand.

Die Analysen der Klärschlämme wurden im praxisnahen Ansatz in dem Zustand untersucht, in dem Kläranlagen sie der Weiterverwertung zuführen, also teils als Nassschlamm, teils als ausgefauter getrockneter Schlamm. Die Analysenergebnisse zeigen in der Auswertung keine analytisch relevanten Verteilungsmuster, die eine wesentliche Veränderung durch die Ausfaltung und Trocknung herbeiführen. Dies schließt damit auch aus, dass Zusätze von synthetischen Polymeren, die zur Verbesserung des Entwässerungsprozesses von den Kläranlagen eingesetzt werden, in relevanten Anteilen den fossilen Kohlenstoffanteil im getrockneten Klärschlamm erhöhen. Geht man von ca. 2 % Polymeranteil im Gesamtkohlenstoff des Klärschlammes aus, so ergeben sich Abweichungen im biogenen Kohlenstoffanteil von 2 %.

Die in die Studie einbezogenen Stichproben verschiedener kommunaler Kläranlagen in Deutschland decken soweit mit der Stichprobengröße von 20 das Größenspektrum sowie das Massenspektrum in Deutschland gut ab. Erfasst ist mit den Proben eine Einwohneranzahl von 3,5 Mio. EZ sowie ein Abwasseraufkommen von 6 Mio. EW (entsprechend 2,5 Mio. EGW). Die Verteilung von Anlagen mit überwiegend kommunalen aber auch mit hohen industriellen Abwasseranteilen entspricht ebenfalls dem typischen Spektrum. Die Mehrzahl der Anlagen entstammt den drei Bundesländern mit dem höchsten Abwasseraufkommen. Es wird sowohl der urbane als auch der landwirtschaftliche Raum berücksichtigt. Die Stichprobe wird somit als repräsentativ bewertet.

Das ermittelte Wertespektrum der Klärschlämme und Faulgase wird ebenfalls als hinreichend repräsentativ für alle kommunalen Kläranlagen in Deutschland angesehen. Die Einbeziehung einer Gemeinschaftskläranlage mit Abwässern aus einem Chemiepark zeigt, dass Abweichungen zu noch höheren fossilen Kohlenstoffanteilen nur noch durch rein industrielle Abwässer aus Chemieindustrie und Raffinerien zu erwarten sind.

Messwerte der zwei größten Kläranlagen, die aus technischen Gründen zu einem großen Teil die gleichen Abwässer behandeln, überschneiden sich im Rahmen der Messgenauigkeit. Die Messwerte der Faulgase dieser beiden Anlagen sind als gleich anzusehen. Somit sind Proben großer Anlagen als gut repräsentativ für das gesamte Abwasserspektrum anzusehen. Es ist anzunehmen, dass die Variationen des biogenen Kohlenstoffs der Klärschlämme $\pm 5\%$ nicht überschreiten.

Nur bei kleinen bis sehr kleinen Anlagen sind stark schwankende Messdaten im Bereich von $\pm 10\%$ bei verschiedenen Stichproben zu erwarten. Für Faulgase wird ein Variationsbereich von $\pm 2,5\%$ als realistisch angesehen.

Die Suche nach mehrstufigen oder stufenlosen Kriterien oder Parametern der Kläranlagen, die eine Charakterisierung der anfallenden Klärschlämme hinsichtlich der Verteilung von biogenem und fossilem Kohlenstoffanteil erlauben, war erfolglos. Auch bei einer Vergrößerung der Stichprobenuntersuchung, bzw. bei einem vergrößerten Parameterspektrum zu den Anlagen, wird kein größerer Erfolg hinsichtlich einfacher, bekannter Faktoren erwartet. Das ermittelte Wertespektrum wies unspezifische fossile Anteile für alle Kläranlagen ohne gesicherten Bezug zu den Kläranlagenparametern aus. Nur eine detaillierte, aufwändige Erhebung zum Eintrag gewerblicher Abwässer kann eine genauere Voraussage möglich machen.

Die über eine Anlage mit Beteiligung von Chemieparkabwässern klar abgesetzte Charakterisierung von hohen fossilen Kohlenstoffanteilen ist wissenschaftlich nachvollziehbar, jedoch nur über eine Anlage mit sehr spezifischem Industriespektrum abgesichert. Eine Übertragung auf jede Art der chemischen Industrie ist nicht gegeben und erlaubt somit keine generelle Aussage zu industriellen Klärschlämmen.

Eine Korrelation der fossilen Kohlenstoffanteile mit den durch die Anlagen flächendeckend erhobenen Klärschlammuntersuchungen auf AOX ist ebenfalls wissenschaftlich nachvollziehbar, wird jedoch bereits in der geringen Stichprobe durch eine Abweichung als nur bedingt hinweisend angesehen. Hohe AOX-Gehalte können, müssen aber nicht mit hohen fossilen Kohlenstoffanteilen einhergehen.

Die in dieser Studie gemachten Aussagen sowie die im folgenden Kapitel angegebenen Mittelwerte und Vorschläge zur Charakterisierung werden als relativ repräsentativ für die aktuelle Situation angesehen soweit die Stichprobenanzahl dies erlaubt.

Der in dieser Studie verwendete Ansatz zur Angabe der gewerblichen Abwasserfracht als Differenz aus mittlerer Auslastung und Einwohnerzahl ist für diese Studie stringent durchgeführt, beinhaltet jedoch Unsicherheiten dahingehend, wie die mittlere Auslastung zu ermitteln ist.

Hinsichtlich der Bilanzierung der biogenen Kohlenstoffanteile in Klärschlämmen, die der Verbrennung zugeführt werden, können auf Grundlage dieser Studie für alle Kläranlagen nur die genannten Mittelwerte angesetzt werden. Für eine Überprüfung bzw. individuelle Bilanz einzelner Kläranlagen, insbesondere bei kleinen Kläranlagen, ist die über mehrere Jahre mehrfache Untersuchung von Klärschlammstichproben notwendig.

Bei großen bis sehr großen Kläranlagen wird eine weitaus geringere Stichprobenuntersuchung als ausreichend angesehen, um den mittleren biogenen Kohlenstoffgehalt der Klärschlämme zu ermitteln.

Größere Unsicherheiten sind über Abwässer der Chemieindustrie zu erwarten, da hier hohe fossile Kohlenstoffanteile im Klärschlamm auftreten könnten.

Zukünftige Veränderung des Abwasseraufkommens sowie der eingesetzten Rohstoffe für synthetische Mittel können das in dieser Studie ermittelte Wertespektrum innerhalb weniger Jahre verändern. Da bei der Herstellung von Reinigungs- und Körperpflegemitteln, die die wahrscheinlichste Ursache der fossilen Kohlenstoffanteile im rein kommunalen Abwasser sowie gewerblichen Abwasser der Lebensmittelindustrie sind, eine Umstellung auf pflanzliche Rohstoffe zu erwarten ist, kann es zu einem signifikanten Absinken der fossilen Kohlenstoffanteile kommen.

8 Vorschlag zur Charakterisierung von Klärschlämmen

Die Auswertung der in dieser Studie erhobenen Analysedaten der biogenen Kohlenstoffanteile im Vergleich mit Basisdaten der Kläranlagen und Klärschlämme führt zu den zwei folgenden, dimensional verschiedenen Vorschlägen zur Charakterisierung von Klärschlamm und Faulgas:

Ebene Deutschland

Der mit der mittleren Auslastung (gerundet) der kommunalen Kläranlagen (in EW) gewichtete Mittelwert des biogenen Kohlenstoffs der untersuchten zwanzig Klärschlämme ergibt 67 % und der gewichtete Mittelwert der vierzehn Faulgase 80 %¹⁰. Als Näherung können diese Anteile an biogenem Kohlenstoff für das Gesamtaufkommen an kommunal, aber auch industriell geprägten Klärschlämmen und Faulgasen in Deutschland herangezogen werden.

Ebene Kläranlage

In einer detaillierteren Näherung und Berücksichtigung industrieller Abwässer wird folgendes vorgeschlagen:

- ▶ Die Abwasserfrachten von Abwässern der Gewerbegruppen 4 und 5 (Fossile Energieträger, Chemieindustrie, Schwerindustrie und vergleichbar) sind für jede Kläranlage bezogen auf Einwohnerwerte (EW) abzuschätzen – notwendige Daten sind durch die zuständige Behörde (z.B. Stadtentwässerung, Wasserwirtschaftsämter etc.) bereitzustellen.
- ▶ Kommunale und Gemeinschafts-Kläranlagen mit gewerblichen Abwässern größer 45 % bei Beteiligung der Abwassergruppen 4 und 5 legen eine individuelle analytische Ermittlung vor oder verwenden im konservativen Ansatz 0 % biogenen Kohlenstoffanteil.
- ▶ Kläranlagen mit gewerblichen Abwässern kleiner 45 % verwenden den gewichteten Mittelwert von 80 %¹¹ biogenen Kohlenstoffanteil für Klärschlamm und 85 % für Faulgas.

Hierbei steht es jeder Kläranlage bzw. Verbrennungsanlage frei, analytische Nachweise höherer biogener Kohlenstoffanteile vorzulegen.

Detaillierte Erfassung von Abwasserfrachten aus Gewerben der Gruppen 4 und 5 können die analytische Überprüfung ersetzen. Dies würde jedoch die Erstellung von Datenbanken zum Abwasser verschiedener Industriezweige voraussetzen, um Abschätzungen zu ermöglichen.

¹⁰ Für die Faulgase sind die angegebenen Einwohnerwerte der Auslastung der Kläranlage geringfügig abweichend, was jedoch nicht das berechnete gewichtete Mittel signifikant verändert.

¹¹ konservative Näherung auf Grundlage des gewichteten Mittelwerts aller Proben mit Ausnahme der Kläranlagen 2, 17, 19 und 20

9 Quellenverzeichnis

AbfKlärV – Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), zuletzt geändert durch Artikel 74 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474)

AbwV – Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung) vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. September 2014 (BGBl. I S. 1474)

AUSTERMANN-HAUN, U; WITTE, H (2014): Vervollständigung der Datengrundlage der Emissionsberichterstattung: CH₄-Emissionsfaktoren und CSB-Werte aus der Abwasserreinigung der relevantesten Industriebereiche (CRF 6.B.1). UBA Projekt Nr. 27964, Dessau-Rosslau 2014: 61 pp.

BUNDESMONOPOLAMT; Schriftliche Mitteilungen vom 07.01.2016 (V2285/2120-A III-1047/15), 09.10.2013 (V2285/2120-A III-794/13), 15.02.2012 (V2285-A III-26/12) und 11.08.2011 (V2285-A III) durch Dr. Waltraud Huni vom Bundesmonopolamt für Branntwein, Offenbach a.D.

BRANDT, S (2011): Nutzung von Klärschlamm als Rohstoffquelle. Masterarbeit, Univ. Rostock

DIN EN 15440:2011 – Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Biomasse; Deutsche Fassung: 58 pp.

EICHINGER, L (1977): Flüssigkeitsszintillationsmessung von Tritium in großen Wasserproben und von Kohlenstoff-14 und Tritium in Weinen. Diplomarbeit (unveröffentl.), LMU München

EU Kommission, Amtsblatt 2011/383/EU – Beschluss der Kommission zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EU-Umweltzeichens für Allzweck- und Sanitärreiniger: 64 pp.

FRICKE, K (2009): Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Umweltbundesamt (Hrsg.). Dessau-Roßlau: 10 pp.

FRITZ, P; FONTES, JC (Hrsg.) (1986): Handbook of Environmental Isotope Geochemistry Volume I u. II. Elsevier, Amsterdam

KUCHAŘOVÁ, J; RACLAVSKÁ, H; RACLAVSKÝ, K (2014): Organic Compounds of Natural Origin in Sludge from Waste-Water Treatment Plant. Inżynieria Mineralna – LIPIEC-GRUDZIEŃ; Journal of the Polish Mineral Engineering Society: 61-66

HARRISON, EZ; OAKES, SR; HYSSELL, M; HAY, A (2006): Organic chemicals in sewage sludges. Science of the Total Environment 367: 481-497

HARTMANN, E; BISCHOFF, W-A; KAUPENJOHANN, M (2004): Untersuchung von Klärschlamm auf ausgewählte Schadstoffe und ihr Verhalten bei der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung. Texte 20/04. Umweltbundesamt. Forschungsbericht 298 33 757: 228 pp.

LAW, Y; JACOBSEN, GE; SMITH, AM; YUAN, Z; LANT, P (2013): Fossil organic carbon in wastewater and its fate in treatment plants. water research 47: 5270-5281

LEVIN, I; KROMER, B (2004): The tropospheric ¹⁴CO₂ level in mid-latitudes of the northern hemisphere (1959–2003), Radiocarbon 46: 1261-1272

MAIER, M., LETZEL, M., EGENKE, M.W. (2012): Verhalten von Nanopartikeln in Kläranlagen, Mitteilungen der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie, Nr.3: 62 pp.

MOHN, J; SZIDAT, S; FELLNER, J; RECHBERGER, H; QUARTIER, R; BUCHMANN, B; EMMENEGGER, L (2008): De-termination of biogenic and fossil CO₂ emitted by waste incineration based on ¹⁴CO₂ and mass balances. Bioresource Technology 99: 6471–6479

OLIVA, J; BERNHARDT, A; REISINGER, H; DOMENIG, M; KRAMMER, H-J (2009): Klärschlamm – Materialien zur Abfallwirtschaft. Report, REP-0221. Umweltbundesamt AT, Klagenfurt, Wien

PALSTRA, SWL; MEIJER, HAJ (2014): Biogenic carbon fraction of biogas and natural gas fuel mixtures determined with ¹⁴C. Radiocarbon 56-1: 7–28

SCHEFFER, F; SCHACHTSCHABEL, P (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg: 593 pp.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2016): Wasserwirtschaft: Klärschlamm Entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2014, Tabellen. URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammsverwertungsart.html>; aufgerufen am 08.06.2016.

STATISTISCHES BUNDESAMT UND DWA ARBEITSGRUPPE KEK-1.2 „STATISTIK“ (2014): Abwasser und Klärschlamm in Deutschland - statistische Betrachtungen. Fachbeiträge; Korrespondenz Abwasser Abfall 61 – Nr. 21: 1106-1112

TEHG - Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen (Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz) (BGBl. I S. 1475), zuletzt geändert durch Artikel 626 vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474)

UBA - UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2006): Einsatz von Sekundärbrennstoffen. Umsetzung des Inventarplanes und nationale unabhängige Überprüfung der Emissionsinventare für Treibhausgase, Teilvorhaben 02. Texte 06_07. Dessau. URL: www.umweltbundesamt.de/publikationen/einsatz-von-sekundaerbrennstoffen vom März 2006: 177 pp.

UBA - UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2011): Frühjahrsputz – Informationen zum umweltschonenden Einsatz von Reinigungsmitteln. URL: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/dokumente/fruehjahrsputz.pdf vom 03.06.2016: 3 pp.

UBA – UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2016): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2014. Berlin. URL: www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-3 vom Mai 2018: 1012 pp.

WRMG - Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln (Wasch- und Reinigungsmittelgesetz), 17. Juli 2013 (BGBl. I S. 2538), zuletzt geändert durch Artikel 319 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474)

WIECHMANN, B; DIENEMANN, C; KABBE, C; BRANDT, S; VOGEL, I; ROSKOSCH, A (2006): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Teilvorhaben 02. Texte 06_07. UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.), Dessau: 177 pp.

A Anhang

A.1 Übersichtstabelle der Messdaten, der erhobenen Basisdaten der Kläranlagen (Angaben Betreiber sowie Ergänzungen durch die Autoren) und der Klärschlammanalysen

Kläranlage	1	2	3	4	5
Klärschlamm (Analysen Hydroisotop)					
Labor-Nr. Klärschlamm	282675	282674	282673	282672	283382
Datum Klärschlamm	17.03.2016	17.03.2016	17.03.2016	17.03.2016	30.03.2016
Zustand	flüssig	flüssig	flüssig	flüssig	entwässert
Brennwert (Hs)	kJ/kg TS				
Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C}$ -TOC)	% _{vPDB}	-25,9	-26,1	-25,1	-25,7
Kohlenstoff-14 (^{14}C -TOC)	%-modern	84,1 ± 2,3	74,6 ± 2,2	93,6 ± 2,4	81,7 ± 2,2
Anteil biogener Kohlenstoff (C _{bio}) (Korr.-F. 105)	%	80,1	71,0	89,1	77,8
Anteil fossiler Kohlenstoff (C _{fossil})	%	19,9	29,0	10,9	22,2
Faulgas (Analysen Hydroisotop)					
Labor-Nr. Faulgas					284242
Datum Faulgas					26.04.2016
Heizwert (Hu)	MJ/m ³ (20°C)				19,3
Argon (Ar)	Vol-%				0,02
Sauerstoff (O ₂)	Vol-%				0,54
Stickstoff (N ₂)	Vol-%				2,2
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	Vol-%				40
Methan	Vol-%				57,7
Schwefelwasserstoff	vpm				60
Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C}$ -TC)	% _{vPDB}				-25,5
Kohlenstoff-14 (^{14}C -TC)	%-modern				99,6 ± 2,4
Anteil biogener Kohlenstoff (C _{bio}) (Korr.-F. 105)	%				94,9
Anteil fossiler Kohlenstoff (C _{fossil})	%				5,1
Fragebogen (Angaben Betreiber)					
Verfahren	Teichkläranlage	Rotationstauchkörper	Tropfkörper	Belebung	SBR
Fällung/Flockung	nein	nein	nein	nein	Fällung und Flockung
Faulturm	nein	nein	nein	nein	ja
Gasgewinnung	nein	nein	nein	nein	ja
Schammstabilisierung					
Kanalisation	Mischkanalisation	Mischkanalisation	Mischkanalisation	Mischkanalisation	Mischkanalisation
Annahme Fremdschlamm					
mittlerer Trockenwetterzulauf	cbm/d	15	170	430	250
Abwasservolumen pro Jahr	cbm/a	7.000	115.000	240.000	190.000
Schmutzwasservolumen pro Jahr	cbm/a	5.500	70.000	160.000	100.000
Faulgasvolumen pro Jahr	cbm/a				
Klärschlamm pro Jahr	20 cbm/a	200 cbm/a	650 cbm/a	1.000 cbm/a	10.296 cbm/a
durchschnittl. Verweilzeit im Faulturm	Tage				35-40
BSB ₅ Zulauf	mg/l	274	416	307	370
CSB Zulauf	mg/l	442	715	496	590
N ges. Zulauf	mg/l	91	111	90	85
P ges. Zulauf	mg/l	10	13	10	11
Auslegung Kläranlage	EW	180	3.000	3.500	4.500
Mittlere Auslastung gerundet	EW	66	2.100	2.800	2.800
Einwohnerzahl	EZ	172	300	1.780	2.035
Indirekteinleiter Gewerbe	EGW	0	1.800	1.000	k.A.
Anteil Gewerbe (Diff. mittlere Auslastung u. EZ)	%	0	86	36	27
Gruppe 1: Häusliches und kommunales Abw.	EW	x	x	x	x
Gruppe 2: Lebens-/Futtermittel	EGW				
Gruppe 3: gemischte Produktion	EGW		x	x	x
Gruppe 4: Fossile Energieträger	EGW				
Gruppe 5: Chemische und mineralische Produktion undEGW				x	x
Klärschlammanalyse (versch. Labore)					
Datum		11.06.2015	04.03.2016	06.04.2016	11.01.2016
Probenahmestelle		Schlammstapel			Schlammstapelbehälter
Art		Nassschlamm	Nassschlamm	Nassschlamm	Klärschlamm
Aufbereitung					
pH-Wert OS		6,7	5,2	6,7	7,2
Trockenrückstand OS	%	4,4	3,82	2,73	4,7
Wassergehalt OS	%	95,7	96,2	97,3	
Glühverlust TS	%	43,3	70,4	61,4	41,3
N ges. TS	%	3,43	3,67	5,49	3,94
NH ₄ -N TS	%	< 1,14	< 1,31	< 1,83	1,68
Phosphat ges. (P ₂ O ₅) TS	%	1,88	2,08	3,53	6,57
Kalium ges. (K ₂ O) TS	%	0,242	0,29	0,569	0,4
Calcium ges. (CaO) TS	%	5,2	2,43	5,43	3,1
basisch wirksame Stoffe (CaO) TS	%	5,8	1,93	5,43	2,8
Magnesium ges. (MgO) TS	%	1,6	0,692	1,43	1,03
Blei (Pb) TS	mg/kg	43,4	22,7	31,4	60
Cadmium (Cd) TS	mg/kg	0,875	0,618	1,13	1,3
Chrom (Cr) TS	mg/kg	57	31	36	120
Kupfer (Cu) TS	mg/kg	433	244	316	490
Nickel (Ni) TS	mg/kg	32	15	30	62
Quecksilber (Hg) TS	mg/kg	0,29	0,3	0,3	0,93
Zink (Zn) TS	mg/kg	1.660	908	1.110	1.300
AOX (Cl) TS	mg/kg	161	134	206	170

TEXTE Bestimmung der biogenen Kohlenstoffgehalte von Klärschlamm
und Faulgas und Untersuchung von Abhängigkeiten zu Kläranlagen-Basisdaten, Abwasserwerten und
Klärschlammzusammensetzung

Kläranlage	6	7	8	9	10
Klärschlamm (Analysen Hydroisotop)					
Labor-Nr. Klärschlamm	280827	280835	282694	283429	279585
Datum Klärschlamm	03.02.2016	26.01.2016	17.03.2016	29.03.2016	23.12.2015
Zustand	entwässert	entwässert	entwässert	entwässert	entwässert
Brennwert (Hs)	kJ/kg TS			12.100	12.700
Kohlenstoff-13 (δ ¹³ C-TOC)	‰ _{oVPDB}	-24,0	-25,4	-25,5	-25,0
Kohlenstoff-14 (¹⁴ C-TOC)	‰-modern	88,8 ± 2,6	86,7 ± 2,3	87,4 ± 2,3	81,0 ± 2,2
Anteil biogener Kohlenstoff (C _{bio}) (Korr.-F. 105)	‰	84,6	82,6	83,2	77,1
Anteil fossiler Kohlenstoff (C _{fossil})	‰	15,4	17,4	16,8	22,9
Faulgas (Analysen Hydroisotop)					
Labor-Nr. Faulgas		280834	282695	283430	278745
Datum Faulgas		26.01.2016	17.03.2016	29.03.2016	07.12.2015
Heizwert (Hu)	MJ/m ³ (20°C)		20,4	17,9	19,4
Argon (Ar)	Vol-%			0,07	0,9
Sauerstoff (O ₂)	Vol-%		0,3	1,3	0,8
Stickstoff (N ₂)	Vol-%		1,35	4,9	2,2
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	Vol-%		36,7	39,1	38
Methan	Vol-%		61	53,7	58
Schwefelwasserstoff	vpm		20	400	12
Kohlenstoff-13 (δ ¹³ C-TC)	‰ _{oVPDB}		-29,7	-29,4	-30,7
Kohlenstoff-14 (¹⁴ C-TC)	‰-modern		96,9 ± 3,0	97,1 ± 2,5	94,2 ± 2,4
Anteil biogener Kohlenstoff (C _{bio}) (Korr.-F. 105)	‰		92,3	92,5	89,7
Anteil fossiler Kohlenstoff (C _{fossil})	‰		7,7	7,5	10,3
Fragebogen (Angaben Betreiber)					
Verfahren	anaerobe Faulung	2stufiges Belebtsbecken (anaerob/aerob)	Belebtschlamm- verfahren	2straßige Kaskadenbelebung	mechanisch/ chemisch/biologisch
Fällung/Flockung	Eisen II	ja	P-Fällung Al/Fe	ja	Fe-Al-Chlorid
Faulturm	ja	ja	ja	ja	ja
Gasgewinnung	ja	ja	ja	ja	ja
Schammstabilisierung	anaerob		anaerob	anaerob	anaerob
Kanalisation	Mischkanalisation	Trennk. (mit Fremdw.) (2600 cbm/a Sp.reste)	Mischkanalisation	Mischkanalisation	Mischkanalisation
Annahme Fremdschlamm					
mittlerer Trockenwetterzulauf	cbm/d	98	25.000	5.652	22.464
Abwasservolumen pro Jahr	cbm/a	1.365.110		2.642.188	5.301.811
Schmutzwasservolumen pro Jahr	cbm/a	414.894	5500000	104.766	3.841.597
Faulgasvolumen pro Jahr	cbm/a	202.911	791000	247.743	396.392
Klärschlamm pro Jahr		1.107 cbm/a	(570.000)	21.083 cmb/a	712 t/a
durchschnittl. Verweilzeit im Faulturm	Tage	3	35	20	32
BSB5 Zulauf	mg/l	445			160
CSB Zulauf	mg/l	640	406	617	424
N ges. Zulauf	mg/l	2,48	29,8	60,8	42,1
P ges Zulauf	mg/l	0,5	4,34	9	5,8
Auslegung Kläranlage	EW	40.000	91.000	45.000	50.000
mittlere Auslastung gerundet	EW	28.800	35.000	37.200	39.100
Einwohnerzahl	EZ	17.684	(35000)	30.869	40.860
Indirekteinleiter Gewerbe	EGW	k.A.	k.A.	vernachlässigbar	4.067
Anteil Gewerbe (Diff. Mittlere Auslastung u. EZ)	‰	39	0	17	0
Gruppe 1: Häusliches und kommunales Abw.	EW	17.684	35.000	x	867
Gruppe 2: Lebens-/Futtermittel	EGW		x		283
Gruppe 3: gemischte Produktion	EGW		x		
Gruppe 4: Fossile Energieträger	EGW			x	
Gruppe 5: Chemische und mineralische Produktion undEGW				x	2.917
Klärschlammmanalyse (versch. Labore)					
Datum	19.10.2015			07.01.2015	10.09.2015
Probenahmestelle	Schlamm-polder			Zentrifuge	
Art	Nassschlamm			Klärschlamm	Klärschlamm
Aufbereitung					
pH-Wert OS		7,0		8,2	7,5
Trockenrückstand OS	‰	3,21		26,38	3,55
Wassergehalt OS	‰	96,8		73,62	
Glühverlust TS	‰	62,7		54,5	45,5
N ges. TS	‰	4,52		4,17	5,8
NH4-N TS	‰	< 1,56		4,17	2,6
Phosphat ges. (P2O5) TS	‰	3,89		7,56	6,2
Kalium ges. (K2O) TS	‰	0,256		0,2	0,44
Calcium ges. (CaO) TS	‰	7,51		4,2	6,39
basisch wirksame Stoffe (CaO) TS	‰	7,18			7,57
Magnesium ges. (MgO) TS	‰	1,63		0,85	1,3
Blei (Pb) TS	mg/kg	50,2		75	28
Cadmium (Cd) TS	mg/kg	1,14		1,3	0,55
Chrom (Cr) TS	mg/kg	53		110	31
Kupfer (Cu) TS	mg/kg	373		620	289
Nickel (Ni) TS	mg/kg	34		80	19
Quecksilber (Hg) TS	mg/kg	2		0,6	0,56
Zink (Zn) TS	mg/kg	1.650		1.000	873
AOX (Cl) TS	mg/kg	2470		160	140

TEXTE Bestimmung der biogenen Kohlenstoffgehalte von Klärschlamm
und Faulgas und Untersuchung von Abhängigkeiten zu Kläranlagen-Basisdaten, Abwasserwerten und
Klärschlammzusammensetzung

Kläranlage		11	12	13	14	15
Klärschlamm (Analysen Hydroisotop)						
Labor-Nr. Klärschlamm		281977	283769	280395	282600	284221
Datum Klärschlamm		01.03.2016	12.04.2016	26.01.2016	11.03.2016	25.04.2016
Zustand		entwässert	entwässert	entwässert	entwässert	entwässert
Brennwert (Hs)	kJ/kg TS	13.400		9.540		
Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C-TOC}$)	‰ _{VPOB}	-25,7	-25,5	-25,2	-25,6	-24,2
Kohlenstoff-14 ($^{14}\text{C-TOC}$)	%-modern	83,2 ± 3,0	82,4 ± 2,2	91,1 ± 2,6	88,3 ± 2,3	84,1 ± 2,5
Anteil biogener Kohlenstoff (C_{bio}) (Korr.-F. 105)	%	79,2	78,5	86,8	84,1	80,1
Anteil fossiler Kohlenstoff (C_{fossil})	%	20,8	21,5	13,2	15,9	19,9
Faulgas (Analysen Hydroisotop)						
Labor-Nr. Faulgas		281978	283770	280394	282599	284222
Datum Faulgas		01.03.2016	12.04.2016	26.01.2016	11.03.2016	25.04.2016
Heizwert (Hu)	MJ/m ³ (20°C)	19,9	18,5	20,7	19,3	20,3
Argon (Ar)	Vol-%		0,04	0,05	0,1	0,01
Sauerstoff (O ₂)	Vol-%	0,8	0,66	0,38	1	0,2
Stickstoff (N ₂)	Vol-%	2,9	2	2,3	3,7	4,9
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	Vol-%	59,3	42	35,3	37	34,15
Methan	Vol-%	37,2	55,4	62	57,8	60,7
Schwefelwasserstoff	vpm	2	50	30	20	20
Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C-TC}$)	‰ _{VPOB}	-31,1	-27,9	-26,4	-30,5	-32,2
Kohlenstoff-14 ($^{14}\text{C-TC}$)	%-modern	96,8 ± 3,5	96,8 ± 2,4	100,8 ± 2,4	100,1 ± 2,5	94,3 ± 2,4
Anteil biogener Kohlenstoff (C_{bio}) (Korr.-F. 105)	%	92,2	92,2	96,0	95,3	89,8
Anteil fossiler Kohlenstoff (C_{fossil})	%	7,8	7,8	4,0	4,7	10,2
Fragebogen (Angaben Betreiber)						
Verfahren		Belebungsanlage, mechan.-biol. Reinigung	3straßige Kaskadenbelebung	Anlage mit Vorklärung	SBR	biologisch
Fällung/Flockung		Phosphatfällung	ja	ja	Fällung und Flockung	ja
Faulturm		ja	ja	ja	ja	ja
Gasgewinnung		ja	ja		ja	ja
Schammstabilisierung		anaerob	anaerob		anaerob	
Kanalisation		Trennkanalisation	Mischkanalisation	Trennkanalisation	Mischkanalisation	Mischkanalisation
Annahme Fremdschlamm			522 cbm/a			16.000 cbm/a
mittlerer Trockenwetterzulauf	cbm/d	9.300	32.141	11.440	12.000	26.525
Abwasservolumen pro Jahr	cbm/a	3.800.000	8.877.737	4875132	437.500	9.681.600
Schmutzwasservolumen pro Jahr	cbm/a	2.100.000	6.374.757	4175550	4.020.000	9.681.600
Faulgasvolumen pro Jahr	cbm/a	603.000	757.728	1149119	607.945	1.160.217
Klärschlamm pro Jahr		3.850 t/a	1.181 t/a	5.000 t/a	5.500 t/a	2.000 cbm/a
durchschnittl. Verweilzeit im Faulturm	Tage	16,2	26	20	16	25
BSB5 Zulauf	mg/l	222	144	371	450	205
CSB Zulauf	mg/l	422	396	700	680	540
N ges. Zulauf	mg/l	41,3	50	53,2	90	43
P ges. Zulauf	mg/l	7,8	5,7	11,6	13	7
Auslegung Kläranlage	EW	60.000	115.000	110.000	90.000	260.000
mittlere Auslastung gerundet	EW	56.600	66.700	82.600	90.000	110.000
Einwohnerzahl	EZ	44.600	66.828	49.500	60.000	95.000
Indirekteinleiter Gewerbe	EGW	15.400	3.726	40.000	k.A.	15.000
Anteil Gewerbe (Diff. mittlere Auslastung u. EZ)	%	21	0	40	33	14
Gruppe 1: Häusliches und kommunales Abw.	EW	44.600	1.009	42.600	90.000	2.500
Gruppe 2: Lebens-/Futtermittel	EGW	3.000		39.600		10.000
Gruppe 3: gemischte Produktion	EGW	12.400	742	x		1.000
Gruppe 4: Fossile Energieträger	EGW					
Gruppe 5: Chemische und mineralische Produktion un	EW		1975	800		1.500
Klärschlammanalyse (versch. Labore)						
Datum		01.09.2015	07.01.2015	13.04.2016	07.01.2016	23.06.2015
Probenahmestelle		Abwurf Zentrifuge	Zentrifuge	Austrag Zentrifuge	Container	
Art		Faulschlamm	Klärschlamm	Klärschlamm	Klärschlamm	
Aufbereitung		Flockmittel ZETAG				
pH-Wert OS		8,4	8,1	8	8,22	8,8
Trockenrückstand OS	%	22,1	27,67	20,2	23,3	29,8
Wassergehalt OS	%	78	72,33			70,2
Glühverlust TS	%	58,4	56,4	58,3	69,5	53,8
N ges. TS	%	4,85	4,34	5,94	5,4	4,52
NH4-N TS	%	0,957	4,34	1,31	0,84	1,16
Phosphat ges. (P2O5) TS	%	9,45	8,02	9,02	13,93	8,18
Kalium ges. (K2O) TS	%	0,216	0,2	0,26	0,36	0,229
Calcium ges. (CaO) TS	%	5,48	6,44	5,55		6,23
basisch wirksame Stoffe (CaO) TS	%	4,6		5,1	6,4	5,43
Magnesium ges. (MgO) TS	%	1,12	0,76	1,19	0,76	1,43
Blei (Pb) TS	mg/kg	13,2	100	28	28	52,3
Cadmium (Cd) TS	mg/kg	0,533	3,5	0,62	1,1	0,948
Chrom (Cr) TS	mg/kg	57	100	32	22	38
Kupfer (Cu) TS	mg/kg	246	650	330	961,4	476
Nickel (Ni) TS	mg/kg	14	93	24	23	23
Quecksilber (Hg) TS	mg/kg	0,4	0,6	0,32	0,36	0,53
Zink (Zn) TS	mg/kg	673	1.900	930	1920	1100
AOX (Cl) TS	mg/kg	126	120	76	120	116

TEXTE Bestimmung der biogenen Kohlenstoffgehalte von Klärschlamm
und Faulgas und Untersuchung von Abhängigkeiten zu Kläranlagen-Basisdaten, Abwasserwerten und
Klärschlammzusammensetzung

Kläranlage	16	17	18	19	20
Klärschlamm (Analysen Hydroisotop)					
Labor-Nr. Klärschlamm	280986	283535	282992	283433	283431
Datum Klärschlamm	09.02.2016	05.04.2016	22.03.2016	29.03.2016	29.03.2016
Zustand	entwässert	entwässert	entwässert	flüssig	flüssig
Brennwert (Hs)	kJ/kg TS	11.000	13.500	11.200	9.700
Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C-TOC}$)	‰ _{VPOB}	-25,4	-28,0	-24,6	-24,9
Kohlenstoff-14 ($^{14}\text{C-TOC}$)	‰-modern	87,8 ± 2,3	29,0 ± 2,5	79,8 ± 2,3	66,5 ± 2,1
Anteil biogener Kohlenstoff (C_{bio}) (Korr.-F. 105)	%	83,6	27,6	76,0	63,3
Anteil fossiler Kohlenstoff (C_{fossil})	%	16,4	72,4	24,0	36,7
Faulgas (Analysen Hydroisotop)					
Labor-Nr. Faulgas		283536	282993	283434	283432
Datum Faulgas		05.04.2016	22.03.2016	29.03.2016	29.03.2016
Heizwert (Hu)	MJ/m ³ (20°C)	20,4	20	19,4	19,4
Argon (Ar)	Vol-%	0,17	0,09	0,8	0,9
Sauerstoff (O ₂)	Vol-%	3,7	0,64	0,4	0,5
Stickstoff (N ₂)	Vol-%	18,8	2,2	1	1,3
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	Vol-%	15,9	37	40	39
Methan	Vol-%	61	60	58	58
Schwefelwasserstoff	vpm	< 0,5	50	10	40
Kohlenstoff-13 ($\delta^{13}\text{C-TC}$)	‰ _{VPOB}	-40,3	-32,4	-30,7	-30,5
Kohlenstoff-14 ($^{14}\text{C-TC}$)	‰-modern	11,3 ± 1,3	87,1 ± 3,0	91,9 ± 2,3	91,7 ± 4,0
Anteil biogener Kohlenstoff (C_{bio}) (Korr.-F. 105)	%	10,8	83,0	87,5	87,3
Anteil fossiler Kohlenstoff (C_{fossil})	%	89,2	17,0	12,5	12,7
Fragebogen (Angaben Betreiber)					
Verfahren	Voll-biologisch	2stufige aerobe Abwasser- beh. in BHR	2-stufige Belebung	DNF, Bio-P, SEW	DNF, Bio-P
Fällung/Flockung	ja	chem-phys Vorbehandl. mit FeCl ₃ /AlCl ₃ +Kalk	P-Fällung	Simultanfällung	Simultanfällung
Faulturm	ja	(ja)	ja	ja	ja
Gasgewinnung	ja	ja	ja	ja	ja
Schammstabilisierung	anaerob		anaerob	anaerob	anaerob
Kanalisation		Misch- u. Trennkanalisatio	Mischkanalisation	Mischkanalisation	Mischkanalisation
Annahme Fremdschlamm				25165 cbm/a	ja
mittlerer Trockenwetterzulauf	cbm/d	39.000	20.332	134.028.000	473.040.000
Abwasservolumen pro Jahr	cbm/a	17.400.000	7.963.034	110.000.000	125.665.047
Schmutzwasservolumen pro Jahr	cbm/a		4.904.041	100.000.000	83.000.000
Faulgasvolumen pro Jahr	cbm/a	4.100.000	1.720.988	15.000.000	6.970.166
Klärschlamm pro Jahr		(245.000 cbm/a in 3Anl.)	7.705 t/a	22000 t/a	29.346 cbm/a
durchschnittl. Verweilzeit im Faulturm	Tage	32	20	30	23
BSB ₅ Zulauf	mg/l	463	866	215	
CSB Zulauf	mg/l	735	2.468	513	325,7
N ges. Zulauf	mg/l	65	90	48	27,3
P ges. Zulauf	mg/l	9,6	10,2	7,3	4,6
Auslegung Kläranlage	EW	307.000	585.833	2.000.000	1.340.000
mittlere Auslastung gerundet	EW	284.000	510.000	1.300.000	1.500.000
Einwohnerzahl	EZ	k.A. (175.385)	65.892	1.150.000	709.546
Indirekteinleiter Gewerbe	EGW	k.A. (103.101)	444.396	150.000	782.080
Anteil Gewerbe (Diff. mittlere Auslastung u. EZ)	%	36	87	12	52
Gruppe 1: Häusliches und kommunales Abw.	EW	x	65.892	1.150.000	709.546
Gruppe 2: Lebens-/Futtermittel	EGW		150.000	218.982	241.867
Gruppe 3: gemischte Produktion	EGW	x		15.642	17.276
Gruppe 4: Fossile Energieträger	EGW			172.058	190.039
Gruppe 5: Chemische und mineralische Produktion un	EW		444.396	375.398	414.630
Klärschlammmanalyse (versch. Labore)				Mittelwerte	Mittelwerte
Datum	08.12.2015	02.12.2015		2010	2011
Probenahmestelle		Zentrifuge			
Art	Dickschlamm	Klärschlamm		Klärschlamm	Klärschlamm
Aufbereitung					
pH-Wert OS		8,3		7,4	7,5
Trockenrückstand OS	%	24,3	29,3	3	4,4
Wassergehalt OS	%				
Glühverlust TS	%	62,4	40,6	55	47,7
N ges. TS	%	5,1	3,7	3,53	2,65
NH ₄ -N TS	%	1		3,4	3,14
Phosphat ges. (P ₂ O ₅) TS	%	8,5		6,2	5,27
Kalium ges. (K ₂ O) TS	%	0,3		0,94	0,85
Calcium ges. (CaO) TS	%				
basisch wirksame Stoffe (CaO) TS	%	6,2		6,2	4,06
Magnesium ges. (MgO) TS	%	0,8		1	0,99
Blei (Pb) TS	mg/kg	64	8,6	136,7	115
Cadmium (Cd) TS	mg/kg	1	2,1	2,2	2,29
Chrom (Cr) TS	mg/kg	28	42	54	56
Kupfer (Cu) TS	mg/kg	310	60	346,7	390
Nickel (Ni) TS	mg/kg	25	18	110	46,5
Quecksilber (Hg) TS	mg/kg	0,5	0,43	2,59	1,1
Zink (Zn) TS	mg/kg	1.200	230	1.367	1.300
AOX (Cl) TS	mg/kg	140	300	415	295