



Zentrum für Innovative
AbWassertechnologien
an der TU Kaiserslautern



Siedlungswasser-
wirtschaft und
Wasserbau

Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwas- serreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz

- ZEBRAS -

im Auftrag des
*Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten
(MULEWF) des Landes Rheinland-Pfalz*

Sachstandsbericht

Mai 2016

Projektpartner

	Zentrum für innovative AbWasser- technologien an der Technischen Universität Kaiserslautern Paul-Ehrlich-Str. 14 67663 Kaiserslautern	Dr.-Ing. Henning Knerr Dipl.-Ing. Timo Dilly Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt
	Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Wasserbau Universität Luxembourg Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Kommunikation Campus Kirchberg L-1359 Luxembourg	Prof. Dr.-Ing. Joachim Hansen Sebastian Hien, MSc

Im Unterauftrag

	Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH Segbachstr. 9 56743 Thür	Dr.-Ing. Klaus Siekmann Dipl.-Ing. Jürgen Jakob Dr.-Ing. Thomas Siekmann
---	--	--

Zitiervorschlag

Knerr, H.; Dilly, T.; Schmitt, T.G.; Hansen, J.; Hien, S. (2016): „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS“, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten (MULEWF) des Landes Rheinland-Pfalz, Deutschland, Sachstandsbericht Mai 2016

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Ausgangssituation in Rheinland-Pfalz	2
3 Datengrundlage	3
4 Methodik	5
5 Schlammmanfall und Schlammbeschaffenheit	8
5.1 Primärschlammmanfall	10
5.2 Überschussschlammmanfall	12
5.3 Rohschlammmanfall	13
5.4 Faulschlammmanfall	14
6 Parameter der Faulung und Gasertrag	15
6.1 Betriebstemperatur	15
6.2 Faulzeit	16
6.3 Faulraumvolumen	18
6.4 Raumbelastung	19
6.5 Organikanteil und Abbaugrad	21
6.6 Klärgasanfall	22
6.7 Gasertrag	23
6.8 Methangehalt	25
7 Energetische Kennwerte	25
7.1 Eigenstromerzeugung	25
7.2 Fremdstrombezug	27
7.3 Gesamtstromverbrauch	28
7.4 Eigenversorgungsgrad	30
8 Angaben zur Faulstufe	31
9 Zusammenfassung und Ausblick	34
10 Literaturverzeichnis	36
11 Anhang	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anzahl und Ausbaugröße der Kläranlagen mit Faulung und deren Aufteilung auf die Größenklassen (Bezugsjahr 2014)	2
Abbildung 2:	Bevölkerungsdichte und räumliche Verteilung der Kläranlagen in Rheinland-Pfalz (Bezugsjahr 2014)	3
Abbildung 3:	Statistische Auswertung der Rückläufe bezogen auf die Anzahl (oben) und die Ausbaugrößen (unten).....	4
Abbildung 4:	Relative Verteilung der übermittelten Zulauffrachten bezogen auf die Messstelle in der Kläranlage	6
Abbildung 5:	Mittlere CSB-Frachten im Zulauf der ausgewerteten (Bezugsjahr 2014).....	7
Abbildung 6:	Klassierung der KA nach mittlerer Anschlussbelastung.....	8
Abbildung 7:	Einwohnerspezifische Frachten verschiedener Schlammfraktionen (Bezugsjahr 2014)	9
Abbildung 8:	Aufenthaltszeiten in der Vorklärung (Bezugsjahr 2014).....	11
Abbildung 9:	Einwohnerspezifische Primärschlammfracht in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit in der Vorklärung bei mittlerem Trockenwetterzufluss (Bezugsjahr 2014)	12
Abbildung 10:	Spezifische Überschussschlammfrachten in Abhängigkeit vom Schlammalter in der Belebung (Bezugsjahr 2014)	13
Abbildung 11:	Einwohnerspezifische Rohschlammfrachten in Abhängigkeit von der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014).....	14
Abbildung 12:	Einwohnerspezifische Faulschlammfrachten in Abhängigkeit der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)	15
Abbildung 13:	Temperaturen der einzelnen Faulbehälter im Vergleich (Bezugsjahr 2014).....	16
Abbildung 14:	Mittlere Faulzeit in Abhängigkeit der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014).....	17
Abbildung 15:	Einwohnerspezifisches Faulraumvolumen bezogen auf die Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)	18
Abbildung 16:	Einwohnerspezifisches Faulraumvolumen [I/E] bezogen auf die Anschlussbelastung zuzüglich der vorhanden externen Belastung (Bezugsjahr 2014)	19
Abbildung 17:	Mittlere Raumbelastung in Abhängigkeit zur Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014) im Vergleich zu Angaben in der Literatur	20
Abbildung 18:	Glühverluste der Schlammfraktionen (Bezugsjahr 2014).....	21
Abbildung 19:	Abbau der organischen Trockenmasse in Prozent durch die Faulung in Abhängigkeit der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)	22
Abbildung 20:	Einwohnerspezifischer Klärgasanfall in Abhängigkeit der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)	23
Abbildung 21:	Gasertrag bezogen auf die zugeführten organischen Frachten (Bezugsjahr 2014), ohne die Anlagen mit Fremdschlämmen und Co-Substraten.....	24
Abbildung 22:	Gasertrag bezogen auf die abgebaute organische Fracht (Bezugsjahr 2014)	24
Abbildung 23:	Methangehalt und Unterschreitungshäufigkeit (Bezugsjahr 2014)	25
Abbildung 24:	Faulgasverwertung (links) und Anzahl zu den KWK-Anlagen je KA (rechts).....	26
Abbildung 25:	Eigenstromerzeugung aus Klärgas in Abhängigkeit zur Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)	27

Abbildung 26:	Einwohnerspezifischer Fremdstrombezug $e_{el,F}$ bezogen auf die Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)	28
Abbildung 27:	Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch in Abhängigkeit der Anschlussbelastung(Bezugsjahr 2014).....	29
Abbildung 28:	Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch e_{ges} im Vergleich zu den Kennwert des DWA-Arbeitsblatt A 216 (2015) (Bezugsjahr 2014).....	30
Abbildung 29:	Eigenversorgungsgrad EV bezogen auf die Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014) .	31
Abbildung 30:	Übersicht über Angaben zu den Faulbehältern: Anzahl der FB (oben), Betriebsweise (unten)	32
Abbildung 31:	Übersicht über Angaben zu den Faulbehältern: Bauformen (oben), Baujahr (unten)	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Richtwerte der Faulzeit bzw. des Schlammalters zur Faulraumbemessung.....	17
Tabelle 2:	Kennwerte zur organischen Raumbelastung.....	20
Tabelle 3:	Übersicht über die Mediane der unterschiedlichen Schlammfraktionen	34
Tabelle 4:	Mediane der Kennwerte bezogen auf die jeweilige Anschlussbelastung	34

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr (Einheit)
$B_{\text{CSB,d}}$	CSB-Tagesfracht [g O ₂ /d]
$B_{\text{d,CSB,maxK}}$	Maximale CSB-Zulauf fracht bei Kampagnebetrieb [kg/d]
$B_{\text{d,Pges}}$	P_{ges} -Zulauf fracht
$B_{\text{d,xxx,Z}}$	Rohzulauf frachten [kg/d]
$B_{\text{d,XXX,Z+P}}$	Rohzulauf frachten inklusive der Rückbelastung durch interne Prozesswässer [kg/d]
$B_{\text{d,xxx,ZB}}$	Zulauf frachten zum Belebungsbecken [kg/d]
$B_{\text{d;AFS}}$	Zulauf fracht der abfiltrierbaren Stoffen
$B_{\text{d;Nges}}$	N_{ges} -Zulauf fracht
$B_{\text{d_BSB}}$	BSB ₅ -Zulauf fracht
$B_{\text{d_TKN}}$	TKN-Zulauf fracht
$B_{\text{R,oTR}}$	Mittlere Raumbelastung [kg oTR/(m ³ ·d)]
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
$b_{\text{TM,E,d}}$	Einwohnerspezifische Trockenmassentagesfracht [g TM/(E·d)]
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf [mg/l]
d	Tag (Einheit)
E	Einwohner (Einheit)
$e_{\text{el,F}}$	Einwohnerspezifische Fremdstrombezug [kWh/(E·a)]
$e_{\text{el,P}}$	Einwohnerspezifische Energieproduktion bzw. -erzeugung [kWh/(E·a)]
e_{ges}	Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch [kWh/(E·a)]
EV_{el}	Eigenversorgungsgrad - Elektrizität [%]
EW	Einwohnerwerte [E]
EW_{120}	Einwohnerwerte bezogen auf 120 CSB g/(E·d)
FB	Faulbehälter
FS	Faulschlamm
g	Gramm (Einheit)
GK	Größenklasse
GV	Glühverlust [%]
h	Stunde (Einheit)
KA	Kläranlage
kg	Kilogramm (Einheit)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
l	Liter (Einheit)
LfU	Landesamt für Umwelt
LUWG	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht
MULEWF	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten
n	Anzahl
NAwaS	Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz
oTM	Organische Trockenmasse [kg]
oTMzu	Organische Trockenmasse im Zulauf zur Faulung [kg]

oTR	Organischer Trockenrückstand [%]
PS	Primärschlamm
PV	Photovoltaik
$Q_{T,d,aM}$	Trockenwetterzufluss im Jahresmittel [m^3/d]
$Q_{\ddot{U}S}$	Überschussschlammmenge [m^3/a]
Q_x	Volumenstrom bezogen auf den Parameter X [m^3/d]
RS	Rohschlamm
t_{FB}	Faulzeit [d]
$t_{FB,ges}$	Gesamte Faulzeit [d]
TKN	Kjedahl-Stickstoff
TM	Trockenmasse (Masse des Trockenrückstands) [g]
TR	Trockenrückstand [%]
TS	Trockensubstanz (Masse des Trockenrückstands, Probe filtriert) [g]
TS_{BB}	Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken [$kg\ TS/m^3$]
$t_{TS,BB}$	Schlammalter im Belebungsbecken [d]
t_{VK}	Aufenthaltszeit in der Vorklärung [h]
$t_{VK,2h,max}$	Aufenthaltszeit in der Vorklärung bei maximalem Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel
ÜS	Überschussschlamm
V_{BB}	Belebungsbeckenvolumen
VK	Vorklärung
X_{Qmax}	Stundenspitzenfaktor nach ATV-DVWK A 198 (2003)
ρ	Dichte [kg/l]

1 Einleitung

Der Bestand an Anlagen mit getrennt anaerober Klärschlammbehandlung - sogenannte Faulungsanlagen - in Rheinland-Pfalz ist überwiegend durch Altanlagen charakterisiert, die vor mehr als 25 Jahren errichtet wurden. Darüber hinaus machen die Ergebnisse des Projektes „Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz - NAWaS“ (Schmitt et al. 2010, Schmitt et al. 2014) deutlich, dass in Zukunft mit einer verstärkten Umstellung von Kläranlagen mit simultan aerober Schlammstabilisierung auf einen anaeroben Stabilisierungsprozess (Faulung) zu rechnen ist. Der Verfahrensablauf Schlammfäulung – Entwässerung – thermische Behandlung wird hierbei, auch unter Berücksichtigung der zukünftigen rechtlichen Anforderungen, als der sinnvollste Ablauf bewertet. Vor diesem Hintergrund ist in den nächsten Jahren sowohl von einer flächendeckenden Sanierung bzw. Erneuerung der bestehenden Faulbehälter auszugehen, als auch mit dem Bau zusätzlicher Faulräume zu rechnen. Es stellt sich somit die Frage nach dem Optimierungs- und Verbesserungspotenzial des Bestandes mit Blick auf die optimierte Nutzung der Faulräume. Dabei wird das propagierte Ziel der energieautarken Kläranlage in Zukunft möglicherweise von anderen, übergeordneten Zielstellungen abgelöst und/ oder verdrängt. Faulgas ist ein regenerativer Energieträger, der flexibel einsetzbar und speicherfähig ist, sodass dieser in Zukunft auch als Energieträger in die Elektrizitäts- oder Gasnetze technisch, betriebswirtschaftlich und volkswirtschaftlich integriert werden kann.

Im Rahmen des vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten (kurz: MULEWF) initiierten Projektes *„Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS“* sollen Ansätze entwickelt werden, wie und unter welchen Rahmenbedingungen der Prozessschritt der Faulung bei bestehenden anaeroben Stabilisierungsanlagen optimiert werden kann, und wie bei neu zu errichtenden Faulungsanlagen Auslegung und Betrieb erfolgen sollen. Dies erfolgt in mehreren aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen.

Für eine Bestandaufnahme der Basisdaten der Faulung wurde in Zusammenarbeit mit Betreibern und Entscheidungsträgern ein Erfassungsbogen entwickelt und auf den Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz angewendet. Neben den für die Faulung relevanten Aspekten gilt es auch eine verlässliche Aussage bezüglich der tatsächlichen an die Kläranlagen angeschlossenen Einwohner sowie der anfallenden Schlammengen zu generieren. Darauf aufbauend erfolgt eine Analyse und Bewertung des Ist-Zustandes. Positive Beispiele für Betrieb und Umsetzung von Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz werden in Bezug auf die für die Faulung relevanten Verfahrensketten näher betrachtet und modellhaft dargestellt. Darüber hinaus soll das mögliche Potenzial für optimierte Faulungskonzepte in Rheinland-Pfalz aufgezeigt und verdeutlicht sowie eine Methodik zur Bestimmung optimierter Randbedin-

gungen eines Faulungsbetriebs in Abhängigkeit von Gasverwertung und nachgelagerter Klärschlammverwertung abgeleitet werden.

Im vorliegenden Sachstandsbericht werden die Ergebnisse der Bestandsaufnahme zusammengefasst dargestellt.

2 Ausgangssituation in Rheinland-Pfalz

In Rheinland-Pfalz sind von derzeit insgesamt 675 kommunalen Kläranlagen (KA) 84 Anlagen mit einer anaeroben Schlammbehandlung, ausgeführt als beheizte Faulräume, ausgestattet (Bezugsjahr 2014). Insgesamt werden sechs von derzeit 70 KA der Größenklasse (GK) 3, 70 von insgesamt 146 KA der GK 4 und alle KA der GK 5 als Anlagen mit getrennter anaerober Schlammbehandlung betrieben. Diese Anlagen werden im Folgenden als Faulungsanlagen bezeichnet. Da Anlagen der Größenklassen 1 und 2 (< 5.000 Einwohnerwerte (EW)) aufgrund der hohen Investitionskosten nicht wirtschaftlich mit anaerober Schlammstabilisierung zu betreiben sind, befinden sich in Rheinland-Pfalz derzeit keine Faulungsanlagen in diesen Größenklassen. Einen Überblick über die Anzahl und Ausbaugröße der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen und deren Aufteilung in die jeweiligen GK gibt Abbildung 1.

Die Ausbaugröße der Faulungsanlagen beträgt in Summe 4,2 Mio. EW. In Rheinland-Pfalz werden ohne die EW der Stadt Ludwigshafen und der angrenzenden Gemeinden, die in der KA der Firma BASF SE behandelt werden, insgesamt 6,9 Mio. EW in kommunalen Kläranlagen behandelt. Die Anlagen mit Faulung stellen folglich insgesamt ca. 60 % der Ausbaugröße kommunaler Kläranlagen in Rheinland-Pfalz.

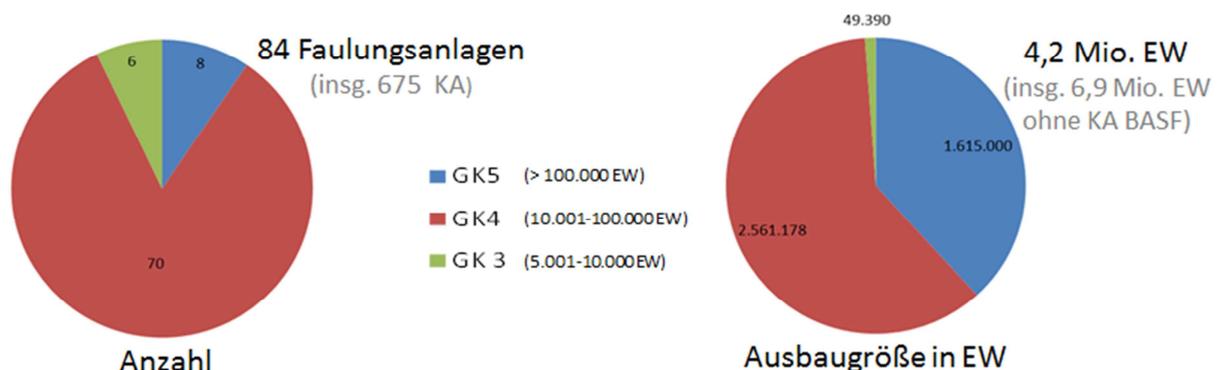


Abbildung 1: Anzahl und Ausbaugröße der Kläranlagen mit Faulung und deren Aufteilung auf die Größenklassen (Bezugsjahr 2014)

Eine Übersicht über die räumliche Verteilung der kommunalen KA in Rheinland-Pfalz gibt Abbildung 2. Darin gekennzeichnet sind die 84 KA mit Faulung (große Punkte). Der überwiegend ländliche Charakter von Rheinland-Pfalz prägt die Größenklassenverteilung der Kläranlagen. Da vor allem große Kläranlagen mit einer anaeroben Schlammbehandlung ausgestattet sind, findet man diese in Ballungszentren und Regionen mit höherer

Bevölkerungsdichte wie bspw. in Trier oder Koblenz, insbesondere entlang der Fließgewässer Mosel, Nahe, Glan, Sieg und im Rheingebiet.

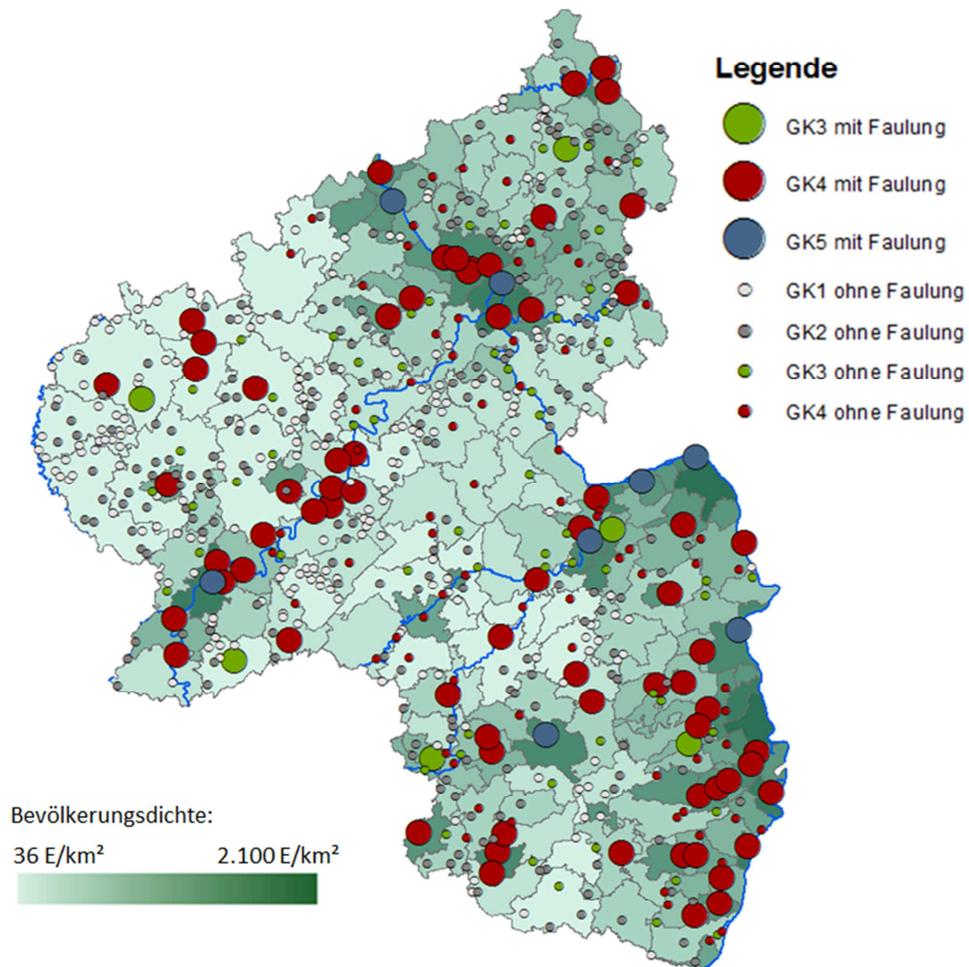


Abbildung 2: Bevölkerungsdichte und räumliche Verteilung der Kläranlagen in Rheinland-Pfalz (Bezugsjahr 2014)

3 Datengrundlage

Im Rahmen des Projektes wurden die Kläranlagenbetreiber der 84 Faulungsanlagen angeschrieben. Der dabei verwendete Fragebogen wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (MULEWF) sowie dem Landesamt für Umwelt (LfU) (ehemals Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (LUWG)) erstellt. Folgende Kennwerte wurden mithilfe des Fragebogens erhoben:

- Allgemeine Kenndaten der Kläranlage (z. B. Ansprechpartner, Ausbaugröße, Indirekteinleiter)
- Parameter der Abwasserreinigung (z. B. Abwassermengen, Zulauffrachten, Beckenvolumina, Schlammalter, Phosphor-Elimination)

- Angaben zum Schlammanfall (z. B. Primärschlamm, Überschussschlamm, externe Schlämme, Co-Substrate, Faulschlamm)
- Angaben zur Faulstufe (z. B. Verfahrensführung, Baujahr, Isolierung, Durchmischung, Betriebstemperatur)
- Mengenangaben zum Klärgasanfall (inkl. Methan-Gehalt)
- Art und Umfang der Klärgasnutzung
- Informationen zur Faulschlamm entwässerung und -verwertung
- Angaben zum Erdgasnetz- und dem Stromnetzanschluss
- Daten zur Strom- und Energieerzeugung
- Angaben zur Leittechnik und sonstige Aggregate

Der komplette Fragenbogen ist dem Anhang 1 zu entnehmen.

Insgesamt wurden 64 auswertbare Fragebogen zurückgesendet. Diese stehen für eine statistische Auswertung zur Verfügung. Bezogen auf die Anzahl der angefragten Anlagen wurde eine Rücklaufquote von 76 % erreicht. Da sich alle großen KA in Rheinland-Pfalz an der Befragung beteiligt haben, wurden bezogen auf die Gesamtausbaugröße der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen 88 % der Ausbaugröße erfasst (Abbildung 3). Diese sehr gute Rücklaufquote wurde auch durch die Unterstützung des MULEWF und des LfU erreicht.

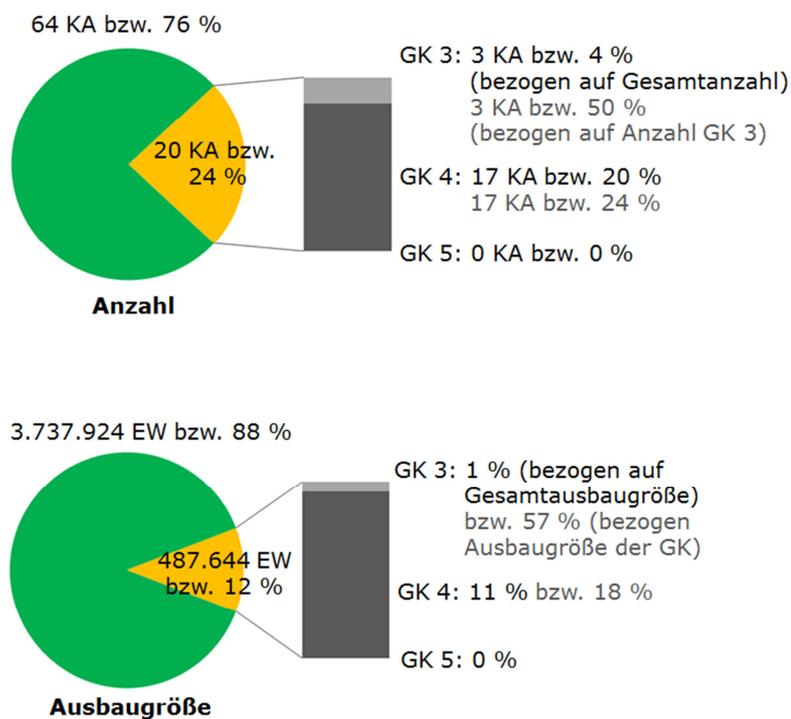


Abbildung 3: Statistische Auswertung der Rückläufe bezogen auf die Anzahl (oben) und die Ausbaugrößen (unten)

4 Methodik

Für die Auswertung der übergebenen Daten werden einwohnerspezifische Kennwerte generiert, die einen Vergleich der Anlagen untereinander und einen Vergleich der Anlagen mit Literaturwerten erlauben. Eine grafische Darstellung der spezifischen Kennwerte erfolgt durch sogenannte Boxplot-Diagramme. Darin werden die Häufigkeitsverteilungen über die 25 %-, 50 %- und 75 %-Quantile dargestellt. Außerdem werden in den Diagrammen die Minima und Maxima gezeigt, um die gesamte Streubreite der Ergebnisse zu verdeutlichen. Die jeweilige Datengrundlage lässt sich an der Anzahl n der in die Auswertung eingeflossenen Datensätze ablesen.

Erste Plausibilitätsprüfungen und eine Auswertung von Betriebstagebüchern von fünf ausgewählten KA haben gezeigt, dass die übergebenen Daten vereinzelt nicht plausibel sind. Dies ist ebenfalls in den Diagrammen durch die dargestellten Minima und Maxima ersichtlich, die oft deutlich außerhalb des Vertrauensbereiches liegen, welcher durch die 25 %- bzw. 75 %-Quantile definiert wird.

Um die Kennwerte der einzelnen Abwasseranlagen miteinander vergleichen zu können, werden diese auf die jeweilige Anschlussbelastung bezogen. Die als 24 h-Mischproben erhobenen Messdaten des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Zulaufbereich der Kläranlagen eignen sich erfahrungsgemäß sehr gut für die Ermittlung der Anschlussbelastung. In Anlehnung an das DWA-Arbeitsblatt A 216 (DWA 2015) wurde die mittlere CSB-Fracht als maßgebende Bezugsgröße ausgewählt und die Anschlussbelastung unter Verwendung der einwohnerspezifischen CSB-Fracht von $120 \text{ g}/(\text{E} \cdot \text{d})$ in Anlehnung an DWA (2015) ermittelt. Dabei ist zu beachten, dass die übergebenen CSB-Zulauffrachten an verschiedenen Messstellen ermittelt werden. So sind die Kennwerte als Rohzulauffrachten ($B_{\text{d},\text{xxx},\text{Z}}$), als Rohzulauffrachten inklusive der Rückbelastung durch interne Prozesswässer ($B_{\text{d},\text{xxx},\text{Z}+\text{P}}$) oder als Frachten im Zulauf zum Belebungsbecken ($B_{\text{d},\text{xxx},\text{ZB}}$) angegeben. Die entsprechende Aufteilung ist in Abbildung 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nur etwa die Hälfte der Anlagen Rohzulauffrachten messen.

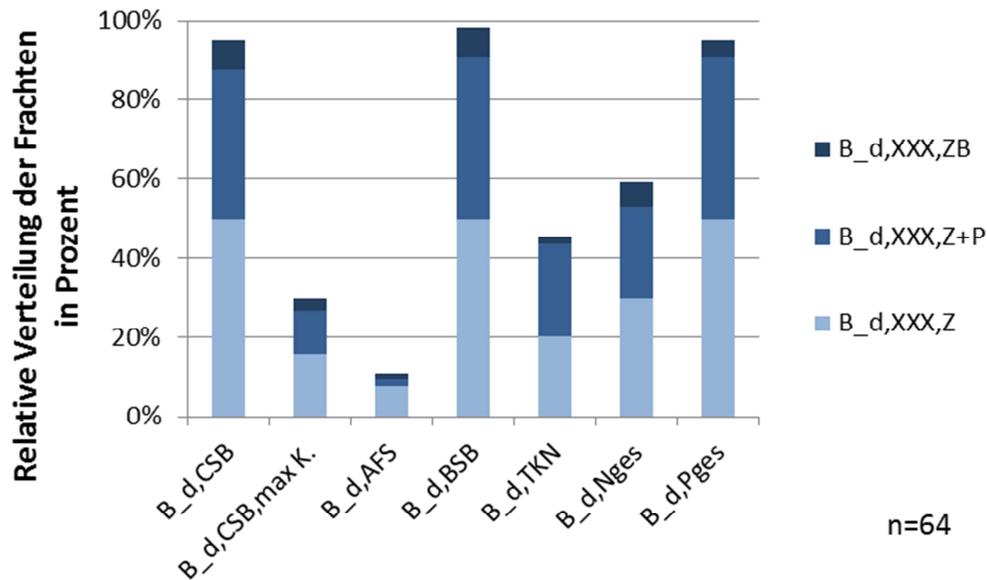


Abbildung 4: Relative Verteilung der übermittelten Zulauffrachten bezogen auf die Messstelle in der Kläranlage

Bei den CSB-Frachten, welche inklusive der Rückbelastung angegeben wurden, wird zur Ermittlung der Rohzulauffracht die Rückbelastung subtrahiert. Die Rückbelastung durch CSB im Prozesswasser ist im Verhältnis zum Stickstoff nachrangig (ATV-DVWK 2000) und kann nach Neis et al. (1994) und Cornel (1997) im Verhältnis zur Zulauffracht mit etwa 10 % angesetzt werden. Dieser Wert wird für die weiteren Berechnungen verwendet. CSB-Frachten, die im Ablauf der Vorklärung gemessen wurden, werden nicht zur Ermittlung der Einwohnerwerte herangezogen. Auf eine Rückrechnung der tatsächlichen Zulaufbelastung mithilfe vorhandener Richtwerte für die Abscheideleistung nach ATV-DVWK (2000) wird verzichtet, da die Ergebnisse dadurch zu stark verfälscht werden. Diesbezüglich wird auf die Ergebnisse des Kapitels 5.1 verwiesen, in welchem kein Zusammenhang zwischen der Aufenthaltszeit in der Vorklärung und dem Primärschlammanfall nachgewiesen werden kann.

Abbildung 5 zeigt die in den Erhebungsbögen angegeben CSB-Frachten ohne interne Rückbelastung (blaue Sterne) und inklusive interner Rückbelastung (blaue Rauten). Mit Hilfe des pauschalen Ansatzes von 10 % bezogen auf die Zulauffracht für das Herausrechnen der internen Rückbelastung ergibt sich die Verteilung der mittleren CSB-Rohzulauffracht (rote Punkte), die allen weiteren Betrachtungen zugrunde gelegt wird.

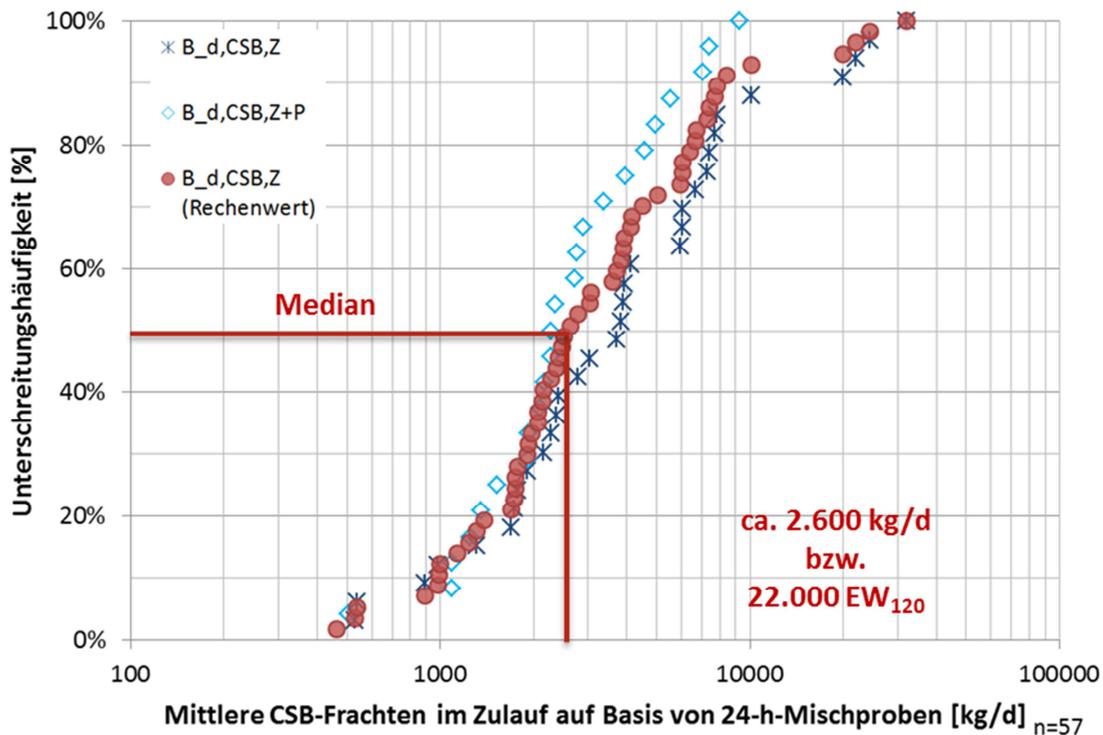


Abbildung 5: Mittlere CSB-Frachten im Zulauf der ausgewerteten (Bezugsjahr 2014)

Für eine Klassifizierung der Anlagen wird anstatt einer Einteilung in Größenklassen nach der Abwasserverordnung (AbwV 2004) eine Einteilung nach mittlerer Anschlussbelastung vorgenommen. Dafür wurden, um die Datengrundlage zu erhöhen, alle übergebenden Zulauffrachten herangezogen. Die Einteilung der Anlagen erfolgt nach folgenden Kriterien in fünf Klassen:

- $EW \leq 10.000 \text{ E}$
- $10.000 \text{ E} < EW \leq 20.000 \text{ E}$
- $20.000 \text{ E} < EW \leq 50.000 \text{ E}$
- $50.000 \text{ E} < EW \leq 100.000 \text{ E}$
- $EW > 100.000 \text{ E}$

Als Grenzen für die Klassifizierung wurde die Größenklassengrenze zwischen GK 3 und GK 4 sowie zwischen GK 4 und GK 5 gewählt. Außerdem wurden weitere Grenzen eingeführt, um die mit 50 von 84 Anlagen stark dominierenden Anlagen der GK 4 in drei Klassen zu unterteilen. Da sich nach Gretzschel et al. (2012) die Wirtschaftlichkeitsgrenze für eine Verfahrensumstellung von simultan aerober auf anaerobe Schlammstabilisierung bei Einwohnerwerten ab ca. 20.000 E befindet, wurde diese Grenze eingeführt. Die Grenze bei Einwohnerwerten von 50.000 E wurde gewählt, um eine gleichmäßigere Verteilung der Anlagen zu erhalten Abbildung 6.

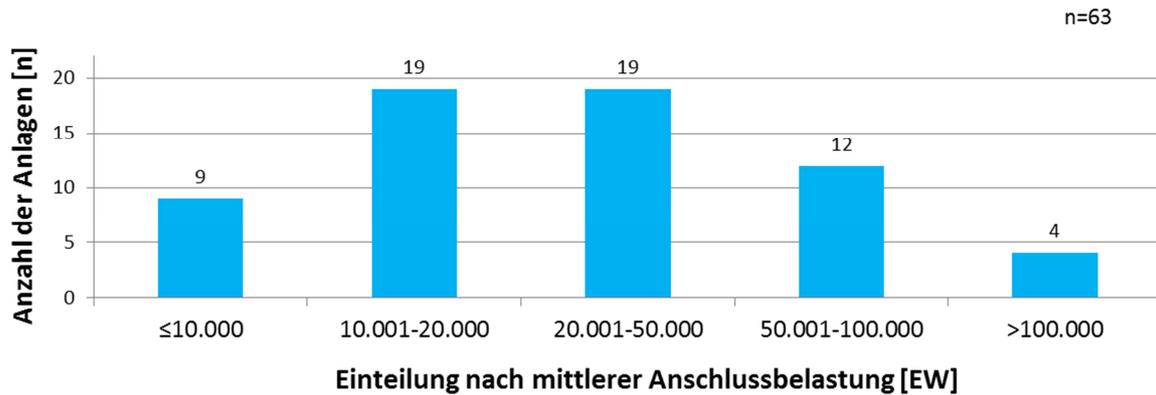


Abbildung 6: Klassierung der KA nach mittlerer Anschlussbelastung

Es zeigt sich, dass in Rheinland-Pfalz heute bereits viele kleinere Anlagen mit einer Schlammfaulung ausgestattet sind. Derzeit werden weitere umgerüstet bzw. die Wirtschaftlichkeit einer Umstellung geprüft.

5 Schlammfall und Schlammbeschaffenheit

Die in den verschiedenen Schlammfraktionen (Tabelle 1) enthaltene Trockenmasse pro Einwohner und Tag wird in Anlehnung an DWA-M 368 (DWA 2014) als einwohnerspezifische Schlammfracht ($b_{TM,E,d}$) bezeichnet. Im Fragebogen wurden der Trockenrückstand (TR) und Glühverlust (GV) abgefragt. Zur Ermittlung der spezifischen Frachten wird vereinfacht von einer Schlammichte von 1,0 kg/l ausgegangen, um über den Trockenrückstand die Trockenmasse (TM) zu berechnen. Die Frachtberechnung erfolgt nach folgender Gleichung:

$$b_{TM,E,d} = \frac{Q \cdot TR \cdot \rho / 365 \left[\frac{d}{a} \right]}{\frac{B_{d,CSB,Z}}{0,12 \left[\frac{kg \text{ CSB}}{E \cdot d} \right]}} \quad (\text{Gleichung 5.1})$$

- Mit:
- $b_{TM,E,d}$ - Einwohnerspezifische Trockenmasse-Fracht [g/(E·d)]
 - Q_X - Volumenstrom [m³/d]
 - TR - Trockenrückstand [%]
 - ρ - Dichte [kg/l]
 - $B_{d,CSB,Z}$ - CSB-Tagesfracht im Rohzulauf [kg/d]

Tabelle 1: Begriffserklärung für Klärschlamm

Abk.	Schlammfraktion	Charakteristik
PS	Primärschlamm	Schlamm der in der Vorklärung anfällt
ÜS	Überschussschlamm	Schlamm der in der biologischen Stufe anfällt
RS	Rohschlamm	Unstabilisierte Mischung aus PS und ÜS
FS	Faulschlamm	Stabilisierte Mischung aus PS und ÜS
KS	Klärschlamm	Behandelter Schlamm

Die resultierenden Schlammmengen, getrennt nach den Schlammarten Primärschlamm (PS), Überschussschlamm (ÜS), Rohschlamm (RS) und Faulschlamm (FS) sowie für das Inputmaterial (RS + Co-Substrat), sind in Abbildung 7 zusammenfassend dargestellt.

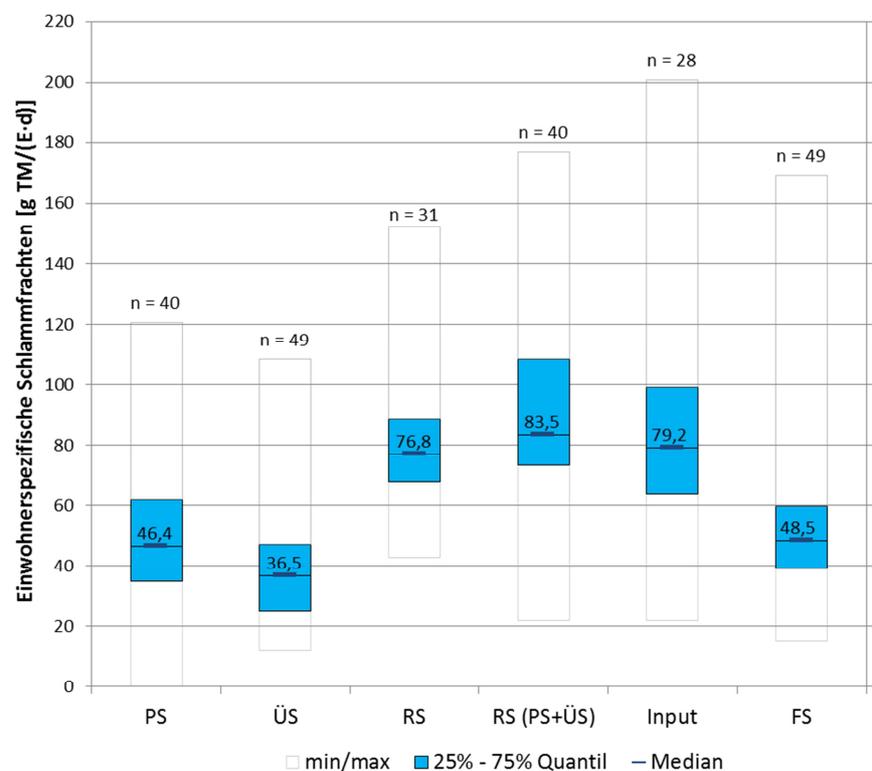


Abbildung 7: Einwohner-spezifische Frachten verschiedener Schlammfraktionen (Bezugsjahr 2014)

Der Median der spezifischen Primärschlammfracht liegt bei 46,4 g TM/(E·d). Dieser Wert liegt leicht über der im DWA Arbeitsblatt 131 (ATV-DVWK 2000) angegebenen Abscheideleistung der Vorklärung von 45 g TS/(E·d) für eine Durchflusszeit von 1,5 bis 2,0 h, ist jedoch deutlich höher als die im DWA Merkblatt 368 (DWA 2014) angegebenen 50-Perzentil von 24 g TM/(E·d) ($t_{VK} = 0,5$ h) bis 32 g TM/(E·d) ($t_{VK} = 2,0$ h).

Die im DWA Merkblatt 368 (DWA 2014) angegebenen spezifischen TM-Frachten im Überschussschlamm sind abhängig von der Aufenthaltszeit in der Vorklärung sowie der Temperatur und dem Schlammalter in der Belebung und werden als 50-Perzentil im Bereich

von minimal 27,4 g TM/(E·d) bis maximal 42,5 g TM/(E·d) angegeben. Dieser Bereich wird durch die ermittelten spezifischen Überschussschlammfrachten gut wiedergegeben, was auch der Median von 36,5 g TM/(E·d) zeigt.

Die Rohschlammfrachten wurden auf zwei Arten ermittelt. Sie wurden zum einen direkt aus den abgefragten Rohschlammdaten und zum andern über die Summe aus der Primär- und Überschussschlammfracht bestimmt. In beiden Fällen ergeben sich für die Mediane mit 76,8 bzw. 83,5 g TM/(E·d) eine sehr gute Übereinstimmung mit den Auswertungen von Möller (1994), bei dem ein Wert von 80 g TS/(E·d) angegeben wird. Allerdings liegen die ermittelten spezifischen RS-Frachten deutlich über dem im DWA Merkblatt 386 (DWA 2014) angegebenen mittleren Wert von 60 g TM/(E·d). Dieser bezieht sich jedoch auf ein Schlammalter in der Belebung von 12,5 Tagen und eine Aufenthaltszeit in der Vorklärung von einer Stunde.

Um dem Trend zur Co-Fermentation auf Kläranlagen Rechnung zu tragen ist die Inputfracht in Anlehnung an das DWA Merkblatt 380 (DWA 2009) als weitere Frachtgröße definiert. Sie wurde abgefragt als Zulauf zum Faulbehälter und enthält außer dem Primär- und Überschussschlamm auch Co-Substrate und Fremdschlämme. Die Auswertung zeigt mit einem Median von 79,2 g TM/(E·d) nur leicht höhere einwohnerspezifische Frachten im Zulauf der Faulbehälter gegenüber der Rohschlammfracht. Der Median des ausgefaulten Schlammes ergibt sich zu 48,5 g TM/(E·d). Dieser Wert deckt sich ebenfalls mit den Literaturwerten nach Möller (1994), bei dem rund 50 g TS/(E·d) angegeben werden.

Nachfolgend wird näher auf die einzelnen Schlammfrachten eingegangen.

5.1 Primärschlammfall

Der Primärschlamm wird durch Sedimentation in der Vorklärung abgetrennt und ist nach ATV-DVWK (2000) direkt von der Aufenthaltszeit in der Vorklärung (t_{VK}) und damit vom Wirkungsgrad der Feststoffabtrennung abhängig. Zur Berechnung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung wird der abgefragte mittlere Trockenwetterzufluss ($Q_{T,d,aM}$) und das Volumen der Vorklärbecken (V_{VK}) herangezogen (Gleichung 5.1).

$$t_{VK} = \frac{V_{VK}}{Q_{T,d,aM}/24 \frac{h}{d}} \quad (\text{Gleichung 5.1})$$

Mit:	t_{VK}	Aufenthaltszeit in der Vorklärung [h]
	V_{VK}	Volumen der Vorklärbecken [m ³]
	$Q_{T,d,aM}$	Trockenwetterzufluss im Jahresmittel [m ³ /d]

In Anlehnung an ATV-DVWK-A 198 (2003) wird der maximale Trockenwetterabfluss ($Q_{T,2h,max}$) als 2-Stunden-Mittel mithilfe des Stundenspitzenfaktors X_{Qmax} in Abhängigkeit von der Ausbaugröße der KA bestimmt (Gleichung 5.2). Die damit errechnete Aufenthaltszeit in der Vorklärung $t_{VK,2h,max}$ kann für Vergleiche mit der ATV-DVWK (2000) oder DWA (2014) herangezogen werden.

$$t_{VK,2hmax} = \frac{V_{VK}}{\frac{Q_{T,d,aM}}{x_{qmax}}} \quad (\text{Gleichung 5.2})$$

Mit: $t_{VK,2h,max}$ Maximale Aufenthaltszeit in der Vorklärung als 2-Stunden-Mittel [h]

$x_{Q,max}$ Stundenspitzenfaktor, Divisor nach ATV-DVWK (2003) [h/d]

In Abbildung 8 sind die so berechneten Aufenthaltszeiten in der Vorklärung getrennt für die beiden Lastfälle dargestellt. Für fast alle Kläranlagen resultiert rechnerisch bei maximalem Trockenwetterzufluss $Q_{T,2h,max}$ eine für die Faulung günstige Aufenthaltszeit von über einer Stunde. Auch bei Berechnung der Verweildauer t_{VK} über den mittleren Trockenwetterzufluss $Q_{T,d,aM}$ ergeben sich für alle Anlagen Aufenthaltszeiten von über einer Stunde.

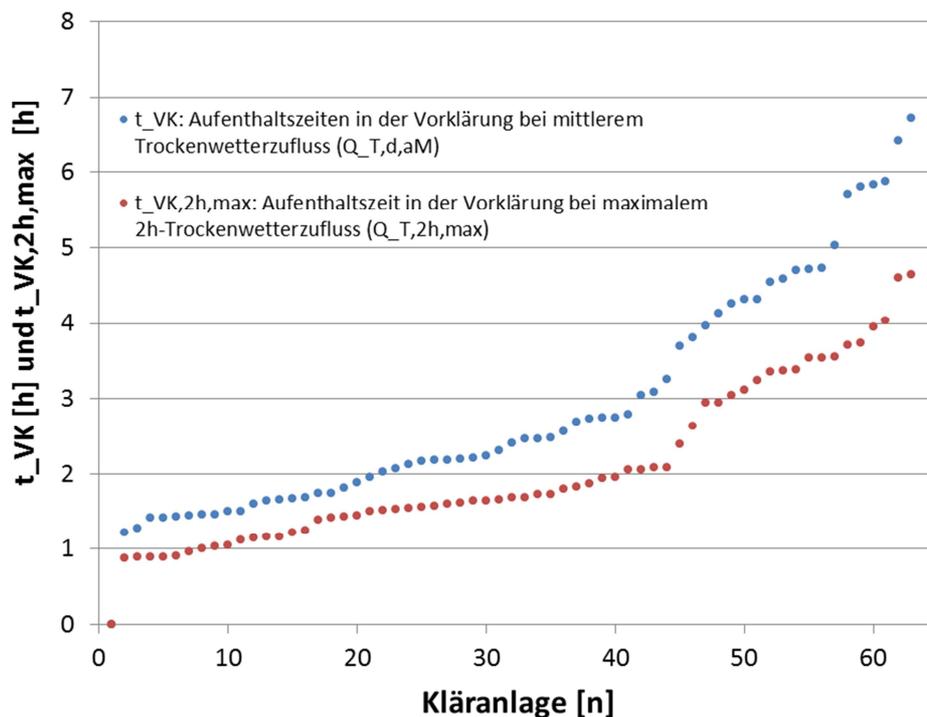


Abbildung 8: Aufenthaltszeiten in der Vorklärung (Bezugsjahr 2014)

Wertet man den spezifischen Primärschlammanfall in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit t_{VK} aus (Abbildung 9), lässt sich anhand der ausgewerteten Datensätze allerdings keine Zunahme der Abscheideleistung bei steigenden Aufenthaltszeiten erkennen, wobei die Werte stark variieren.

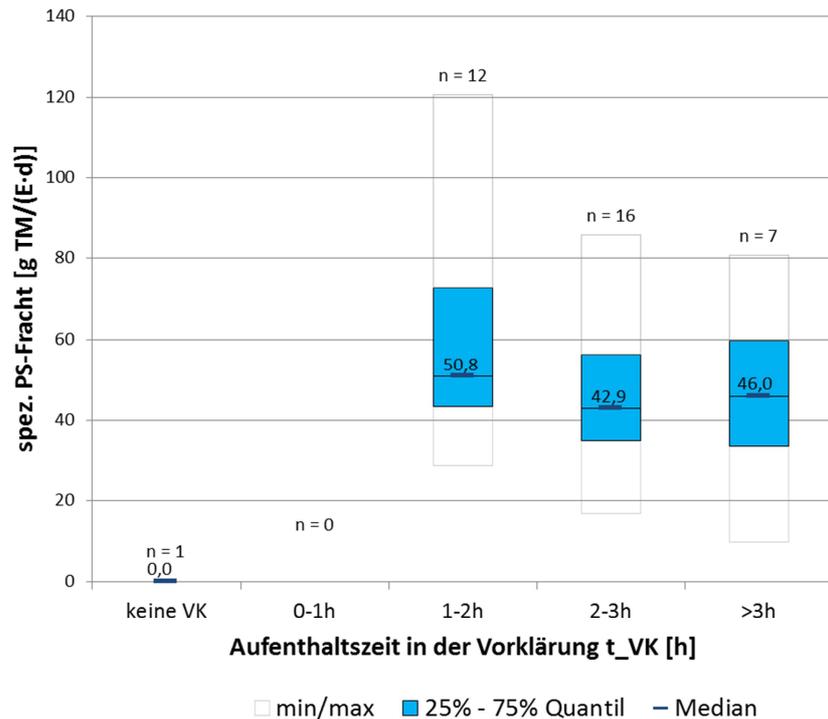


Abbildung 9: Einwohnerspezifische Primärschlammfracht in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit in der Vorklärung bei mittlerem Trockenwetterzufluss (Bezugsjahr 2014)

5.2 Überschussschlammfall

Die einwohnerspezifische Überschussschlammfracht wurde in Abhängigkeit vom Schlammalter im Belebungsbecken $t_{TS, BB}$ ausgewertet. Dieses wurde im Fragebogen abgefragt und zur Plausibilitätskontrolle anhand des angegebenen Trockensubstanzgehaltes im Belebungsbecken TS_{BB} , dem Belebungsbecken volumen V_{BB} und der Überschussschlammmenge $Q_{ÜS}$ überprüft.

In Abbildung 10 zeigt sich die zu erwartende Abnahme des spezifischen Überschussschlammfalls mit steigendem Schlammalter. Es fällt auf, dass etwa 2/3 der Anlagen die Belebungsstufe mit einem Schlammalter größer 15 Tage betreiben. In Abhängigkeit von der Abwassertemperatur wird bei diesen Anlagen der Belebtschlamm bereits teilweise simultan aerob stabilisiert und damit der potenzielle Gasanfall in der Faulung reduziert.

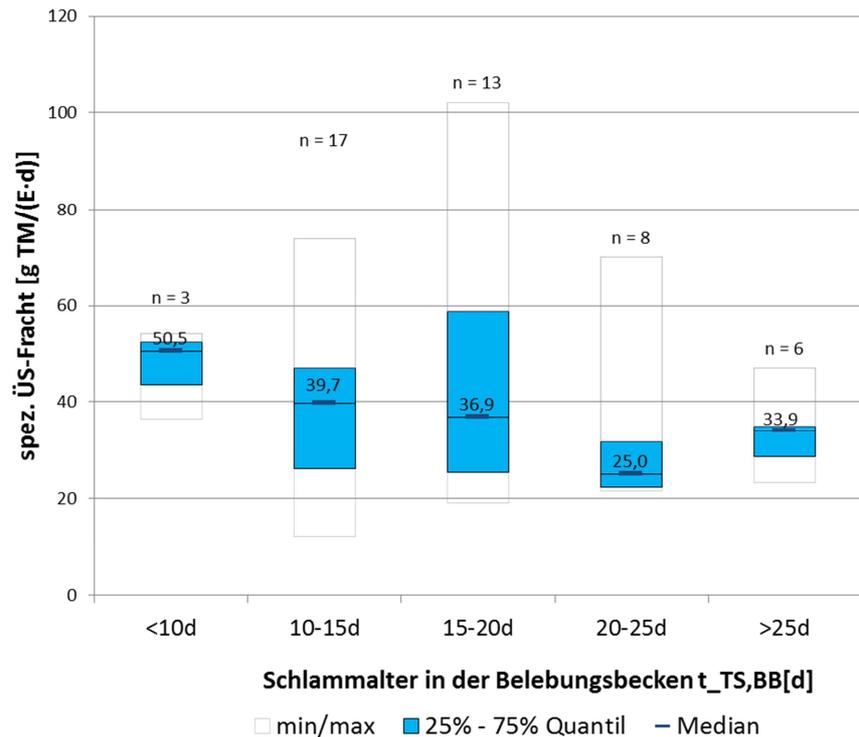


Abbildung 10: Spezifische Überschussschlammfrachten in Abhängigkeit vom Schlammalter in der Belebung (Bezugsjahr 2014)

5.3 Rohschlammanfall

Wie in Abbildung 11 dargestellt, ergeben sich in Abhängigkeit von der Anschlussbelastung der Kläranlagen Mediane der Rohschlammfrachten ohne Co-Substrate oder Fremdschlämme zwischen minimal 64 und maximal 84,6 g TM/(E·d). Die niedrigsten einwohnerspezifischen Kennwerte ergeben sich für die Anlagen der Kategorie > 100.000 EW. Allerdings liegen für diese Kategorie auch nur drei Datensätze vor. Die höchsten einwohnerspezifischen Kennwerte ergeben sich für die Anlagen der Kategorie 50.001 - 100.000 EW. Allerdings resultieren hier auch die größten Schwankungen. Die Werte der Kläranlagen der Kategorie < 50.000 EW decken sich gut mit dem von Möller (1994) angeben Wert von 80 TS/(E·d). Der für die Anlagen der Kategorie > 100.000 EW resultierende Kennwert liegt dagegen deutlich darunter.

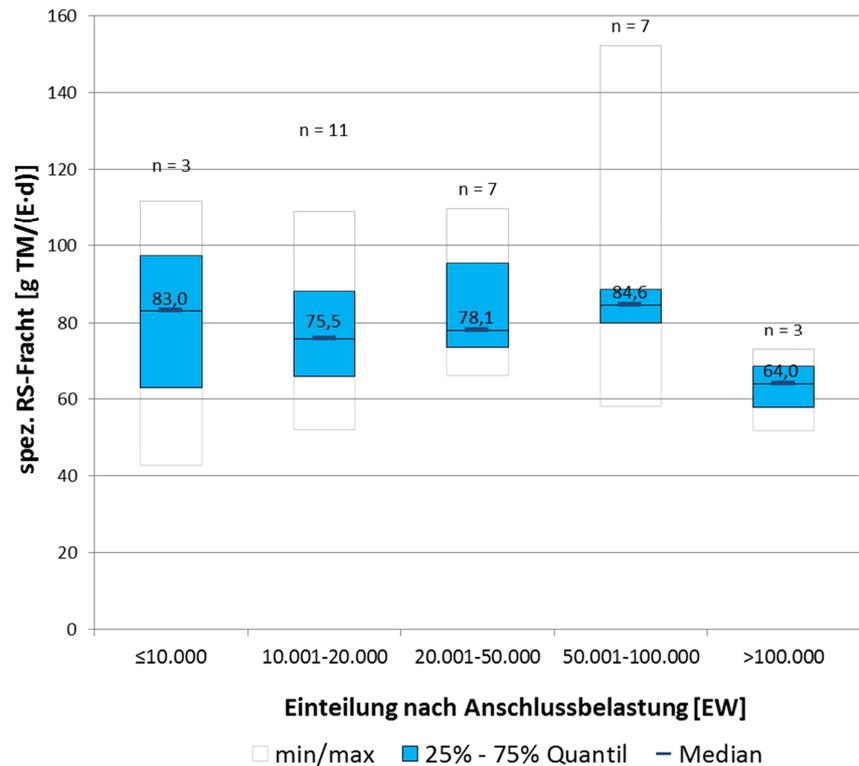


Abbildung 11: Einwohnerspezifische Rohschlammfrachten in Abhängigkeit von der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

5.4 Faulschlammanfall

Abbildung 12 zeigt die ermittelten spezifischen Faulschlammfrachten in Abhängigkeit von der Anschlussbelastung der Kläranlagen.

In Abhängigkeit von der Anschlussbelastung liegen die resultierenden Mediane zwischen 44,5 g TM/(E·d) und 57,1 g TM/(E·d). Die größeren Kläranlagen weisen dabei deutlich geringere Trockenmassengehalte im Faulschlamm gegenüber den kleineren Anlagen auf. Der Glühverlust liegt dabei unabhängig von der Größenklasse im Median bei 55% (vgl. Kapitel 6.5).

Legt man die Mediane zu Grunde und vernachlässigt die Zugabe von Co-Substraten, wird die Trockenmasse infolge Faulung um 31 % bis 46 % reduziert. Die geringste Reduktion ergibt sich bei den Anlagen der Kategorie > 100.000 EW, was jedoch auf die im Vergleich zu den anderen Anlagen niedrige spezifische Rohschlammfracht zurückgeführt werden kann (s. o.). Im DWA Merkblatt 368 (DWA 2014) wird bei einem technischen Abbaugrad von 85 % der Abbaugrad des Rohschlammes mit 35 % bezogen auf die Trockenmasse angegeben.

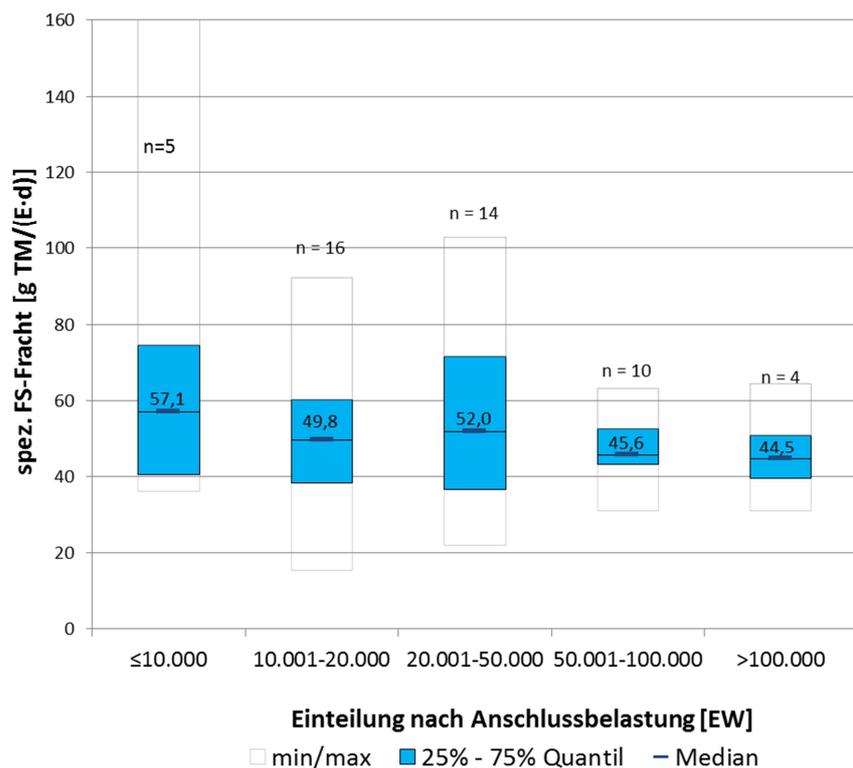


Abbildung 12: Einwohnerspezifische Faulschlammfrachten in Abhängigkeit der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

6 Parameter der Faulung und Gasertrag

In diesem Kapitel werden die wesentlichen die Faulstufe betreffenden Parameter dargestellt. Neben den Parametern Betriebstemperatur und Faulzeit werden auch die Kenngrößen einwohnerspezifisches Faulraumvolumen, organische Raumbelastung, einwohnerspezifischer Klärgasanfall, Gasertrag und Methangehalt betrachtet.

6.1 Betriebstemperatur

Abgefragt wurden die mittlere, minimale und maximale Betriebstemperatur der Faulbehälter. In Abbildung 13 sind die angegebenen Temperaturen aufgetragen, wobei die mittlere Temperatur jeweils als Punkt und der Minimal- und Maximalwert als Linie dargestellt ist. Unterschieden wird dabei auch die Anzahl der Faulbehälter.

Im Mittel werden die Faulbehälter mit einer Temperatur von ca. 36,5 °C betrieben und somit im Bereich des Temperaturoptimums des mesophilen¹ Bakterienwachstums, wobei die Temperatur in einigen Fällen im Faulbehälter 2 geringer ist als im Faulbehälter 1. Bei einigen Faulbehältern wird im Jahresverlauf die mittlere Temperatur strikt eingehalten, wohingegen

¹ Mesophil: Temperaturbereich zwischen 30 °C und 40 °C

andere Anlagen sehr große Temperaturschwankungen aufzeigen. Vereinzelt werden Temperaturen über 40 °C angegeben. Diese Anlagen werden zumindest zeitweise im Übergang zum thermophilen² Temperaturbereich betrieben. Einige Anlagen betreiben die Faulbehälter konstant oder nur temporär bei Temperaturen kleiner 30 °C.

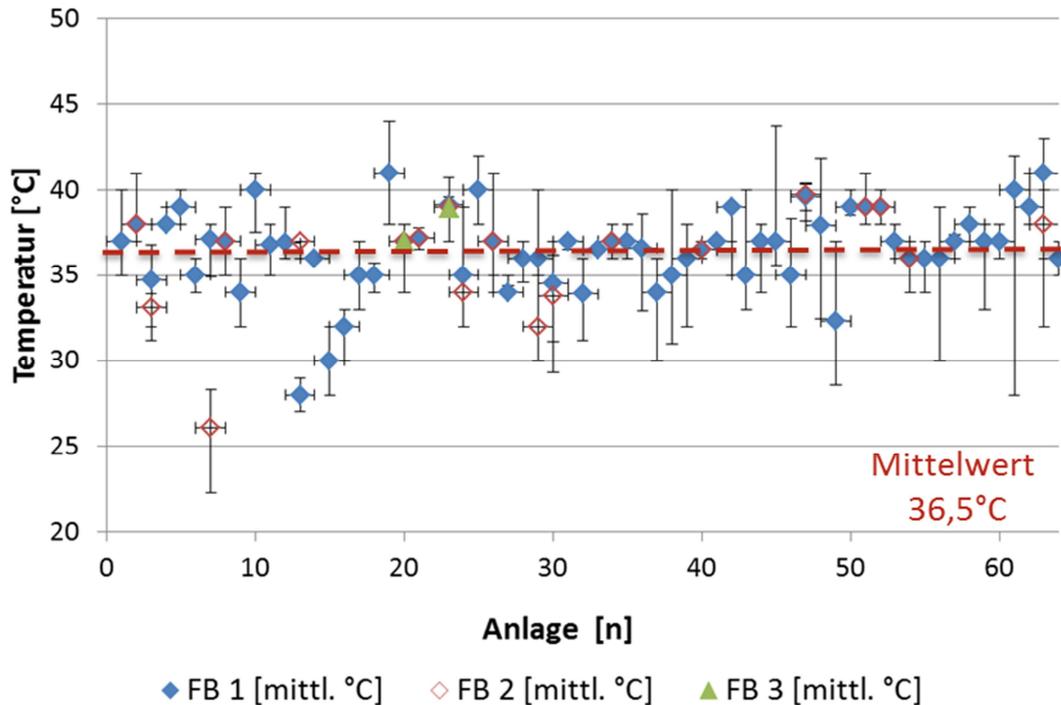


Abbildung 13: Temperaturen der einzelnen Faulbehälter im Vergleich (Bezugsjahr 2014)

6.2 Faulzeit

Im Fragebogen wurde die Faulzeit (t_{FB}) - definiert als Aufenthaltszeit des Schlammes im jeweiligen Faulbehälter - als Mittelwert über den Betrachtungszeitraum in Tagen abgefragt. Zusammen mit der Information, ob eine Anlage mehrstraßig oder mehrstufig betrieben wird, kann die mittlere gesamte Faulzeit ($t_{FB,ges}$) ermittelt werden.

In Abhängigkeit von der Anschlussbelastung liegen die resultierende Mediane zwischen 27 und 36 Tagen. In Einzelfällen werden sogar Aufenthaltszeiten von bis zu 90 Tagen erreicht (Abbildung 15). Die hohen Faulzeiten lassen auf ein vorhandenes Potenzial zur Aufnahme zusätzlicher organischer Frachten schließen. Dies ist insbesondere bei kleineren Anlagen zu erkennen. In der Literatur werden abhängig von der Anlagengröße und dem Verfahren Faulzeiten zwischen 12 und 28 Tagen empfohlen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

² Termophil: Temperaturbereich zwischen 50°C und 55 °C

Nach Roediger et al. (1990) findet bereits ab einer Faulzeit von 15 Tagen kein signifikanter Abbau der organischen Substanzen und damit auch kein signifikanter Anstieg der Gasentwicklung mehr statt. Demnach sollte sich die Faulzeit bei den meisten Anlagen ohne wesentliche Verluste beim Abbaugrad oder der Gasentwicklung reduzieren lassen. Durch die Möglichkeit den Zulaufstrom zu den Faulbehältern zu erhöhen, ergeben sich z. B. Kapazitäten zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen oder Co-Substraten.

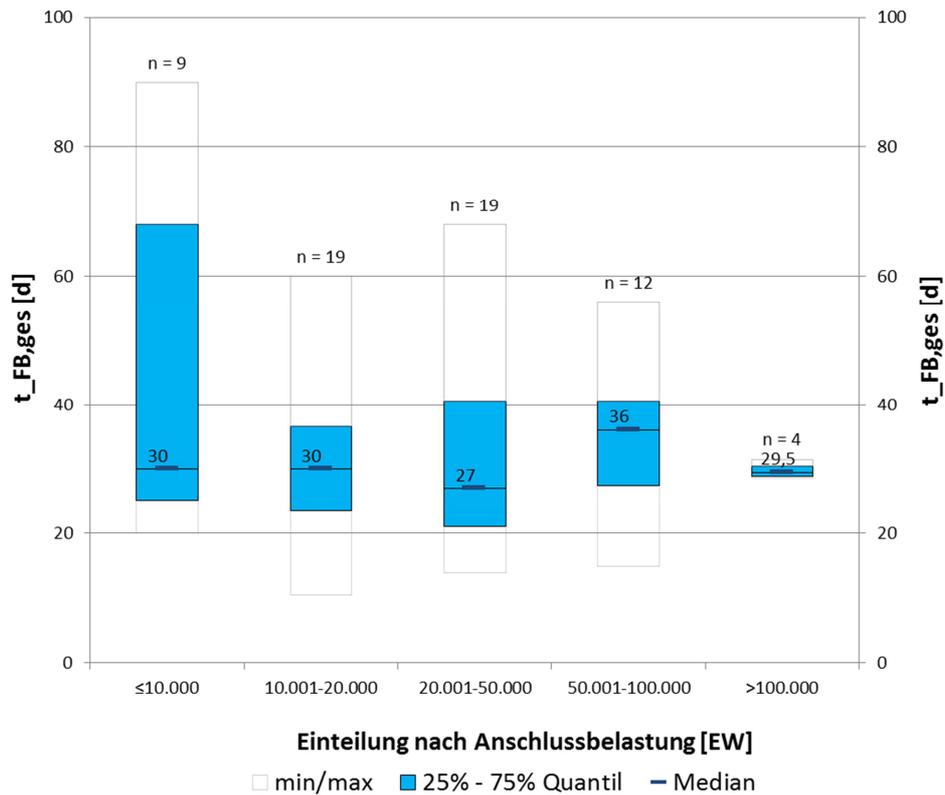


Abbildung 14: Mittlere Faulzeit in Abhängigkeit der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

Tabelle 2: Richtwerte der Faulzeit bzw. des Schlammalters zur Faulraumbemessung

Anlagengröße		<50.000 EW	50.000 - 100.000 EW	>100.000 EW
t_{FB} [d] (Bischofsberger et al. 2005)		20	15-20	15
t_{FB,ges} [d] (DWA-M 368, 2015)	Einstufig Faulung	20-28	18-25	16-22
	Zweistufige Faulung	14-19	13-17	12-15

6.3 Faulraumvolumen

Das einwohnerspezifische Faulraumvolumen aller in die Auswertung eingeflossenen Anlagen liegt im Mittel bei 77 l/E. Nach Bischofsberger et al. (2005) wird ein einwohnerspezifisches Faulraumvolumen zwischen 20 und 50 Liter pro Einwohnerwert vorgeschlagen, welches bei den größeren Anlagen in Rheinland-Pfalz nahezu, wenngleich an der Obergrenze der angegebenen Spannweite, eingehalten wird. Die meisten der untersuchten Faulungsanlagen weisen ein deutlich höheres spezifisches Faulraumvolumen auf. Vor allem für die kleineren Anlagen resultieren im Ist-Zustand deutlich erhöhte spezifische Faulraumvolumina, was sich in den Medianen von 70 l/E für Anlagen der Kategorie 10.001 - 20.000 E und von 135 l/E für die Kategorie < 10.000 E zeigt.

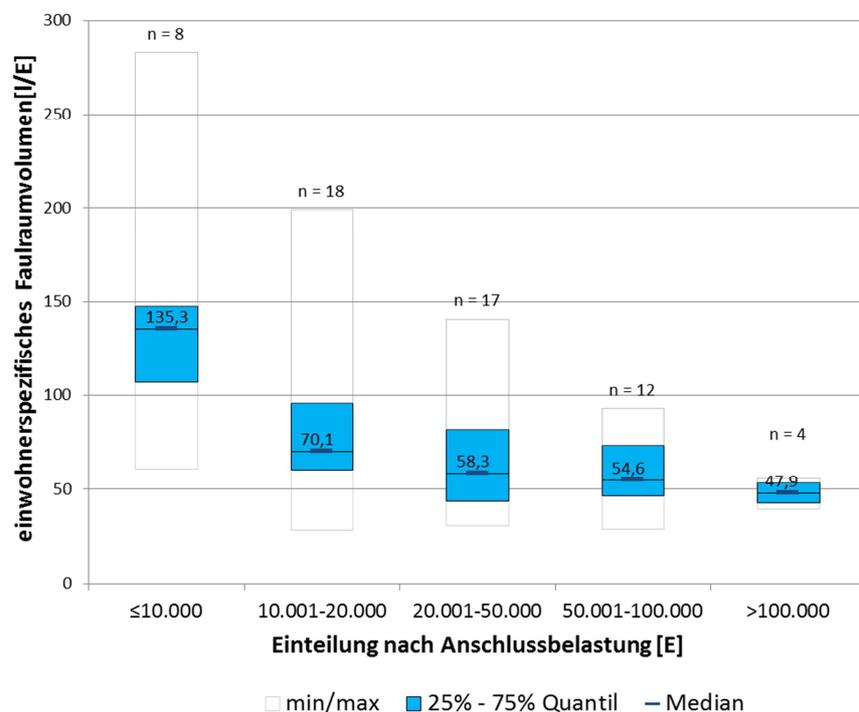


Abbildung 15: Einwohnerspezifisches Faulraumvolumen bezogen auf die Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

Es ist zu beachten, dass einige Anlagen Fremdschlämme und Co-Substrate annehmen. Diese wurden unter Umständen bereits bei der Dimensionierung der Faulbehälter berücksichtigt (z.B. Kläranlage Selters). Daher kann bei der Betrachtung des aktuellen spezifischen Faulraumvolumens eine Anpassung der Bezugsgröße Einwohnerwerte um die zusätzlichen externen Belastungen sinnvoll sein. Setzt man für Co-Substrate und Fremdschlämme einen pauschalen Zuschlag von 80 g TM/d = 1 EW an, ergibt sich die in Abbildung 16 dargestellte Verteilung des einwohnerspezifischen Faulraumvolumens. Es resultieren dadurch leicht geringere spezifische Volumina, welche bei den kleinen Anlagen mit einem Median von 117 l/E dennoch sehr hoch sind.

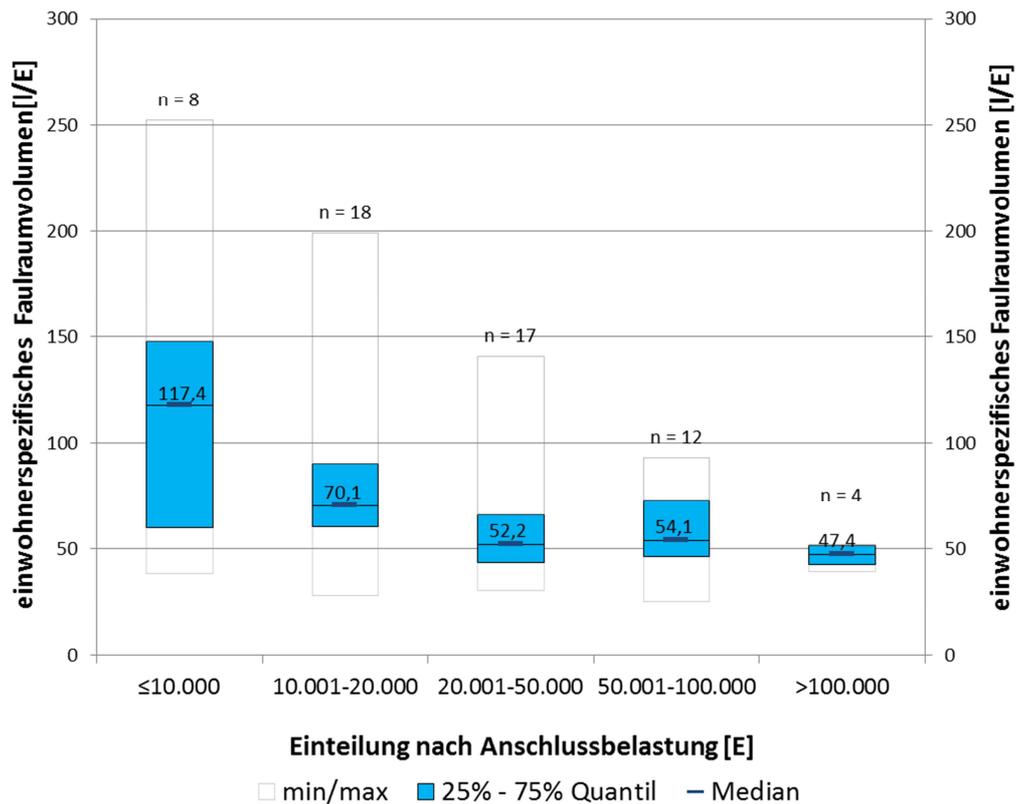


Abbildung 16: Einwohnerspezifisches Faulraumvolumen [l/E] bezogen auf die Anschlussbelastung zuzüglich der vorhandenen externen Belastung (Bezugsjahr 2014)

6.4 Raumbelastung

Analog zu den hohen Faulzeiten ergeben sich niedrige Raumbelastungen. Die Medianwerte der von den Betreibern angegebenen mittleren Raumbelastung ($B_{R,OTR}$) liegen bei ca. $1,1 \text{ kg oTR}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. In der Literatur wird die organische Raumbelastung in Abhängigkeit der Anlagengröße im Bereich zwischen $1,0$ bis $4,5 \text{ kg oTR}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ angegeben (Tabelle 3). Die angegebenen mittleren Raumbelastungen in Abbildung 17 zeigen, dass der überwiegende Teil der Anlagen nicht überlastet ist und umgekehrt freie Kapazitäten aufweisen.

Tabelle 3: Kennwerte zur organischen Raumbelastung

Anlagengröße		< 50.000 EW	50.000 - 100.000 EW	>100.000 EW
Übliche organische Raumbelastung bei der Co-Vergärung [kg oTR/(m³·d)] (DWA-M 380, 2009)		1,5	bis 3,0 bei Spitzenbelastungen	bis 4,5 bei Spitzenbelastungen
Empfohlene organische Raumbelastung durch leicht abbaubare Stoffe [kg oTMabb/(m³·d)] (DWA-M 368, 2015)	Einstufige Faulung	1,0 - 1,4	1,1 - 1,5	1,2 - 1,7
	Zweistufige Faulung (1. Stufe)	2,9 - 3,9	3,2 - 4,2	3,6 - 4,5

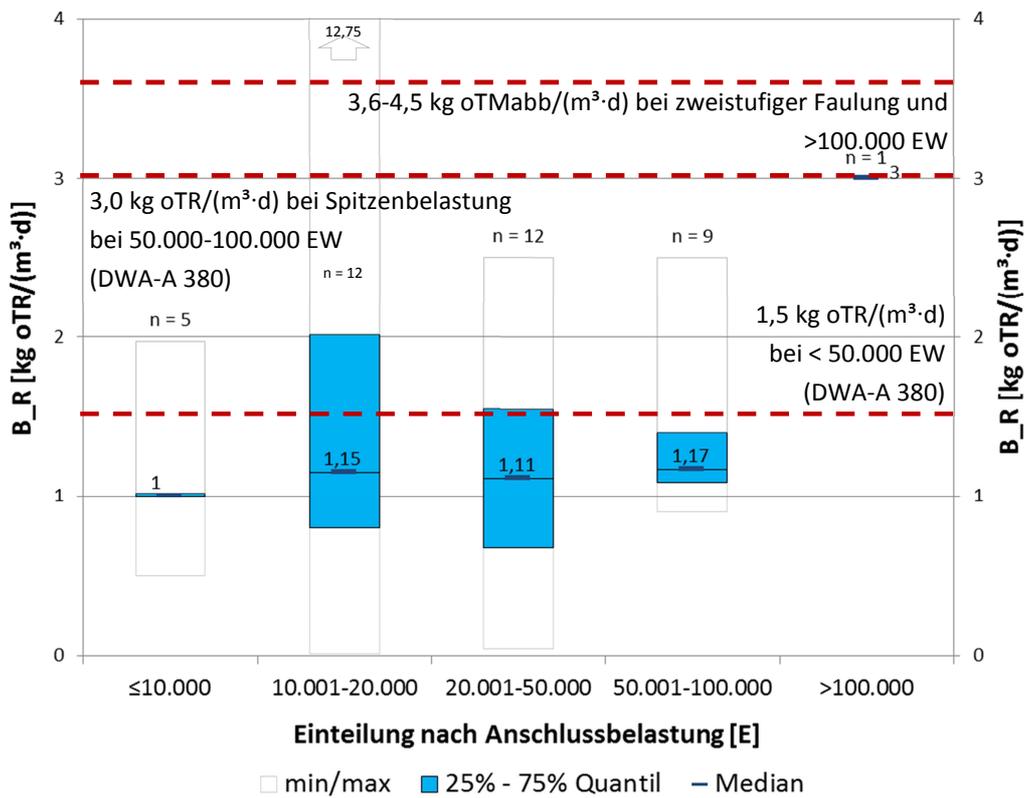


Abbildung 17: Mittlere Raumbelastung in Abhängigkeit zur Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014) im Vergleich zu Angaben in der Literatur

6.5 Organikanteil und Abbaugrad

Zur Ermittlung des organischen Anteils der verschiedenen Schlammfraktionen wurde der Glühverlust (GV) abgefragt. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der übergebenen Daten zusammenfassend dargestellt.

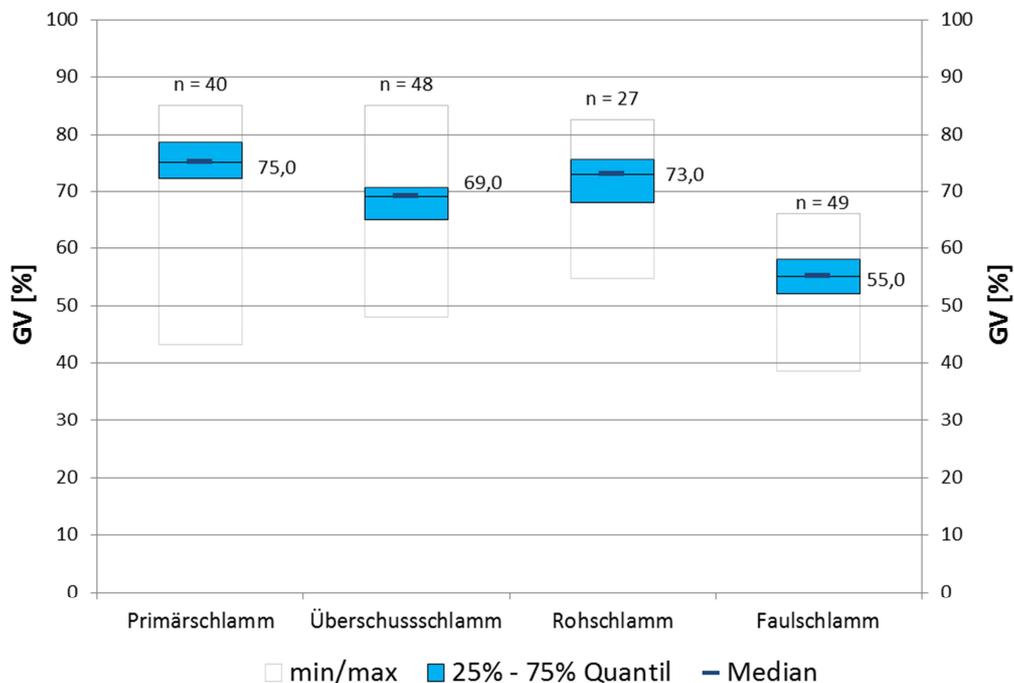


Abbildung 18: Glühverluste der Schlammfraktionen (Bezugsjahr 2014)

Der Glühverlust der Primärschlämme liegt bei 75 % und bei den Überschussschlämmen bei 69 %. In den Rohschlämmen ergibt sich ein Glühverlust von 73 %. Der Glühverlust kann vereinfacht dem Anteil an organischen Feststoffsubstanzen einer Schlammprobe gleichgesetzt werden. Die Schlämme weisen demnach ähnliche Gehalte an organischen Feststoffsubstanzen auf, die allerdings unterschiedlich zusammengesetzt sind. Während die organischen Substanzen im Primärschlamm überwiegend aus leicht abbaubaren Kohlenhydraten und Fetten bestehen, die direkt für die Gasproduktion zur Verfügung stehen, ist der Überschussschlamm ein Produkt des Biomassenwachstums und erfordert einen vorherigen Aufschluss der Zellstrukturen. Die Faulschlämme weisen einen Glühverlust von 55 % auf.

Über die organische Trockenmasse (oTM) im Zulauf und im Ablauf der Faulung kann der Abbau der organischen Trockenmasse ermittelt werden. Dabei werden auch die angegebenen zusätzlichen Frachten durch Co-Substrate oder Fremdschlämme berücksichtigt. Eine Auswertung der Abbaugrade bezogen auf die organische Trockenmasse ergibt die in Abbildung 19 dargestellte Verteilung auf die einzelnen Kläranlagenklassen. Die geringen Abbaugrade bei den zwei kleinen Anlagen sind möglicherweise auf nicht plausible Mengenangaben zurückzuführen, die sich auch in dem erhöhten Faulschlammfrachten in Abbildung 12 widerspiegeln.

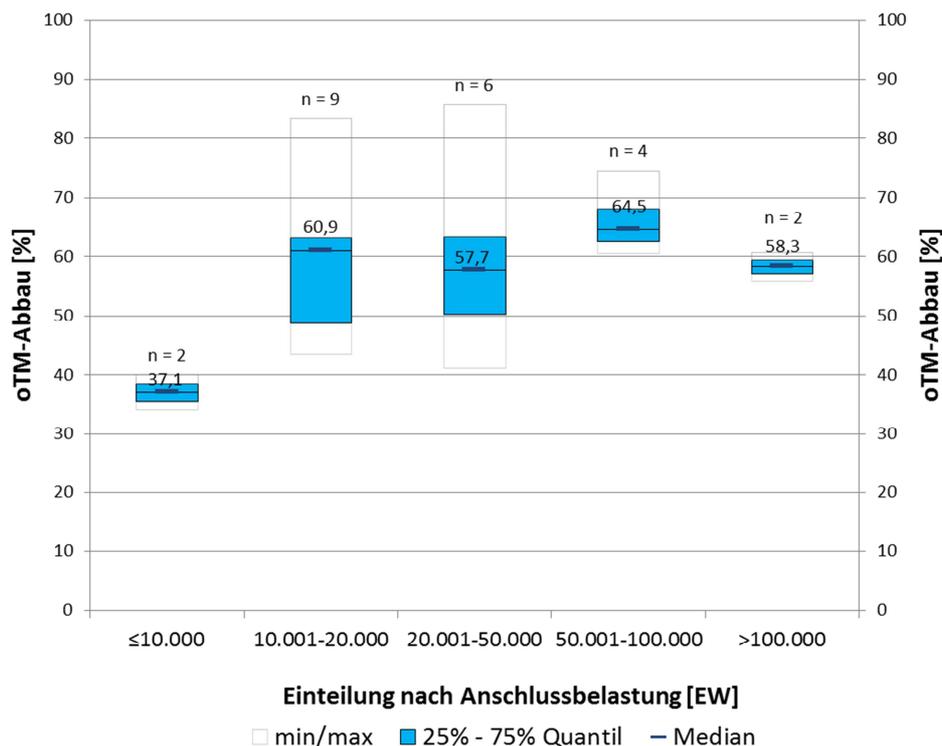


Abbildung 19: Abbau der organischen Trockenmasse in Prozent durch die Faulung in Abhängigkeit der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

Mit einem mittleren Abbaugrad der organischen Substanz von ca. 60 % und einem oTR-Gehalt im Faulschlamm von ca. 55 % kann der Faulschlamm als (weitestgehend) stabilisiert charakterisiert werden.

Nach DWA Merkblatt 368 (DWA 2014) liegen der Abbaugrade bezogen auf die organische Trockenmasse für Rohschlamm bei 48 %. Die im Vergleich dazu hohen Abbaugrade der organischen Substanz können u. a. durch den hohen spezifischen Primärschlammfall (Abbau PS: 60 % der oTM_{zu}) und die langen Aufenthaltszeiten in der Faulstufen bedingt sein.

6.6 Klärgasanfall

Um den einwohnerspezifischen Klärgasanfall zu ermitteln, wurde die im Jahr 2014 anfallende Klärgasmenge auf die über die Anschlussbelastung berechneten Einwohnerwerte bezogen. Als Mittelwert über alle in die Auswertung eingeflossenen Anlagen ergibt sich ein einwohnerspezifischer Klärgasanfall von 29 l/(E·d). Bei einigen Anlagen führen externe Schlämme und Co-Substrate zu einem erhöhten Klärgasanfall. In Abbildung 19 wurde daher für die Co-Substrate und Fremdschlämme ein Zuschlag auf die Einwohnerwerte (80 g TM/d = 1 EW) berücksichtigt, um dem Effekt der zusätzlichen Gaserzeugung abzumindern. Im Mittel erhält man somit einen Klärgasanfall von 27,3 l/(E·d). Dieser liegt deutlich höher als der nach DWA Merkblatt 363 (DWA 2010) im Mittel zu erwartende spezifische Gasanfall von 20,7 l/(E·d) bzw. 18,3 l/(E·d), der für Anlagen mit großer Vorklärung und einem Schlammalter in der Belebung von 8 d bzw. 15 d angegeben wird.

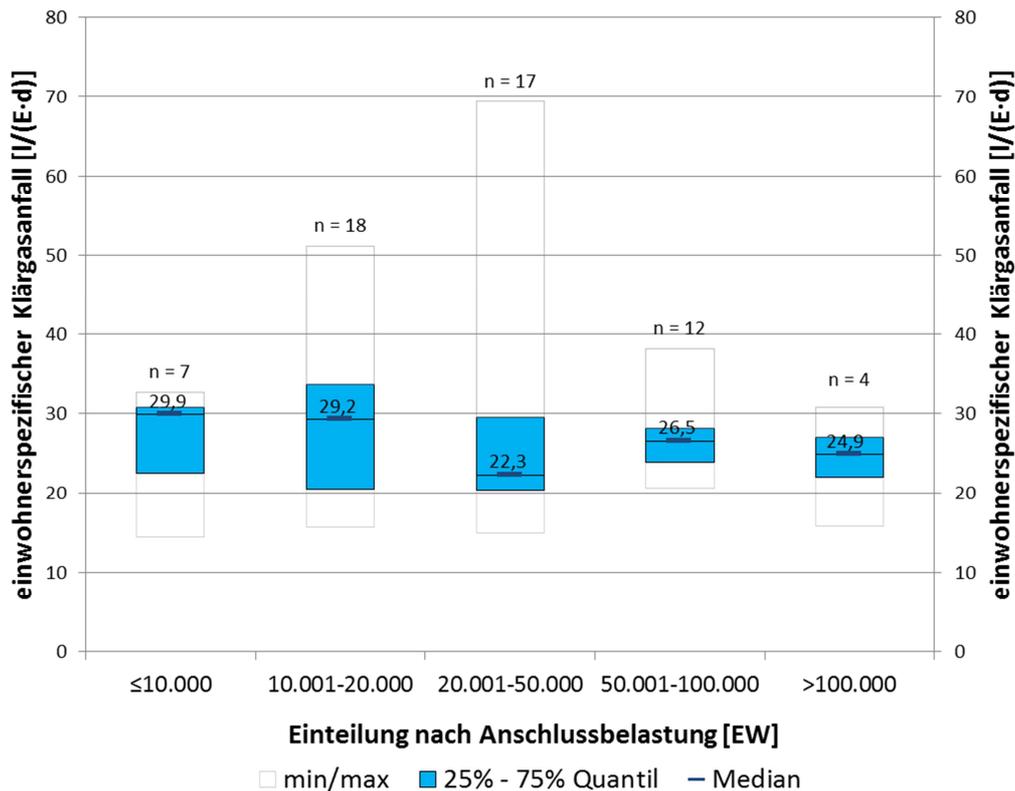


Abbildung 20: Einwohnerspezifischer Klärgasanfall in Abhängigkeit der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

6.7 Gasertrag

Der Klärgasertrag ist definiert als erzeugte Gasmenge je Kilogramm organische Trockenmasse im Zulauf der Faulstufe (oTM_{zu}). Für die Auswertung wurden lediglich die Anlagen berücksichtigt, die keine Co-Substrate beim Faulprozess verwenden, um eine Vergleichbarkeit nach DWA-M 368 (2015) herstellen zu können. Der Gasertrag von Rohschlamm wird im DWA-Merkblatt M 368 (DWA 2015) mit ca. 440 I/kg oTM_{zu} angegeben. Vor allem bei kleinen Anlagen (< 10.000 E) ist mit einem resultierenden Wert von ca. 800 I/kg oTM_{zu} eine enorme Abweichung zu dem o. g. Literaturwert zu erkennen. Die Werte werden als nicht plausibel eingestuft. Für die Anlagen > 10.000 E resultiert ein spezifischer Gasertrag zwischen 414 I/kg oTM_{zu} und 520 I/kg oTM_{zu} , der damit in der Größenordnung des in DWA (2015) angegebenen Wertes liegt.

Im Vergleich zum Gasertrag bezogen auf die zugeführte organische Fracht ist in Abbildung 22 der Gasertrag bezogen auf die abgebaute organische Fracht dargestellt. Hierbei wurden auch Anlagen, die Co-Substrate verwenden, berücksichtigt. Nach Roediger et al. (1990) liegt der abbauspezifische Gasertrag zwischen ca. 700 I/kg oTM_{abb} für Überschussschlamm und ca. 900 I/kg oTM_{abb} für Primärschlamm.

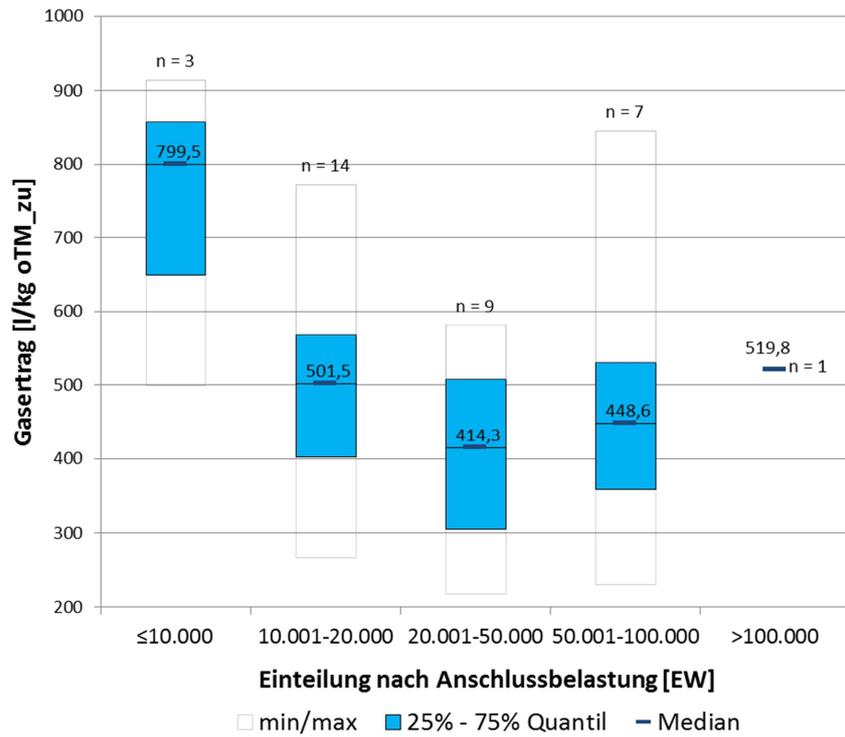


Abbildung 21: Gasertrag bezogen auf die zugeführten organischen Frachten (Bezugsjahr 2014), ohne die Anlagen mit Fremdschlämmen und Co-Substraten

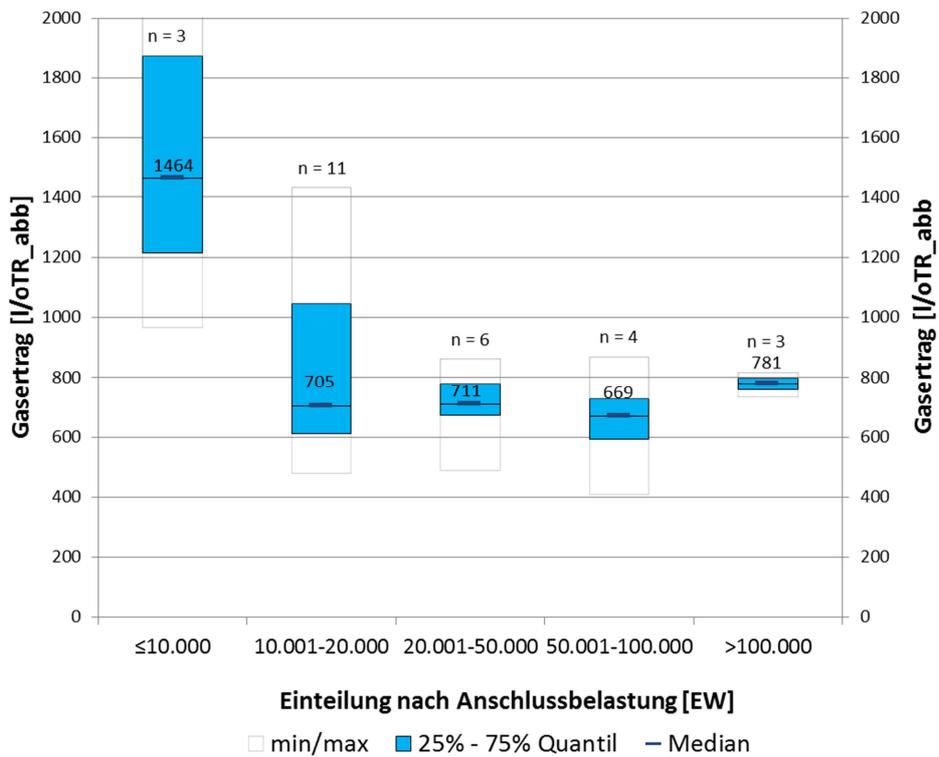


Abbildung 22: Gasertrag bezogen auf die abgebaute organische Fracht (Bezugsjahr 2014)

6.8 Methangehalt

In Abbildung 23 sind die angegebenen Methangehalte des Klärgases als Unterschreitungshäufigkeit aufgetragen.

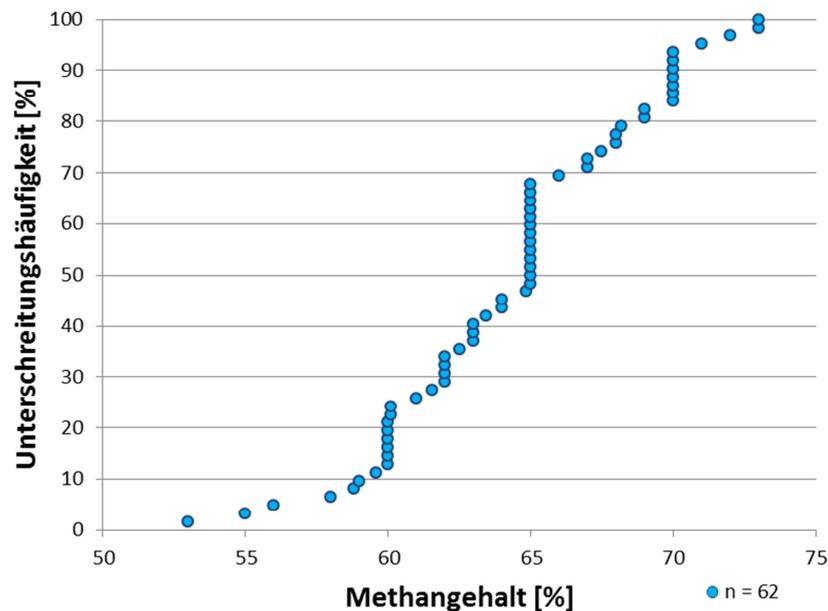


Abbildung 23: Methangehalt und Unterschreitungshäufigkeit (Bezugsjahr 2014)

Die angegebenen Methangehalte schwanken zwischen minimal 53 % und maximal 73 %. Im Median beträgt der Methangehalt des Klärgases 65 %. Die Werte liegen in einem für Klärgas üblichen Bereich. Es fällt allerdings eine Vielzahl von identischen Werten bei 60 %, 65 % und 70% Methangehalt auf, die darauf hindeuten, dass der Gasgehalt nicht gemessen wird.

7 Energetische Kennwerte

7.1 Eigenstromerzeugung

Die 64 in die Auswertung eingeflossenen Anlagen weisen in Summe eine jährliche Gasproduktion von $25,4 \cdot 10^6$ m³/a aus. Mit rund $20,5 \cdot 10^6$ m³/a werden ca. 81 % des erzeugten Klärgases zur Eigenstromerzeugung verwendet. Dieser Wert ist mit dem bundesweiten Durchschnitt aus dem Jahr 2013 von ca. 80 % (Statistisches Bundesamt 2015) vergleichbar. In Abbildung 24, links ist die resultierende Faulgasverwertung anhand eines Kuchendiagramms dargestellt. Es wird ersichtlich, dass nur ein sehr geringer Anteil für eine reine Wärmeerzeugung ($3,6 \cdot 10^6$ m³/a) oder für Direktantriebe ($0,1 \cdot 10^6$ m³/a) verwendet wird. Mit $1,3 \cdot 10^6$ m³/a werden nach wie vor rund 5 % des angefallenen Klärgases über eine Fackel verbrannt. Abbildung 24, rechts zeigt außerdem, dass auf sechs der in die Auswertung eingeflossenen Kläranlagen keine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK-Anlage) vorhanden ist.

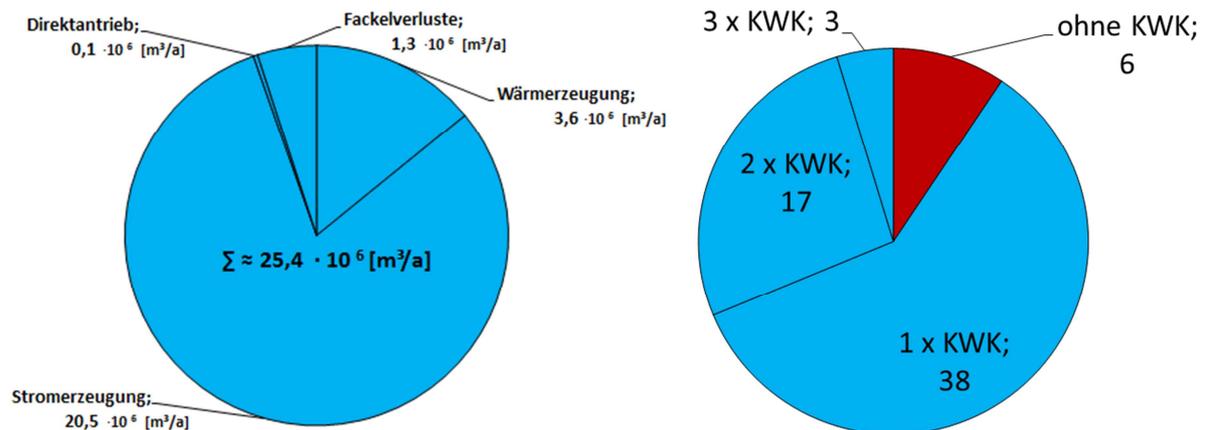


Abbildung 24: Faulgasverwertung (links) und Anzahl zu den KWK-Anlagen je KA (rechts)

Die Eigenstromerzeugung wird als Summe der Stromerzeugungen aller mit Klärgas betriebenen KWK-Anlagen betrachtet. Nicht berücksichtigt wird die Stromerzeugung von Notstromaggregaten oder Photovoltaik(PV)-Anlagen. Sonstige Energieerzeuger wie Windkraft, Wasserturbinen oder Wärmepumpen sind bei den abgefragten Anlagen nicht vorhanden. Einige Anlagen verwenden für die Eigenstromerzeugung durch die KWK-Anlagen zum Teil auch Erdgas. Um lediglich die abwasserbürtige Energie betrachten zu können, wird dieser Anteil der Stromerzeugung herausgerechnet. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass auch in diesem Fall der zusätzliche Energiegewinn durch Co-Substrate und Fremdschlämme bei den betroffenen Anlagen zur Erhöhung der einwohnerspezifischen Stromerzeugung ($e_{el,p}$) führt. Darauf kann unter anderem auch die vergleichsweise hohe Eigenstromerzeugung bei den kleineren Anlagen (≤ 10.000 E) zurückgeführt werden (Abbildung 25).

Nach Schmitt et al. (2014) kann die verwertbare einwohnerspezifische Jahresenergiemenge mit rund $48 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ abgeschätzt werden und nach Schäfer et al. (2015) können für neue KWK-Anlagen elektrische Wirkungsgrade von 32 % bis 40 % angesetzt werden. Demnach liegt die möglich einwohnerspezifische Eigenstromerzeugung bei $15,4 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ bis $19,2 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$.

Unter Berücksichtigung der vom Statistisches Bundesamt (2015) angegebenen Eigenstromerzeugung und den Angaben zum Eigenverbrauch von Klärgas aus dem Jahr 2013 kann im Bundesschnitt derzeit von einem elektrischen Wirkungsgrad von 28,3% ausgegangen werden. Legt man die verwertbare spezifische Jahresenergiemenge des Klärgases von rund $48 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ zugrunde, erhält man eine mittlere Eigenstromerzeugung von $13,6 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$.

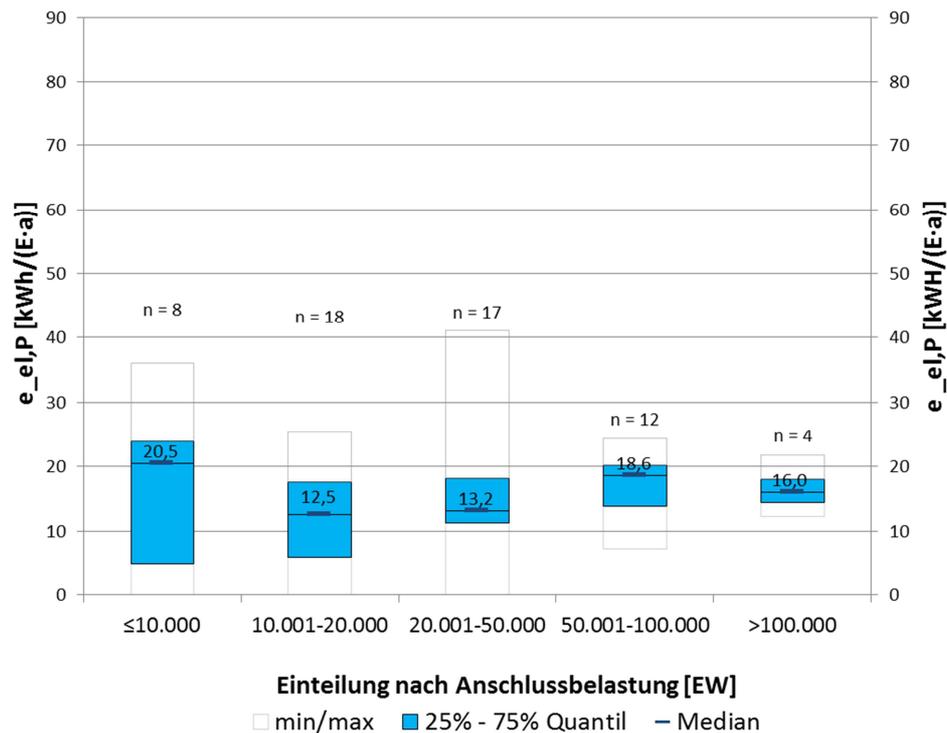


Abbildung 25: Eigenstromerzeugung aus Klärgas in Abhängigkeit zur Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

7.2 Fremdstrombezug

Der übergebene Jahresstromfremdbezug ($e_{el,F}$) bezogen auf die Anschlussbelastung der in die Auswertung eingeflossenen Kläranlagen ist in Abbildung 26 dargestellt.

Die Medianwerte zeigen einen deutlich geringeren spezifischen Fremdstrombezug bei größeren Anlagen. Mit ca. 10 kWh/(E·a) resultieren für Anlagen der Klasse > 100.000 E ein rund 3-fach geringerer Wert als für Anlagen der Klasse ≤ 10.000 E, bei denen sich ein Medianwert von rund 30 kWh/(E·a) ergibt. Dabei sinkt der Fremdstrombezug parallel mit der Ausbaugröße der Kläranlagen.

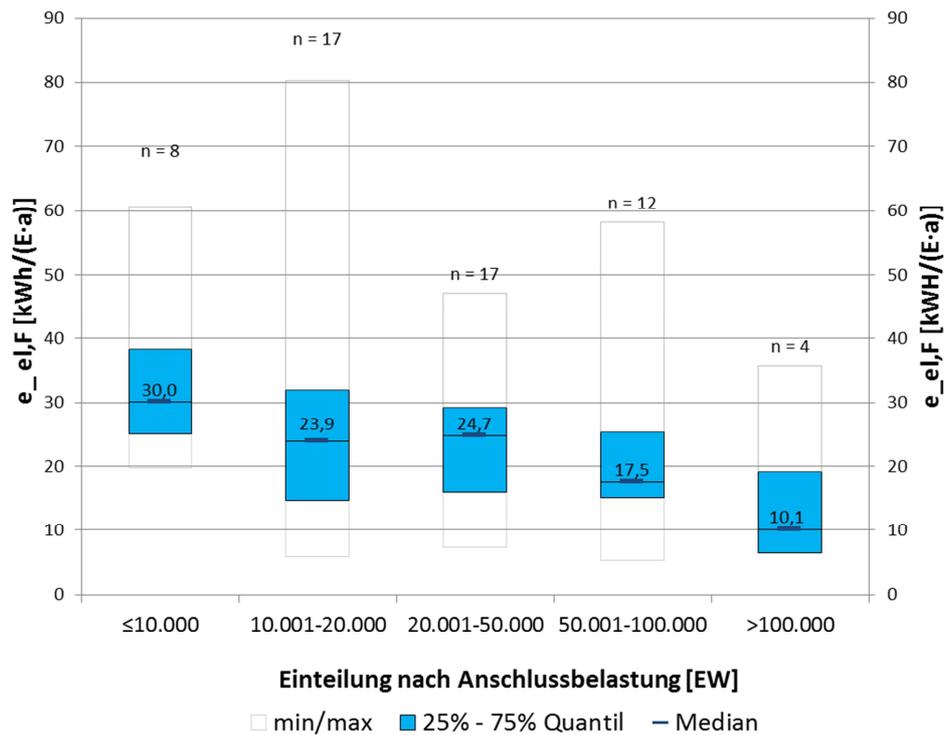


Abbildung 26: Einwohnerspezifischer Fremdstrombezug $e_{el,F}$ bezogen auf die Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

7.3 Gesamtstromverbrauch

Um den Jahresgesamtstromverbrauch zu ermitteln, werden der Fremdstrombezug, die jährliche Stromerzeugung durch KWK-Anlagen und der Anteil der Eigennutzung bei der Stromerzeugung von PV-Anlagen berücksichtigt. Abhängig von der Anschlussbelastung ergeben sich mit einem Median von 50,5 kWh/(E·a) für die kleineren Anlagen ein deutlich höherer einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch (e_{ges}), als für die größere Anlagen. Bei den Anlagen > 100.000 EW liegt der Median von e_{ges} bei 29,5 kWh/(E·a).

Dieser ist vergleichbar mit der von Hansen et al. (2007) dargestellten energetischen Situation der kommunalen Abwasserbeseitigungsunternehmen in Rheinland-Pfalz im Jahr 2006. Der spezifische Stromverbrauch für die Abwasserbehandlung wurde für Unternehmen der Abwasserbeseitigung mit <15.000 EW im Median mit 41,9 kWh/(E·a) und für Unternehmen mit >30.000 EW im Median mit 29 kWh/(E·a) angegeben. Für Rheinland-Pfalz wurde anhand von Medianwerten und Beispielanlagen der spezifische Energieverbrauch für die kommunalen Kläranlagen mit 42 kWh/(E·a) für die GK 3, 40 kWh/(E·a) für die GK 4 und 35 kWh/(E·a) für die GK 5 angesetzt. Dabei wurde nicht zwischen Faulungsanlagen und Anlagen mit gemeinsamer aerober Stabilisierung differenziert.

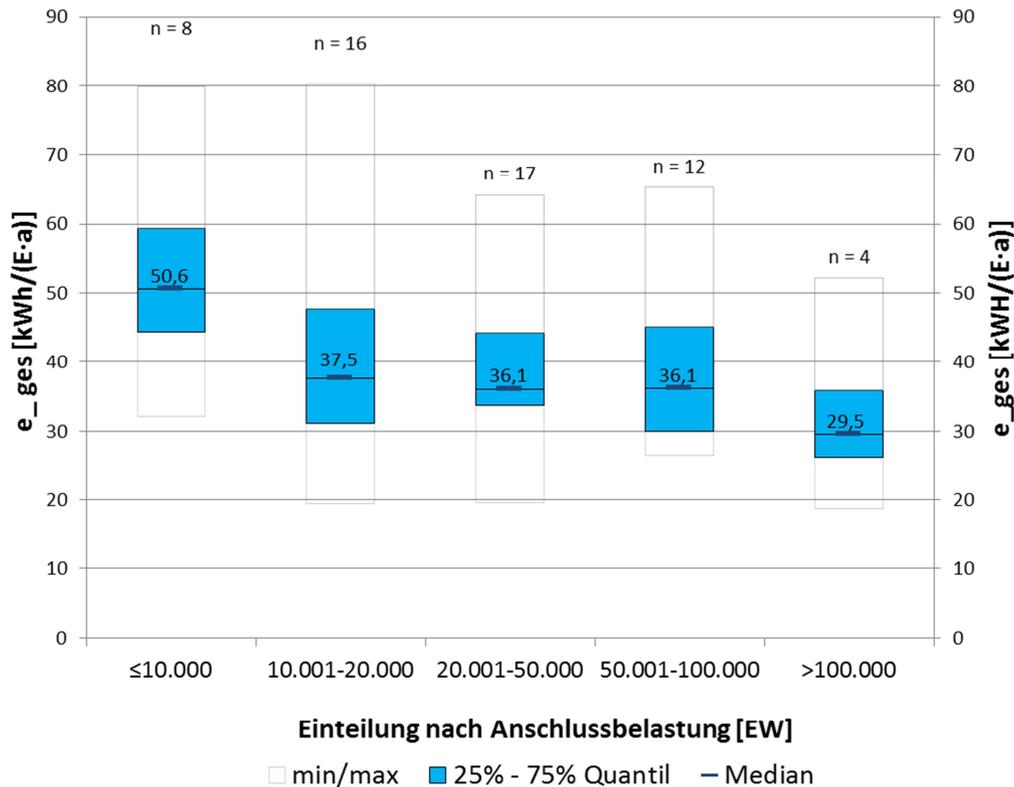


Abbildung 27: Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch in Abhängigkeit der Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

In Abbildung 28 sind die spezifischen Verbrauchswerte der ausgewerteten Kläranlagen ($n = 56$) im Vergleich zum DWA-Arbeitsblatt A 216 (2015) dargestellt. Der spezifische Gesamtstromverbrauch bezogen auf die Anschlussgröße beträgt laut DWA (2015) bei den Belebungsanlagen im Median $37,4 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$. Gegenüber den Kennzahlen des DWA-Arbeitsblattes A 216 (2015) ergibt sich ein vergleichbarer Gesamtstromverbrauch mit einem nahezu identischen Medianwert. Es zeigt sich, dass der Stromverbrauch in etwa 40 % der Fälle gegenüber dem Median in DWA (2015) unterschritten und folglich in etwa 60 % der Fälle überschritten wird.

Toleranzwerte bzw. Medianwerte für den spezifischen Stromverbrauch liegen nach Baumann et al. (2014) für Belebungsanlagen mit getrennter Schlammstabilisierung in Abhängigkeit der Ausbaugröße zwischen $37 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ für KA der GK 3 und $30 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ für KA der GK 5. Die Zielwerte für den spezifischen Stromverbrauch sind in Abhängigkeit der Ausbaugröße mit $23 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ für GK 3 und $20 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ für GK 4 und 5 deutlich geringer.

Laut Baumann et al. (2014) wird es jedoch nicht möglich sein, die Zielwerte auf allen bestehenden Kläranlagen mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand zu erreichen. Bei den betrachteten Anlagen lässt sich dennoch ein deutliches Einsparpotenzial beim Stromverbrauch erkennen, welches bei den Anlagen mit geringer Anschlussbelastung am größten ist.

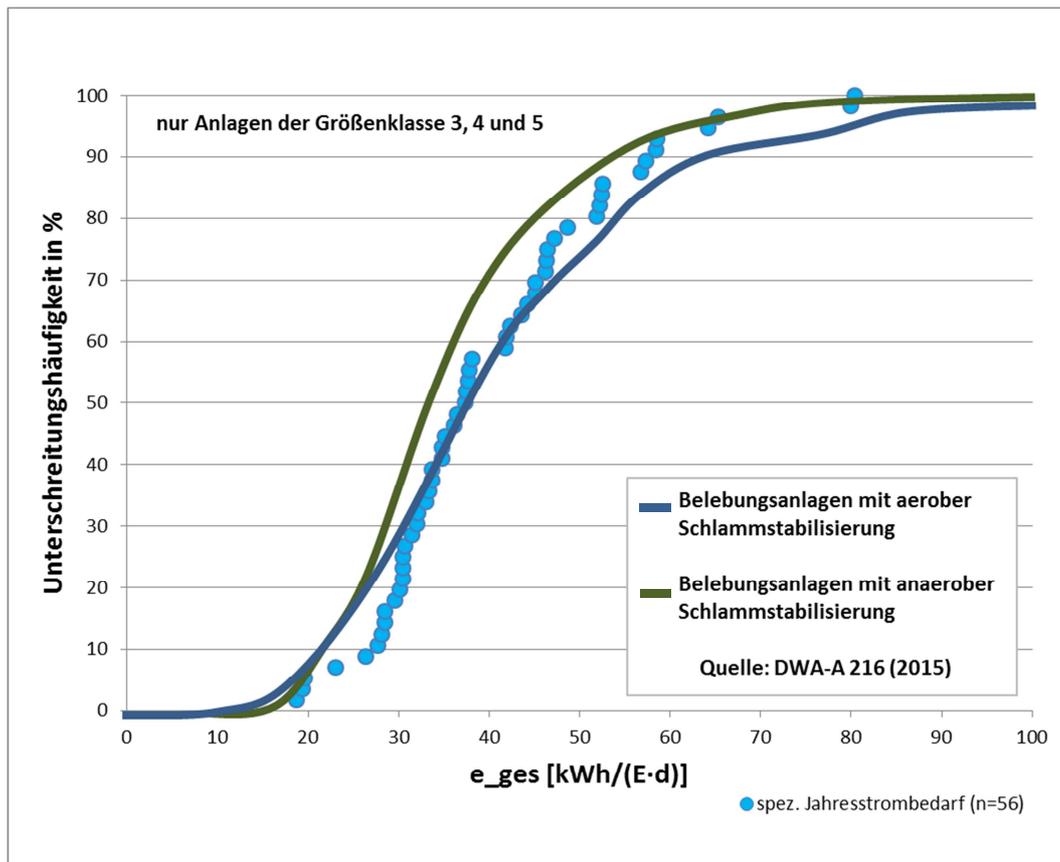


Abbildung 28: Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch e_{ges} im Vergleich zu den Kennwert des DWA-Arbeitsblatt A 216 (2015) (Bezugsjahr 2014)

7.4 Eigenversorgungsgrad

Mit den Angaben zur Eigenstromerzeugung der KWK-Anlagen und den Angaben bezüglich des Jahresstromverbrauchs lassen sich die Eigenversorgungsgrade (EV_{el}) rein aus der Klär-gasverstromung ermitteln.

Es ist erkennbar, dass der Eigenversorgungsgrad bei höherer Anschlussbelastung und daher auch mit der Größe der Anlagen zunimmt, was unter anderem auf den festgestellten Zusammenhang beim Fremdstrombezug (s. o.) zurückgeführt werden kann. Im Median beträgt der Eigenversorgungsgrad der kleinen Kläranlagen 30 %. Die großen Anlagen weisen dagegen mit 60 % einen doppelt so hohen Eigenstromversorgungsgrad auf.

Nach Kolisch et al. (2010) sollten Kläranlagen einen Eigendeckungsgrad für Elektrizität zwischen 37% bei einer Anschlussbelastung von 5.000 bis 10.000 EW und 68 % bei einer Anschlussbelastung > 100.000 EW erreichen. In DWA (2015) wird als Median eine Eigenversorgungsgrad von 44 % angegeben und der Idealwert mit 80 % angesetzt.

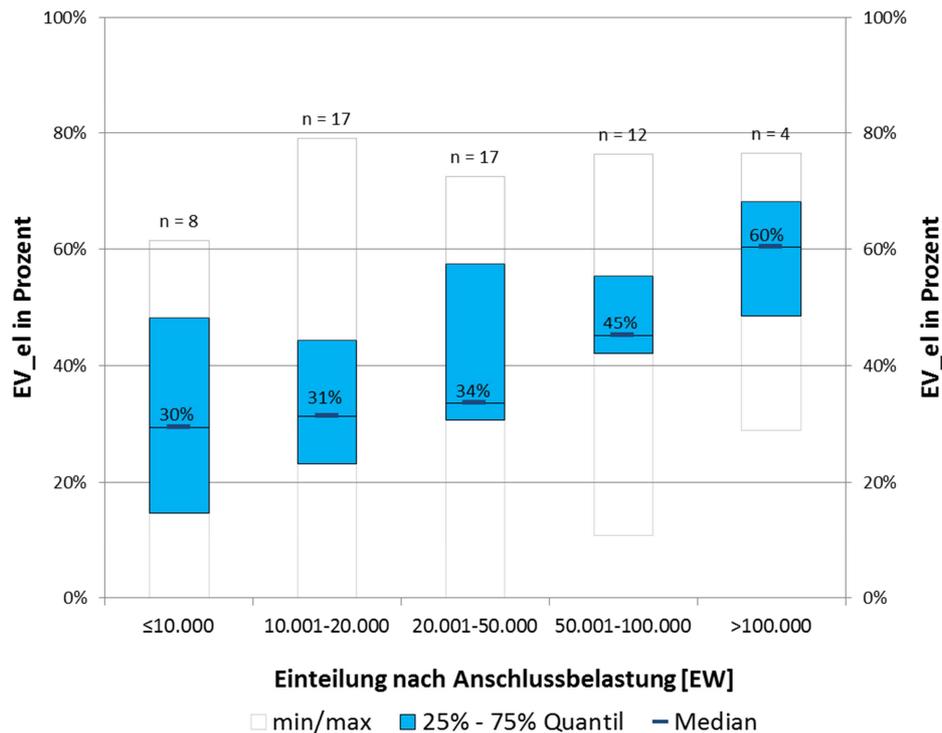


Abbildung 29: Eigenversorgungsgrad EV bezogen auf die Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014)

8 Angaben zur Faulstufe

Die wesentlichen abgefragten Merkmale der Faulbehälter sind in Abbildung 29 und 30 dargestellt. Demnach sind von den Kläranlagen, die einen verwertbaren Fragebogen zurück gesendet haben, jeweils drei mit drei Faulbehältern, 23 mit zwei Faulbehältern und 37 mit einem Faulbehälter ausgestattet. Demnach wurden insgesamt 92 Faulbehälter auf 63 Anlagen erfasst. Eine Kläranlage hat keine Angabe zur Anzahl der Faulbehälter gemacht. Bei fünf Kläranlagen waren im Jahr 2014 nicht alle Faulbehälter im Betrieb. Zehn von 19 Anlagen mit zwei Faulbehältern betreiben diese 2-stufig, wohingegen die anderen neun Anlagen ihre Behälter parallel beschicken. Die meisten Faulbehälter haben eine zylindrische oder eiförmige Bauform und vier Anlagen haben eine kompakte Bauform. Es ist außerdem erkennbar, dass der überwiegende Teil der Faulbehälter vor dem Jahr 1990 erbaut wurde.

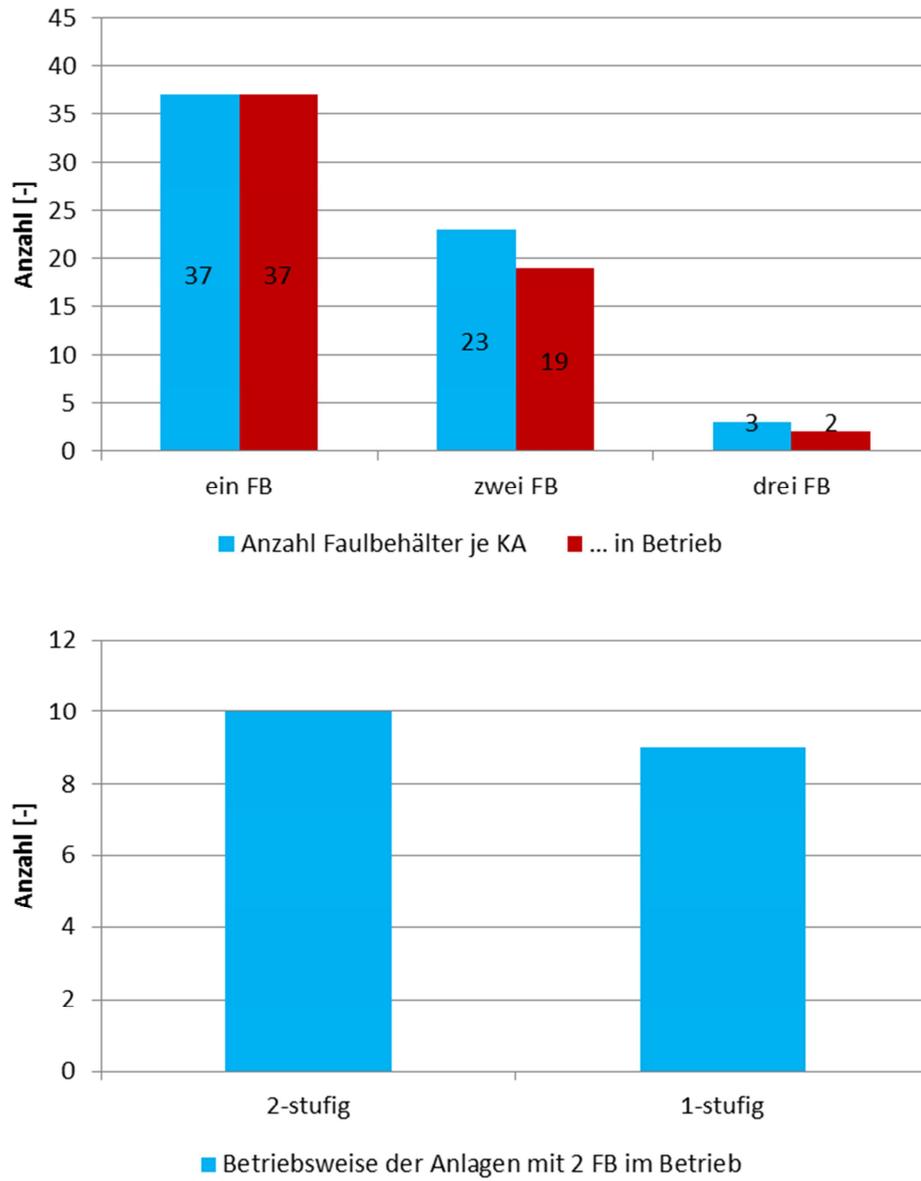


Abbildung 30: Übersicht über Angaben zu den Faulbehältern: Anzahl der FB (oben), Betriebsweise (unten)

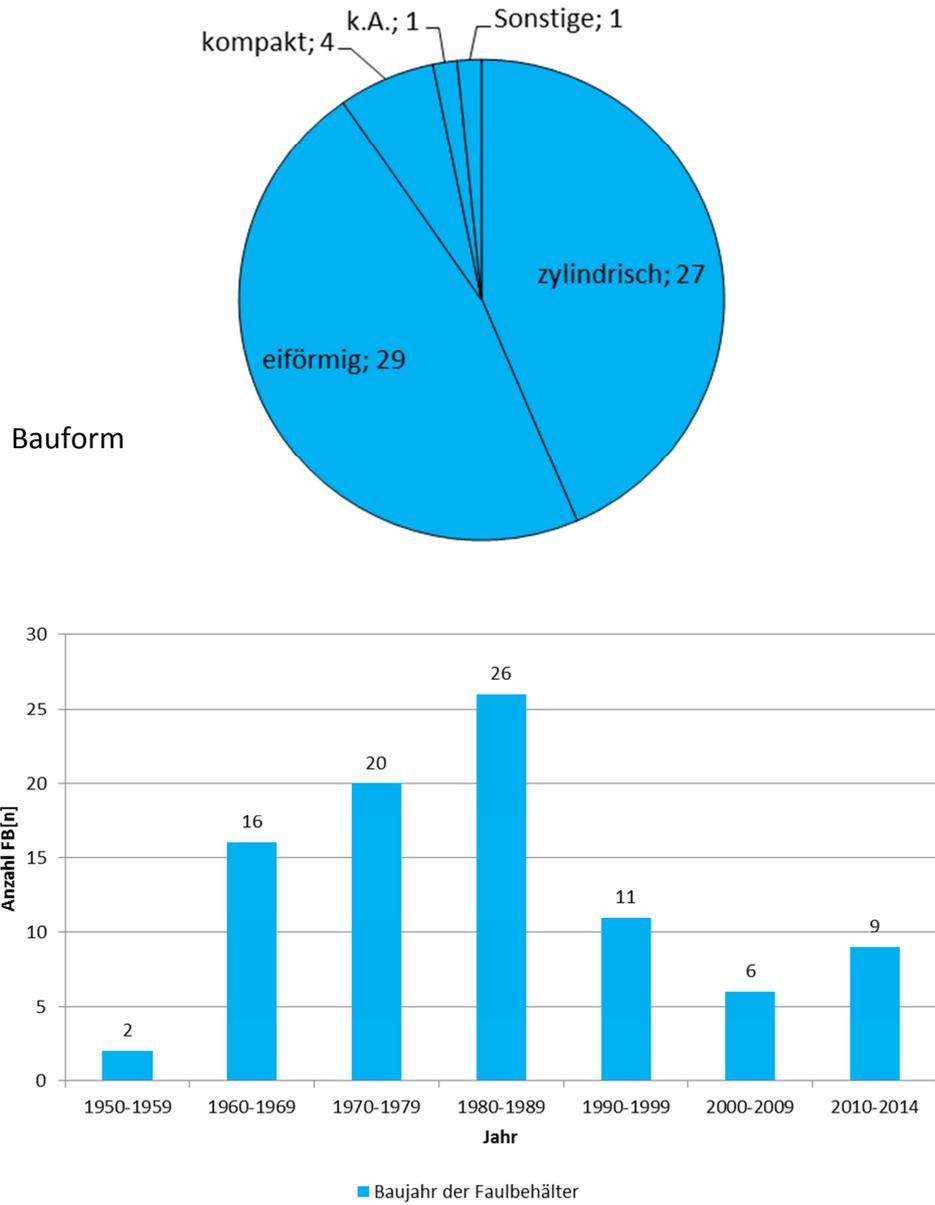


Abbildung 31: Übersicht über Angaben zu den Faulbehältern: Bauformen (oben), Baujahr (unten)

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Betreiberumfrage erlaubt eine umfassende Beschreibung der Ist-Situation der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen. Eine zusammenfassende Darstellung der ermittelten Medianwerte sind den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen.

Tabelle 4: Übersicht über die Mediane der unterschiedlichen Schlammfraktionen

	Einheit	PS	ÜS	RS	Input	FS
Spez. Schlammfrachten	[g TM/(E·d)]	46,4	36,5	76,8	79,2	48,5

Tabelle 5: Mediane der Kennwerte bezogen auf die jeweilige Anschlussbelastung

Kennwert	Einheit	< 10.000 E	10.001- 20.000 EW	20.001- 50.000 EW	50.001- 100.000 EW	> 100.000 EW
spez. RS-Frachten	[g TM/(E·d)]	83	75,5	78,1	84,6	64
spez. FS-Frachten	[g TM/(E·d)]	57,1	49,8	52	45,6	44,5
Faulzeit ($t_{FB,ges}$)	[d]	30	30	27	36	29,5
spez. Faulraum- volumen	[l/E]	135,3	70,1	58,3	54,6	47,9
spez. (inkl. EW_{extern}) Faulraumvolumen	[l/E]	117,4	70,1	52,2	54,1	47,4
org. Raumbelastung ($B_{R,OTR}$)	[kg oTR/(m ³ ·d)]	1	1,15	1,11	1,17	3
oTM-Abbau	[%]	37,1	60,9	57,7	64,5	58,3
spez. Klärgasanfall	[l/(E·d)]	29,9	29,2	22,3	26,5	24,9
Gasertrag (bez. oTM _{zu})	[l/kg oTM _{zu}]	799,5	501,5	414,3	448,6	519,8
Gasertrag (bez. oTM _{abb})	[l/kg oTM _{abb}]	1464	705	711	669	781
spez. Eigenstrom- erzeugung aus Klärgas	[kWh/(E·a)]	20,5	12,5	13,2	18,6	16
spez. Fremdstrombe- zug $e_{el,F}$	[kWh/(E·a)]	30	23,9	24,7	17,5	10,1
spez. Gesamtstrom- verbrauch e_{ges}	[kWh/(E·a)]	50,6	37,5	36,1	36,1	29,5
Eigenversorgungsgrad EV_{el} [%]	[%]	30	31	34	45	60

Die Auswertung der Fragebögen zeigt ein differenziertes Bild der Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz. Als Bezugsgröße zur Berechnung einwohnerspezifischer Kenngrößen wurde die Anschlussbelastung (Bezugsjahr 2014) herangezogen. Dabei wird die Rückbelastung durch interne Prozesswässer berücksichtigt. Bei den Auswertungen des einwohnerspezifischen Schlammanfalls sind die Kenngrößen in Box-Plot-Diagrammen dargestellt. Dabei sind die Minima und Maxima angegeben, um auf die teilweise sehr große Streuung der Werte hinzuweisen. Einige dieser Werte scheinen nicht plausibel. Daher werden vermehrt die Medianwerte betrachtet und der 25% - bzw. 75% Quantil als Vertrauensbereich angegeben. Abgesehen von einer erhöhten Primärschlammfracht liegen die übrigen Schlammfrachten im Bereich der bekannten Literaturwerte. Die angegebenen hohen Schlammalter in der Belebung lassen Optimierungspotenziale beim Betrieb der Belebungsbecken erkennen. Ebenso weisen die großen einwohnerspezifischen Faulbehältervolumen sowie die hohen Faulzeiten in Verbindung mit geringen organischen Raumbelastungen auf Reserven beim Faulraumvolumen hin.

Die meisten Faulbehälter werden im mesophilen Temperaturbereich betrieben, wobei bei manchen Anlagen ausgeprägte Temperaturschwankungen erkennbar sind. Bei allen die Faulung betreffende Kennwerten ist im Einzelfall die Zugabe von Fremdschlämmen und Co-Substraten zu beachten. Dies gilt auch für die Kennwerte Abbaugrad, Gasanfall und dem Gasertrag. Der ermittelte einwohnerspezifische Gasertrag liegt deutlich über den Literaturwerten. Es ist festzustellen, dass sich die Ursachen der Abweichungen zu den Literaturwerten nur durch eine anlagenspezifische Detailprüfungen erkennen lassen, weshalb eine Detailbetrachtung einzelner Anlagen zwingend erforderlich ist.

Betrachtet man die energetischen Kennwerte, kann festgestellt werden, dass größere Faulungsanlagen einen deutlich höheren Eigenstromversorgungsgrad erreichen, obwohl die spezifische Eigenstromerzeugung bei kleineren Anlagen im Mittel nicht geringer ausfällt.

Anhand der ausgewerteten Daten werden im nächsten Arbeitsschritt unterschiedliche Optimierungsstrategien ausgearbeitet, die zum einen die Abhängigkeiten zwischen der Abwasserreinigung, der Schlammbehandlung und -verwertung und zum andern die einzelnen Anlagenkomponenten berücksichtigen. Parallel zu dieser grundsätzlichen Betrachtungsweise wird anhand von Beispielanlagen die Umsetzbarkeit dieser Strategien betrachtet und detaillierte Konzepte zur Optimierung von Faulungsanlagen erarbeitet. Darauf Aufbauend werden die Umsetzungsmöglichkeiten für die bestehenden Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz bewertet und die Potenziale der Optimierung ermittelt.

10 Literaturverzeichnis

- AbwV 2004: Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer. "Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist".
- ATV-DVWK (2000): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V.
- ATV-DVWK (2003): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198. Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. Hennef.
- ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.3 (2000): Rückbelastung aus der Schlammbehandlung - Menge und Beschaffenheit der Rückläufe. In: *KA- Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* 47 (8), S. 1181–1187.
- Baumann, P.; Maurar, P.; Roth, M. (2014): Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen. Systematisches Vorgehen zur Steigerung der Energieeffizienz durch Nutzung des Einsparpotenzials. 3. Auflage. Heft 4. Suttgart.
- Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C. F.; Böhnke, B. (2005): *Anaerobtechnik*. Berlin: Springer.
- Cornel, P. (1997): Reduzierung der Stickstoffrückbelastung durch Schlammwasserbehandlung. In: Verein zur Förderung des Instituts WAR (Hg.): Senkung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen. 52. Darmstädter Seminar. Bd. 102. Darmstadt, S. 149–174.
- DWA (2009): Merkblatt DWA-M 380. Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen.
- DWA (2010): Merkblatt DWA-M 363. Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2014): Merkblatt DWA-M 368. Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2015): Arbeitsblatt DWA-A 216. Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Gretzschel, O.; Schmitt, T. G.; Hansen, Joachim; Siekmann, Klaus; Jakob, Jürgen (2012): Schlammfäulung statt aerober Stabilisierung? Studie zur Wirtschaftlichkeit: Macht sich die Umstellung von aeroben Stabilisierungsanlagen auf Faulungsbetrieb bezahlt? In: *wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik* (3), S. 27–33.

- Hansen, J.; Wu, K.; Kolisch, G.; Hobus, I.; Schirmer, G. (2007): Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen. Broschüre. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz.
- Kolisch, G.; Osthoff, T.; Hobus, I.; Hansen, J. (2010): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 57 (10).
- Möller, U. (1994): Schlamm-Mengen und -Beschaffenheit. In: H. H. Hahn und R. Trauth (Hg.): Klärschlamm - Ressource oder kostenintensiver Abfall? Karlsruhe (Schriftenreihe des ISWW, Bd. 71), S. 47–83.
- Neis, U.; Plaß, R.; Bode, I. (1994): Steuerung der Sekundärströme aus der Schlammbehandlung. In: H. H. Hahn und R. Trauth (Hg.): Klärschlamm - Ressource oder kostenintensiver Abfall? Karlsruhe (Schriftenreihe des ISWW, Bd. 71), S. 91–102.
- Roediger, H.; Roediger, M.; Kapp, H. (1990): Anaerobe alkalische Schlammfäulung. 4. Aufl. München, Wien: Oldenbourg.
- Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Knerr, H.; Schmitt, T. G. (2015): Wastewater treatment plants as system service provider for renewable energy storage and control energy in virtual power plants – a potential analysis Vol. 73, S. 87–93. Online verfügbar unter Elsevier-Verlag: DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.566.
- Schmitt, T. G.; Gretzschel, O.; Hansen, J.; Siekmann, K. (2010): Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz _ NAwaS. Modul 1: Grundlegende Untersuchungen. Schlussbericht. Hg. v. tectraa-Zentrum für innovative Abwassertechnologien an der TU Kaiserslautern.
- Schmitt, T. G.; Gretzschel, O.; Hansen, J.; Siekmann, K. (2014): Umstellung von Kläranlagen auf Schlammfäulung. Energetisches und ökonomisches Optimierungspotenzial. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz. tectraa-Zentrum für innovative Abwassertechnologien an der TU Kaiserslautern; Universität Luxemburg - Campus Kirchberg, Siedlungswasserwirtschaft und Wasserbau; Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner GmbH. Mainz.
- Statistisches Bundesamt (2015): Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas: Deutschland. Datensatz. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de>, zuletzt geprüft am 02.02.2015.

11 Anhang

Anhang 1: Fragebogen

Fragebogen: Faulung und Faulgasverwertung in Rheinland-Pfalz
 Projekte: "Zukunftorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS" & "Abwasserreinigungsanlagen als Regelbauteile in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung - arivee"





Sehr geehrte Damen und Herren,
 der vorliegende Fragebogen dient dazu, die Energieausbeute und die Effizienz der Klärgaserzeugung und -nutzung in Rheinland-Pfalz zu ermitteln und eine Grundlage für deren Optimierung zu schaffen. Anhand dieser Werte werden Technologien bewertet, die eine Verbesserung der Klärgasnutzung ermöglichen.

Bezugsjahr 2014

Wir bedanken uns für Ihre Mitarbeit!

1. Allgemeines

Kläranlage	Kläranlagennummer	Geben Sie hier die in der angelegten KVO, oder KA, Faulung, email / Fax Kläranlagennummer ein	
	Bezeichnung	Geben Sie hier die in der angelegten KVO, oder KA, Faulung, email / Fax Bezeichnung ein	
	Plz, Ort		
	Betreiber		
Ansprechpartner	Name		
	Telefon		
	Email		
Anlagenkennwerte	Ausbaugröße - Normallast	Angabe der in Kläranlage betriebenen Art der Trockenanlage (z.B. Kompostieranlage, Papierherstellung etc.)	Kampagnejahr <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn es sich um eine Kampagneanlage handelt, bitte tragen Sie hier die Ausbaugröße in t/d für die Kampagnezeit ein.
	Angeschlossene Einwohner	Bitte tragen Sie hier die Zahl der anliegenden Einwohner ein, die an die Kläranlage angeschlossen sind.	
	Anschlussgröße Bezugsjahr	Angabe der Anschlussgröße auf Basis des in Bezugsjahr vorliegenden 10% Wertes der täglich, während der Trockenanlage in Zufuhr der Kläranlage ohne Rückleitung.	
Repräsentativität Bezugsjahr	Ist das Bezugsjahr 2014 repräsentativ für den Betrieb Ihrer Anlage? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn das Jahr 2014 für den Betrieb Ihrer Anlage nicht repräsentativ ist, haben Sie bitte Rückmeldung zu den unten angegebenen Kriterien.		
Indirektelekt	maßgebliche Betriebe	Angabe der in Kläranlage betriebenen Art der Industrieanlage (z.B. Lebensmittelverarbeitung, Textilindustrie, Papierherstellung etc.)	
	Beeinfl. durch Weinbau	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein wenn ja, Bezeichnung während Kampagne:	
	Sonst. saisonal arbeitende Betr.	Angabe der in Kläranlage betriebenen Art der sonstigen saisonal arbeitenden Betriebe (z.B. Tourismus, Obstbaubetriebe etc.)	

2. Abwasserreinigung

Kanalnetz	Art der Entwässerung	<input type="checkbox"/> Mischsystem <input type="checkbox"/> inkl. modifizierter Mischsysteme <input type="checkbox"/> Trennsystem <input type="checkbox"/> inkl. modifizierter Trennsysteme
Abwasserabfluss	Wassermengen:	$Q_{1,2}$ <small>Gibt die Summe des Abflusses einer Trockenanlage und der aus der Trockenanlage des betrachteten Jahres in [m³/d]</small> $Q_{2,1}$ <small>Bitte geben Sie hier die Wassermenge an, die zur Kläranlage in [m³/d]</small>
Zulauf: Frachten	$B_{1,2,3,4,5,6,7}$	Ort d. Probenahme <small>Bitte geben Sie an, wo die Zulaufprobe entnommen wird (z.B. Ablauf, Sandfang, Zulauf Vorrichtung, Ablauf Vorrichtung)</small>
	$B_{1,2,3,4,5,6,7}$ <small>Angabe der auf Basis von 24h-Mischproben ermittelte oder als CSB-Z während des Kampagnejahres</small>	erfassende Probenahme <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <small>Prüfung der Probenahme der 24h-Mischprobe über das Jahr verteilt an unterschiedl. Wochentagen?</small>
	$B_{1,2,3,4,5,6,7}$ <small>Gibt die Summe aller auf Basis von 24h-Mischproben ermittelte jeweiligen Frachten in [t/d]</small>	Probenahmeplan belegen <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <small>Wenn Sie für die 24h-Mischprobe einen Probenahmeplan erstellt haben, dann Sie uns diesen bitte ebenfalls (möglichst digital) zur Verfügung</small>
	$B_{1,2,3,4,5,6,7}$ <small>Angabe der jeweiligen Messwerte in Bezugsjahr</small>	Messung inkl. Rückbel. <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <small>Alternativ zum $R_{1,2,3,4,5,6,7}$ Angabe des $R_{1,2,3,4,5,6,7}$ als Mittelwert über Tage des Bezugsjahrs (ggf. Tagwert)</small>
Sandfang	Volumen	[m³]
Vorklärung (VK)	Volumen	[m³]
	Oberfläche VK:	[m²]
	Anmerkung	<small>Wenn die Vorklärung teilweise oder auch ganz umfassen wird, machen Sie hier bitte genauere Angaben darüber (z.B. nach 50%, Vorklärung 20%, etc.)</small>
biologische Reinigung	Schlammalter t_{sl}	TS_{sl} <small>Bitte geben Sie das vorhandene Schlammalter als Mittelwert über den Betrachtungszeitraum in [d] an</small>
	Zugabe leicht abbaub. CSB	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein wenn ja Zugabe von:
	Volumen Belebungsbecken	[m³]
	P-Elimination	<input type="checkbox"/> Sie-P <input type="checkbox"/> Fällung Zugabe von:
	Sonstiges	<small>Hier können Sie zusätzliche Informationen bzgl. der P-Elimination angeben, z.B. wenn auf der Anlage ein zwei-stufiges Härtungssystem existiert, oder das Härtmittel für weitere Zwecke eingesetzt wird (z.B. für die Schlammfällung, Schwefelgeruch des Faulgases).</small>

3. Schlammfall

Zulauf Faulstufe	Primärschlamm (PS)	Q_{PS} [m³/d]	TR [%]	GV [%]	Art der Probenahme	Messung erfolgt vor d. Eindickung
	Überschussschlamm (ÜSS)	Angabe der Menge in [m³/d]	Angabe des Trockensubstanzanteils des gesamten Schlammes des jeweiligen Referenzjahres [%]	Angabe des Gehalts an [%]	<small>Geben Sie hier bitte die Art der Probenahme an (z.B. 24h-Mischprobe, 2h-Mischprobe, Mischprobe, parifizierte Stichprobe)</small>	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Rohschlamm = PS + ÜSS (RS)					<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Verfahren der Voreindickung	PS: Q_{PS}	ÜSS: $Q_{ÜSS}$	RS: Q_{RS}		
weitere Angaben zur Voreind.						
Externe Schlämme	Co-Substrate	Angabe der Menge in [m³/d]	Angabe des Trockensubstanzanteils des gesamten Schlammes des jeweiligen Referenzjahres [%]	Angabe des Gehalts an [%]	<small>Geben Sie hier bitte die Art der Probenahme an (z.B. 24h-Mischprobe, 2h-Mischprobe, Mischprobe, parifizierte Stichprobe)</small>	Messung erfolgt vor Nachdickung
	Zusammensetzung externer Schlämme und Co-Substrate	<small>Wichtigste hier bitte die Zusammensetzung der Art, Schmelze, Zuckerrückstände, etc. angeben, z.B. B, N, P, etc. Bitte machen Sie hier diese Angabe auch, wenn Sie unterschiedliche Substrate erhalten, Art (Schmelze / Zuckerrückstände).</small>				
	Ablauf Faulstufe	Faulschlamm	Q_{FS}	Q_{FS}	Q_{FS}	Q_{FS}

4. Faulstufe

Verfahrensführung	<input type="checkbox"/> stufig <input type="checkbox"/> ströbig	<small>Bitte geben Sie die Anzahl der Stufen bzw. Stufen der Faulung an, indem Sie die entsprechende Zahl eintragen.</small>	
	Behälter 1	Behälter 2	Behälter 3
	<small>Bitte vorhanden</small>	<small>Bitte vorhanden</small>	<small>Bitte vorhanden</small>
Faulbehältervolumen			[m³]
Baujahr			
Bauform	Angabe der Bauform, z. B. Eiform, Zylinder, Komplexbauform, etc.		
Isolierung	Angabe der Dicke der Isolierung des Faulbehälters in [cm]		
Durchmischung	Art der in Behälter befindlichen Vorrichtung zur Heißschichtumwälzung (z.B. Rührwerke, Beschleuniger, Faulgaspressung, etc.)		
Weitere Angaben	z.B. Art der Isolierung (Mineralfolle, EPS, PIR, ...), oder weitere betriebliche Besonderheiten des Faulbehälters (z.B. Wartungswegweise)		

Kontakt für Rückfragen:
 tectura an der TU Kaiserslautern
 Paul-Dörich-Str. 13
 67663 Kaiserslautern

Servicezeitpunkt Rückfragen: ab 8.4.15 Di - Fr 9 bis 12 Uhr
 Dipl.-Ing. Armut Hoerlich
 Tel.: 0631-352906
 Email: armut.hoerlich@heuing.uni-kl.de

Seite
1/3

38

Fragebogen: Faulung und Faulgasverwertung in Rheinland-Pfalz		Behälter 1			Behälter 2			Behälter 3			
<p>Projekt: "Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS" & "Abwasserreineigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung - arivve"</p>											
<p>Bitte geben Sie hier die Aufenthaltszeit des Schlammes im Faulbehälter an. Mittelwert über den Betrachtungszeitraum in [d] an. Angabe des Durchschnitts aus organischer Festfracht und Faulschlamm. Bitte geben Sie den Mittelwert ρ_{g} (tM/a) an.</p>											
<p>Bitte geben Sie die für das Bezugsjahr niedrigste Betriebstemperatur im Faulbehälter in [°C] an. Bitte geben Sie die für das Bezugsjahr höchste Betriebstemperatur im Faulbehälter in [°C] an. Bitte geben Sie die mittlere Betriebstemperatur im Faulbehälter für das Bezugsjahr in [°C] an.</p>											
<p>Messgeräte in Faulstufe (Welche?) z. B. T, pH, org. Säuren, ...</p>											
<p>Nutzung zur Automatisierung? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>											
<p>Klärgasanfall (m³/a) Methan-Gehalt (%)</p>											
<p>Art der Messung z. B. Vorkammer-Verfahren, ... Sonstiges</p>											
<p>als Normkubikmeter gemessen? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>											
<p>Heizung (m³/a) Fackel (m³/a)</p>											
<p>Stromerzeugung (m³/a) Direktantrieb (m³/a)</p>											
<p>Sonstiges</p>											
<p>Gasspeichervolumen (m³) Speicherart Baujahr</p>											
<p>Gasreinigung <input type="checkbox"/> Trocknung <input type="checkbox"/> Schwefel <input type="checkbox"/> Siloxane <input type="checkbox"/> CO₂</p>											
<p>Sonstiges</p>											
<p>Wird der Faulschlamm entwässert? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>											
<p>Wenn ja, welches Verfahren? <input type="checkbox"/> Dekanter <input type="checkbox"/> Kammerfiltertr. <input type="checkbox"/> Schneckenpresse <input type="checkbox"/> Gleitbandpresse</p>											
<p>Sonstiges: Bitte geben Sie hier bei Bedarf ein anderes Entwässerungsverfahren an.</p>											
<p>Konditionierungsmittel Angabe des Produktnamens und Hersteller des zugegebenen Produktes. Angabe des etwa zugegebenen Volumens des hier angegebenen Produktes in [l]</p>											
<p>TR nach Entwässerung (%)</p>											
<p>Entsorgungsweg Klärschlamm Landwirtschaft t TMs/a Verbrennung</p>											
<p>Sonstiges Tragen Sie hier bitte abweichende Entsorgungswege und die entsprechende Menge in TMs ein.</p>											
<p>Erfolgt eine separate Prozesswasserbehandlung? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>											
<p>Wenn ja, welches Verfahren? Angabe des Verfahrens (z.B. Ammoniakabtropfung, Ozonfällfällung, etc.)</p>											
<p>Sonstiges z. B. Zugabe von Enzymen, Desintegrationsanlagen (welche?), ...</p>											
<p>Ist die Kläranlage an das öffentliche Netz angeschlossen? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>											
<p>Umfang des Erdgasbezugs Bitte geben Sie hier die Daten als Jahressumme für das Bezugsjahr an - OHNE Eigenzeugung in [m³/a] davon über BHKW verstromt [m³/a]</p>											
<p>Netzanschlussstufe Niederspannung An welcher Netzanschlussstufe ist die KA angeschlossen? Ggf. beim lokalen Netzbetreiber nachfragen. Den vorhandenen Spannungswert bitte eintragen. (z. B. 400V)</p>											
<p>Mittelspannung An welcher Netzanschlussstufe ist die KA angeschlossen? Ggf. beim lokalen Netzbetreiber nachfragen. Den vorhandenen Spannungswert bitte eintragen. (z. B. 10, 20, 30 kV)</p>											
<p>Weitere Angaben Sind Transformatoren vorhanden? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>											
<p>Typ Wenn eigenlegene Transformatoren auf der Kläranlage vorhanden ist/ind bitte tragen Sie hier Hersteller und Typ ein.</p>											
<p>Leistung der Transformatoren Wenn eigenlegene Transformatoren auf der Kläranlage vorhanden ist/ind bitte deren Leistung eintragen.</p>											
<p>Kompensationsanlage <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Ist eine Kompensationsanlage zur Blindleistungskompensation (cosφ) - Kompensation vorhanden? Kompensation induktiver Blindleistung durch Kondensatorbank.</p>											
<p>Jahresspitzenlast Die Jahresspitzenlast wird in der Abrechnung des Stromverbrauchs in [kW] aufgeführt.</p>											
<p>Jahresstromfremdbezug Bitte geben Sie hier die Daten als Jahressumme für das Bezugsjahr in [kWh/a] an - OHNE Eigenzeugung.</p>											
Kontakt für Rückfragen:			tecta an der TU Kaiserslautern Paul-Ehrlich-Str. 13 67063 Kaiserslautern			Erreichbarkeit für Rückfragen: ab 8.15 Uhr - Fr 9 bis 12 Uhr			Dipl.-Ing. Almut Hörnrich Tel.: 0631-2062905 Email: almut.hoernrich@bawing.uni-kl.de		
										Seite 2/3	

