

# Abschlussbericht

## zum Forschungsvorhaben Energie und Klimaschutz

### Projekt Nr. 2: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen

**AZ IV-7-042 600 003B**

**Vergabenummer 08/058.3**

**Projektbezeichnung:**

**„Optimierung des Energieertrages kommunaler Kläranlagen durch prozess- und standortbezogene Verbundstrategie“**

**gerichtet an das**

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



Worpswede, den *24.4.2014*

Bevollmächtigter Vertreter  
der Bietergemeinschaft:

  
Dipl.-Ing. M. Mergelmeyer

Wuppertal, den *24.4.2014*

Technischer Projektleiter:

  
Dr.-Ing. G. Kolisch

## Projektpartner

Projektleitung		Bearbeiter
 	<u>Administrativ:</u> john becker ingenieure  <u>Technisch:</u> Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbh	Dipl.-Ing. M. Mergelmeyer  Dr.-Ing. G. Kolisch
	Aggerverband (AV Aggerwasser GmbH)  Sonnenstraße 40 51645 Gummersbach Tel.: 02261-36-318 Email: men@aggerverband.de	Ulrich Menninger - Staatl. gepr. Techniker
	Universität Stuttgart  Bandtäle 2 70569 Stuttgart Tel.: 0711-685-63740 Email: heidrun.steinmetz@iswa.uni-stuttgart.de	Prof. Dr.-Ing. H. Steinmetz Dr.-Ing. C. Locher
	john becker ingenieure  Am Hörenberg 1 27726 Worpswede Tel.: 04792-9310-55 Email: j.helmich@wirberaten.de	Dipl.-Ing. M. Mergelmeyer Dipl.-Wi.-Ing. J. Helmich Dipl.-Ing. J. Brüggemann
	Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbh  Untere Lichtenplatzer Straße 100 42289 Wuppertal Tel.: 0202-583-287 Email: ytn@wupperverband.de	Dr.-Ing. G. Kolisch Dipl.-Ing. Y. Taudien Dipl.-Ing. T. Osthoff

# Inhaltsverzeichnis

<b>Projektpartner</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Projektübersicht</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Aufgabenstellung.....	1
1.2 Vorgehen und Berichtsstruktur.....	2
<b>2 Grundlagen zum Energiehaushalt auf Kläranlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Gesamtenergiepotential im kommunalen Abwasser .....	4
2.2 Energiegehalt von Klärschlamm .....	4
2.3 Einfluss der Schlammstabilisierung auf die Energiebilanz.....	7
2.4 Energieausbeute bei der Schlammfäulung.....	9
2.5 Energienutzung.....	10
<b>3 Stand der Energieausbeute auf Kläranlagen in NRW</b> .....	<b>13</b>
3.1 Ausgangssituation .....	13
3.2 Datenabfrage von Faulungsanlagen in NRW .....	14
3.2.1 Datengrundlage .....	14
3.2.2 Schlamm- und Gasanfall.....	17
3.2.3 Faulgasnutzung .....	29
3.2.4 Energetische Kennwerte .....	32
3.2.5 Kennzahlen im Überblick .....	35
3.3 Auswertung von Energieanalysen des IPA-Förderprogramms.....	36
3.3.1 Datengrundlage .....	36
3.3.2 Energiebedarf nach Verfahrensgruppen .....	38
3.3.3 Faulgaserzeugung .....	41
3.3.4 Faulgasnutzung .....	42
3.3.5 Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz .....	43
3.4 Zwischenfazit zur IST-Situation.....	48
<b>4 Optimierung der Faulgaserzeugung</b> .....	<b>50</b>
4.1 Faulgaserzeugung durch Integration einer Schlammfäulung.....	51
4.2 Steigerung der Faulgaserzeugung durch Beeinflussung des Schlammanfalls .....	55
4.2.1 Vergrößern der Vorklärung .....	56
4.2.2 Chemisch unterstützte Vorklärung (Vorfällung) .....	59
4.2.3 Reduzierung des Schlammalters .....	62
4.2.4 Prozesswasserbehandlung / Deammonifikation .....	65

---

4.3	Steigerung der Gasausbeute durch Schlammvorbehandlung .....	68
4.3.1	Verbesserter Wirkungsgrad der Voreindickung .....	69
4.3.2	Verfahren zur Desintegration .....	73
4.4	Steigerung der Gasausbeute bei der Schlammfäulung .....	77
4.4.1	Grundlagen und Einflüsse des Faulprozesses .....	78
4.4.2	Vollständige Nutzung des Faulraums .....	80
4.4.3	Mehrstufige Fäulung / Hochlastfäulung .....	83
4.4.4	Adaptive Temperaturanpassung der Fäulung .....	87
4.4.5	Ausgasung und Nachfäulung .....	92
4.5	Zusammenfassung der Verfahrensansätze .....	96
<b>5</b>	<b>Verbesserung der Gasnutzung .....</b>	<b>98</b>
5.1	Anforderungen und verfügbare Gasnutzungstechnologien .....	99
5.1.1	Anforderungen an eine verbesserte Gasnutzung .....	99
5.1.2	Gasnutzungstechnologien .....	103
5.2	Quantitative Bewertung der Nutzungsalternativen und Technologien .....	115
5.2.1	Grundlagen für die weiteren Modellrechnungen .....	115
5.2.2	Stromgestehungskosten .....	122
5.2.3	Strom und faulgasbezogene Einsparungen .....	124
5.2.4	BHKW-Repowering .....	130
5.2.5	Einschätzung für Betreiber .....	135
5.2.6	Vermeidung von CO <sub>2</sub> -Emissionen durch eine verbesserte Gasnutzung .....	142
5.2.7	Auswirkungen veränderter Strombezugskosten .....	143
5.3	Zusammenfassung .....	145
<b>6</b>	<b>Standortbezogene Verbundkonzepte .....</b>	<b>147</b>
6.1	Modellanlage und Vorgehen .....	148
6.2	Regenerativverbund .....	151
6.3	Schlammverbund .....	154
6.4	Wärmeverbund .....	157
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse zu Verbundkonzepten .....	160
<b>7</b>	<b>Aufbau eines stationären Bilanzmodells .....</b>	<b>161</b>
7.1	Bedeutung des Bilanzmodells .....	161
7.2	Aufbau des Bilanzmodells .....	162
7.3	Beispielhafte Darstellung .....	168
7.3.1	Kläranlage A: .....	168
7.3.2	Kläranlage B: .....	171
7.3.3	Kläranlage C: .....	174

---

7.3.4	Variantenbetrachtung.....	177
7.3.5	Bewertung des stationären Bilanzmodells.....	178
<b>8</b>	<b>Potentialabschätzung NRW .....</b>	<b>179</b>
8.1	Ist-Zustand NRW .....	180
8.2	Untersuchte Szenarien .....	182
8.2.1	Szenario 1: Verfahrensumstellung auf anaerobe Stabilisierung .....	182
8.2.2	Szenario 2: Primärschlammmentnahme steigern.....	185
8.2.3	Szenario 3: Schlammalter absenken.....	187
8.2.4	Szenario 4: Alle Faulungsanlagen mit KWK ausrüsten .....	189
8.2.5	Szenario 5: Wirkungsgrad der Stromerzeugung steigern .....	191
8.2.6	Szenario 6: Freie Faulbehälterkapazitäten nutzen .....	193
8.3	Szenarienvergleich .....	195
<b>9</b>	<b>Beispiele für betriebliche Erfahrungen (KA Steckbrief) .....</b>	<b>198</b>
9.1	KA Büchel (Schlammverbund) .....	198
9.2	KA Engelskirchen (BHKW-Repowering) .....	200
9.3	KA Warendorf (Mikrogasturbine).....	202
9.4	KA Lingen (Desintegration).....	204
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>206</b>
	<b>Verzeichnis der Bilder.....</b>	<b>208</b>
	<b>Verzeichnis der Tabellen .....</b>	<b>215</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>217</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>223</b>

## Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
AbwV	Abwasserverordnung	-
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	-
ATV	Abwassertechnische Vereinigung (jetzt DWA)	-
B <sub>d,x</sub>	Tägliche Fracht des Parameters x	[kg/d]
BHKW	Blockheizkraftwerk	-
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	[mg/l]
C	Kohlenstoff	-
c <sub>x</sub>	Konzentration des Parameters x	[mg/l], [kg/m <sup>3</sup> ], [g/l]
CH <sub>4</sub>	Methan	-
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	-
CSB	Sauerstoffbedarf für eine vollständige chemische Oxidation	[mg/l]
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall	-
E <sub>Abwasser</sub>	Energiepotential Im Abwasser. (hier: chemisch gespeichert)	[kWh <sub>EP</sub> /(EW*a)]
ED	Eindickung	-
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	-
EW <sub>x</sub>	Einwohnerwert; EW = EZ+EGW; bezogen auf den Parameter x	[E]
FB	Faulbehälter	-
FG	Faulgas	-
FHM	Flockungshilfsmittel	-
GV	Glühverlust	[%]
GK	Größenklasse	-
kWh	Kilowatt pro Stunde	[kWh]
kWh <sub>PE</sub>	Primärenergiepotential in Kilowatt pro Stunde	[kWh]
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	-
l <sub>N</sub>	Normliter	[l]
$\dot{m}_{oTR}$	Massenstrom an organischen Substrat (siehe oTR)	[kg oTR/d]
MGT	Mikrogasturbine	-
MKULNV	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	-
MÜSE	maschineller Schlamm-Eindickung	-
NAwaS	Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Tahmendbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz	-

NK	Nachklärung (NKB = Nachklärbecken)	-
NRW	Nordrhein-Westfalen	-
ORC	Organic Rankine Cycle	-
oTR	Organischer Trockenrückstand	[g/l]
PE	Primärenergie	-
PW	Prozesswasser	-
PS	Primärschlamm	-
$Q_x$	Volumenstrom bezogen auf den Parameter x	[m <sup>3</sup> /h]; [l/s]
RS	Rohschlamm (Mischschlamm)	-
T	Temperatur	[°C]
$t_R$	Aufenthaltszeit Faulbehälter / Reaktor (Faulzeit)	[d]
$t_{FB}$		
$t_{TS}$	Schlammalter der Biologie	[d]
$t_{VK}$	Vorklärzeit	[d]
TKN	Kjeldahl-Stickstoff	-
TR	Trockenrückstand (prozentualer Anteil vom Schlamm)	[%]
TS	Trockensubstanz (Konzentration des Trockenrückstandes)	[g/l]
ÜS	Überschussschlamm	
VK	Vorklärung	-
$\dot{V}_G$	Gas-Volumenstrom	[l <sub>N</sub> /d]
$V_{DN}$	Volumen Denitrifikation	M <sup>3</sup>
$V_{BB}$	Volumen Belebungsbecken	m <sup>3</sup>
$X_{Qmax}$	Faktor zur Berechnung des maximalen Trockenwetterabflusses	-
$y_{EP}$	Spezifische Energieausbeute	[kWh/(E*a)]
$y_G$	Spezifische Gasausbeute	l <sub>N</sub> /kg oTR <sub>zu</sub>
$\eta_{el}$	Elektrischer Wirkungsgrad	[%]
$\eta_{th}$	Thermischer Wirkungsgrad	[%]

# 1 Projektübersicht

## 1.1 Hintergrund und Aufgabenstellung

Kläranlagen haben aus energetischer Sicht innerhalb einer Kommune einen besonderen Stellenwert. Einerseits sind sie der größte Einzelverbraucher an Energie, andererseits aber auch ein Energieerzeuger, da bei Anlagen mit separater anaerober Schlammstabilisierung Klär- bzw. Faulgas als Nebenprodukt anfällt. Dieses kann für die Eigenproduktion von Strom und Wärme in Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden.

Die weitestgehende Deckung des Energiebedarfs der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung durch die Eigenproduktion stellt neben der Reduktion des einwohnerspezifischen Energieverbrauchs die zweite wesentliche Säule zur Steigerung der Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen dar. Sie ist aus Gründen der Nachhaltigkeit mit einer Reduktion des standortbezogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes wie auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten aufgrund der weiter steigenden Kosten für fremdbezogene Energie von großer Bedeutung.

Die Untersuchungen des vorliegenden Berichtes zur Steigerung der Energieeigenproduktion auf kommunalen Kläranlagen untergliedern sich in die Steigerung der Energieausbeute und die Verbesserung der Klärgasnutzung. Die maßgeblichen Projektziele stellen sich hierbei wie folgt dar:

- Aufbauend auf einer Datenerhebung bei Betreibern von Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung wird der aktuelle Stand der Energieausbeute beschrieben.
- Die heute verfügbaren Technologien, die einen möglichst hohen Anteil der Schmutzfracht über eine anaerobe Behandlung in nutzbare Primärenergie überführen, werden beschrieben und der Nutzen zusammengefasst.
- Die Nutzungsmöglichkeiten des Klärgases werden erläutert und in einer Variantenuntersuchung die effektivste Nutzung der verfügbaren Energieträger ermittelt.
- Es wird ein Modellansatz entwickelt, der es Betreibern ermöglicht, für die spezifische Kläranlage die maximal mögliche Energieausbeute abzuschätzen und diese in einer Energiebilanz der real vorhandenen Ausbeute gegenüber zu stellen.
- Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen wird das energetische Optimierungspotential für das Bundesland Nordrhein-Westfalen abgeschätzt.



## 1.2 Vorgehen und Berichtsstruktur

Zur Übersicht und zum vereinfachten Navigieren innerhalb des Berichtes ist die Berichtsstruktur mit ihren Hauptkapiteln nachfolgend dargestellt (Diese gliedern sich in die vier Hauptbereiche: Grundlagen, IST-Zustand, technische Ansätze und Bewertung bzw. Potential).

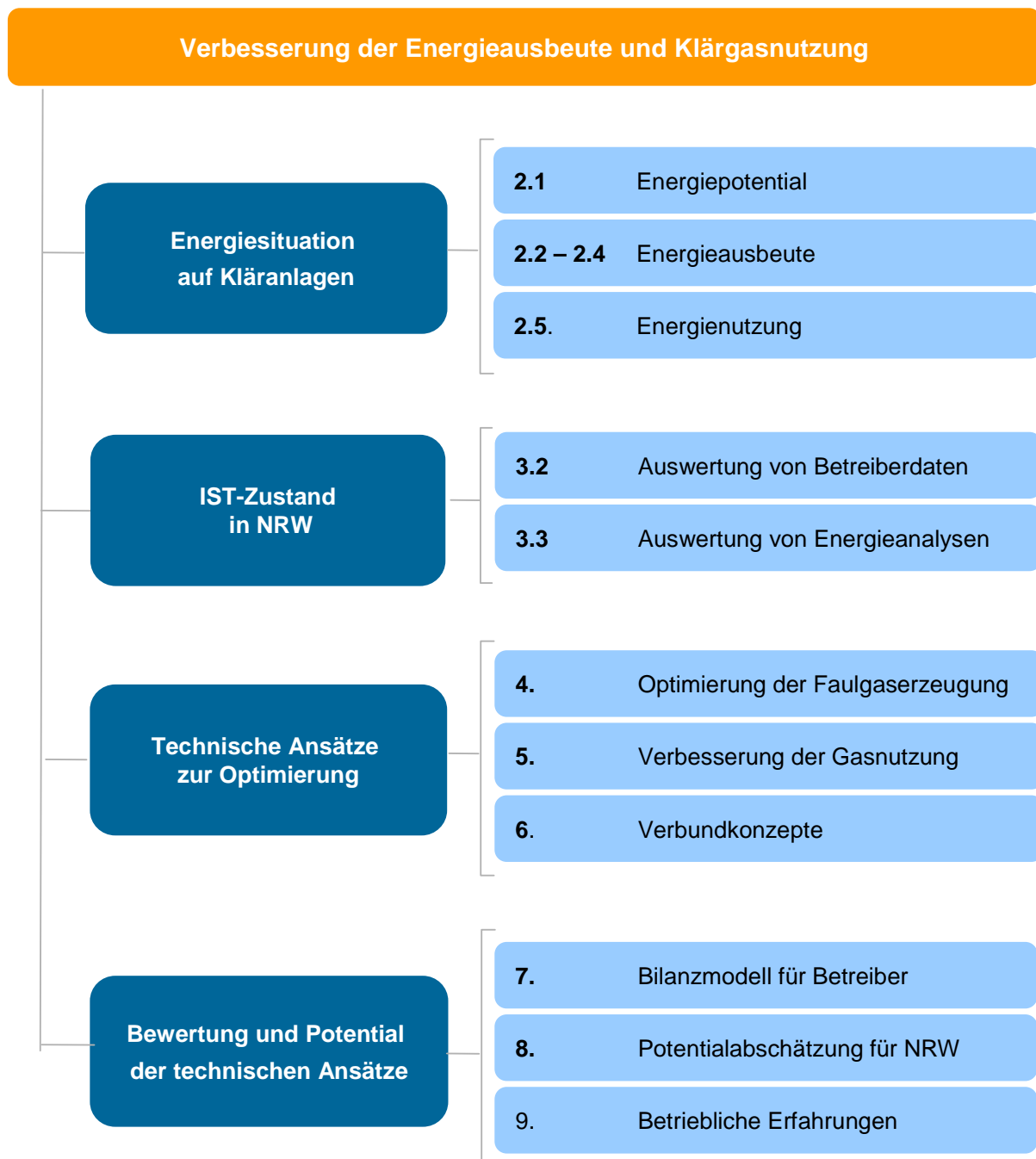


Bild 1.1: Organigramm der Berichtsstruktur

## 2 Grundlagen zum Energiehaushalt auf Kläranlagen

Die im Abwasser gespeicherte Energie ( $E_{\text{Abwasser}}$ ) kann in chemische, thermische und potenzielle Energie unterteilt werden. Für die Energienutzung auf kommunalen Kläranlagen ist hauptsächlich die in den gelösten und partikulären organischen Abwasserinhaltsstoffen gespeicherte chemische Energie von Bedeutung. Nur diese Form der Energie wird im Folgenden weiter betrachtet.

Die Energieausbeute  $y_E$  ( $\text{yield}_{\text{Energy}}$ ) gibt an, in welchem Maße die im Abwasser gespeicherte chemische Energie durch eine Eigenproduktion in nutzbare Energie umgewandelt wird. Die nutzbare Energie ist wiederum in hochwertige elektrische Energie oder Wärmeenergie zu unterscheiden. Aufgrund der derzeitigen Marktsituation nimmt die elektrische Energie hiervon insgesamt einen deutlich höheren Stellenwert ein. Der elektrische Energiehaushalt einer kommunalen Kläranlage ist zum Überblick in Bild 2.1 dargestellt.

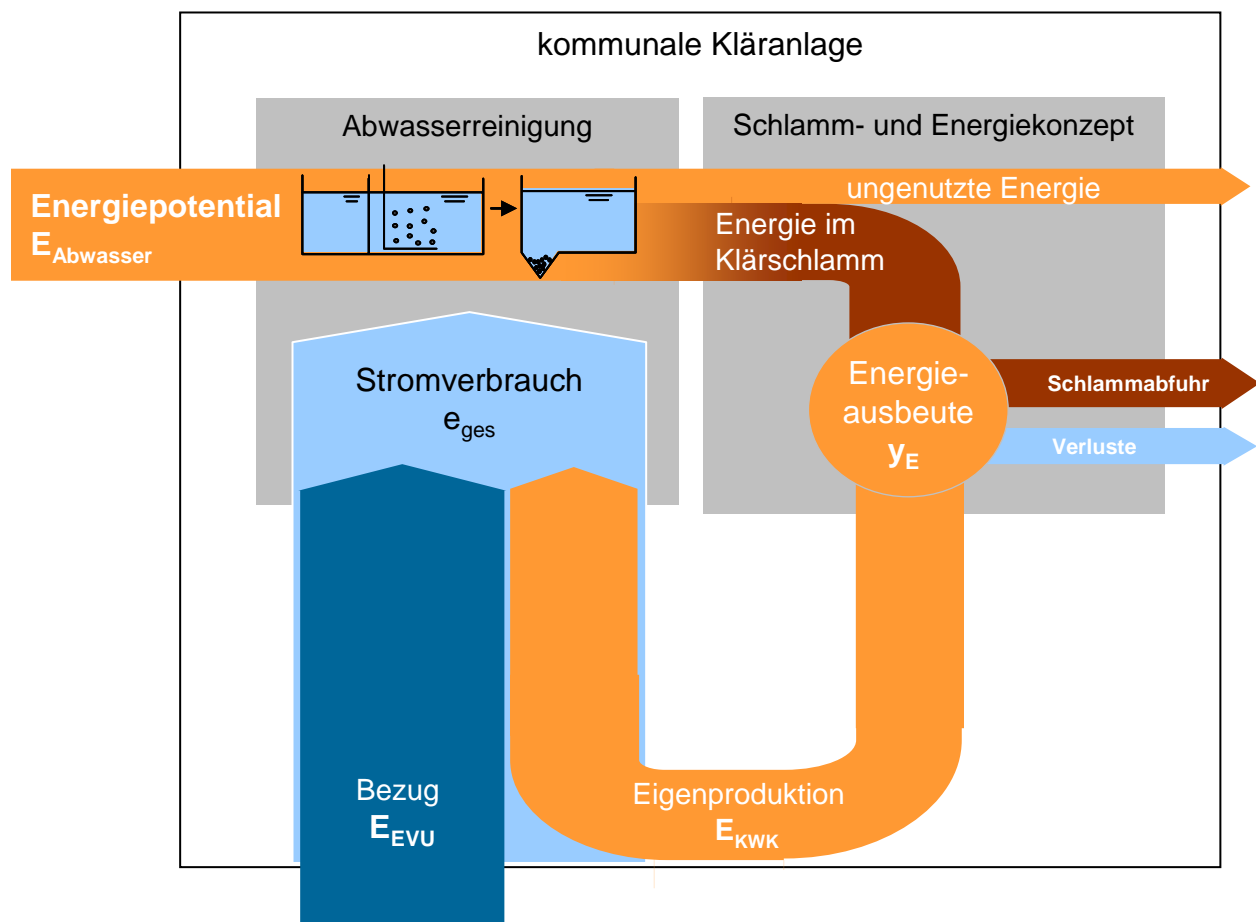


Bild 2.1: Schema zum elektrischen Energiehaushalt der Abwasserreinigung

## 2.1 Gesamtenergiepotential im kommunalen Abwasser

Ein Maß für das Energiepotential der im Abwasser befindlichen organischen Bestandteile ist der Sauerstoffbedarf für deren vollständige chemische Oxidation (CSB). Bei einem anaeroben Abbau können die energiereichen Kohlenstoffverbindungen zu Methan ( $\text{CH}_4$ ) umgewandelt werden. Über die stöchiometrische Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs bei der Oxidation von Methan zu Kohlendioxid lässt sich die Verbindung zwischen Methan und CSB herstellen. Der Sauerstoffbedarf ist dabei proportional zur erzeugten Gasmenge und es ergibt sich ein Verbrauch von zwei mol  $\text{O}_2$  für ein mol  $\text{CH}_4$  (Roediger et al., 1990). Bei Ansatz von  $22,4 \text{ l}_{\text{CH}_4}/\text{mol}$  und  $64 \text{ g CSB/mol}$  errechnet sich eine Methanproduktion in Höhe von ca. **350 l  $\text{CH}_4$ /kg CSB** (Cornel, 2006).

Mit dem Heizwert von Methan ( $35,89 \text{ MJ/m}^3$  bzw.  $10 \text{ kWh}_{\text{PE}}/\text{m}^3$ ) ergibt sich ein (Primär-) Energiegehalt in Höhe von **3,5 kWh/kg CSB**. In der täglichen Schmutzfracht von ca.  $120 \text{ g CSB}/(\text{EW} \cdot \text{d})$  steckt somit in Summe ein Energiegehalt von etwa  $0,42 \text{ kWh}/(\text{EW} \cdot \text{d})$  ( $= 3,5 \text{ kWh/kg CSB} \cdot 0,120 \text{ kg CSB}/(\text{EW} \cdot \text{d})$ ).

Das vorhandene jährliche (Primär-) Energiepotential lässt sich über die angeführte Schmutzfracht zu  **$y_{\text{EP,max}} = 153 \text{ kWh}_{\text{EP}}/(\text{EW} \cdot \text{a})$**  definieren. Dieses Potenzial ist naturgemäß weitaus größer als die unter Realbedingungen auf einer Kläranlage erreichbare Energieausbeute.

## 2.2 Energiegehalt von Klärschlamm

Bei der mechanisch-biologischen Abwasserreinigung werden die im Abwasser enthaltenen gelösten organischen Verbindungen zu einem Großteil in partikuläre Biomasse überführt und gemeinsam mit den im Rohabwasser enthaltenen partikulären Stoffen als Klärschlamm aus dem System entnommen. In den organischen Bestandteilen dieser Schlämme findet sich ein großer Teil der Energie des Abwassers in aufkonzentrierter Form wieder.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Bezeichnungen für Klärschlamm, die entsprechend des Anfallortes und des Behandlungsstatus differenziert werden. In der Vorklärung fällt Klärschlamm als Primärschlamm (PS) und in der biologischen Reinigungsstufe als Sekundärschlamm (Überschussschlamm, ÜS) an.

Die beiden Klärschlammarten unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und damit in ihrer biologischen Abbaubarkeit (vgl. Bild 2.2). Primärschlamm besteht überwiegend aus leicht abbaubaren Kohlenhydraten und Fetten und nur zu einem geringen Teil aus komplexer aufgebauten und daher schwerer abbaubaren Proteinen. Überschussschlamm hingegen ist ein Produkt des mikrobiellen Wachstums. Er besteht vorrangig aus lebender und abgestorbener Biomasse und damit in hohem Maße aus komplexeren Proteinen.

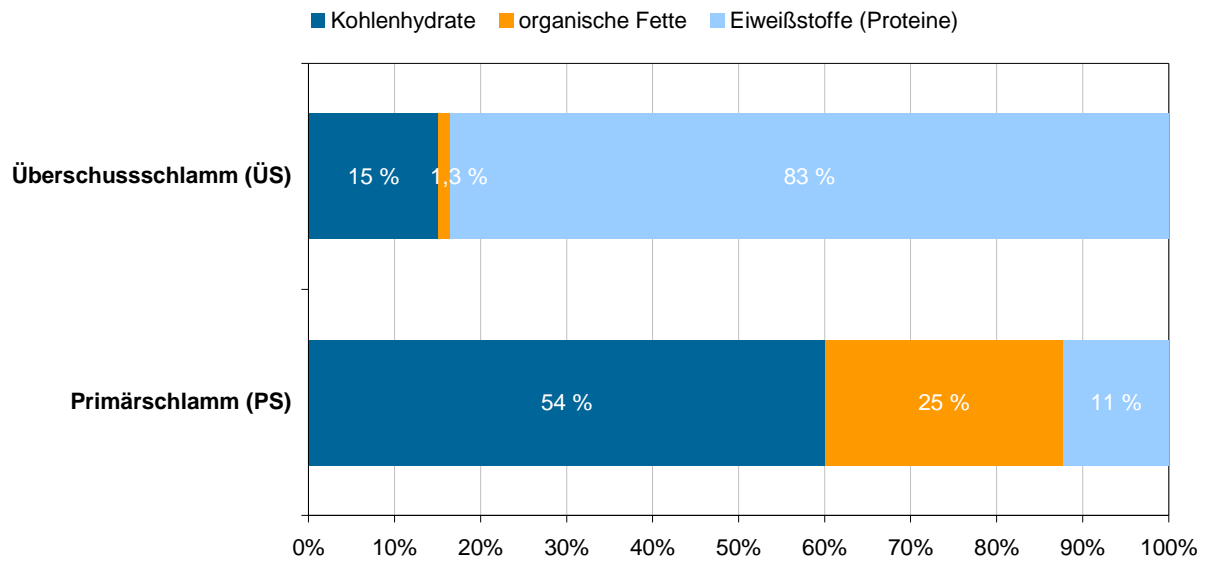


Bild 2.2: Zusammensetzung von Primär- und Überschussschlamm (Lindholm & Ossianson, 2008)

Darüber hinaus entsteht bei der Dosierung von Fällmitteln zur chemischen Phosphor-Elimination ein weitgehend anorganischer Fällschlamm, der je nach Verfahren (Vor-, Simultan-, Nachfällung) zusammen mit dem Primär- oder mit dem Überschussschlamm abgezogen wird.

Die in den genannten Schlammarten gebundene chemische Energie lässt sich wiederum anhand des CSB bestimmen. Der CSB-Gehalt von Primär- und Überschussschlamm kann dabei aus den CSB-Gehalten von Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten für beide Schlammarten abgeleitet werden (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Energiegehalt und Gasertrag der verschiedenen Bestandteile der Organik

Stoffart	CSB/oTR	Gasertrag	Methangehalt	Methanertrag
	[-]	[l <sub>N</sub> /kg oTR <sub>zu</sub> ]	[% CH <sub>4</sub> ]	[l <sub>N,CH4</sub> /kg oTR <sub>zu</sub> ]
Kohlenhydrate	1,14	790	50	400
organische Fette	2,46	1.270	68	860
Eiweißstoffe (Proteine)	1,43	700	71	500

Übliche Werte für Primärschlamm liegen zwischen 1,6 bis 1,9 g CSB/g oTR und für den Überschussschlamm zwischen 1,4 bis 1,6 g CSB/g oTR. Das CSB/oTR-Verhältnis des Rohschlammes beträgt zwischen 1,6 und 1,8 g CSB/g oTR.

Unter Ansatz des Verhältniswertes von 350 l CH<sub>4</sub>/kg CSB können damit durch einen anaeroben Prozess zwischen 560 und 630 l CH<sub>4</sub>/kg oTR<sub>abgebaut</sub> erzeugt werden. Bei einem üblichen Methananteil im Faulgas von ca. 65 % entspricht dies einem Gasertrag von rund **900 I<sub>N</sub> Faulgas/kg oTR<sub>abgebaut</sub>**. Unter Ansatz von mittleren Abbaugraden von 50 %, ergibt sich folglich eine Gasausbeute bezogen auf die zugeführte Organik in Höhe von etwa **450 I<sub>N</sub> Faulgas/kg oTR<sub>zugeführt</sub>**.

Der **Schlammfall** wird bei der Bemessung in der Regel anhand von Erfahrungswerten abgeschätzt oder durch empirisch ermittelte Formeln aus den Zulaufkonzentrationen berechnet. Im Allgemeinen wird hierbei auf die Schlammliste nach Imhoff zurückgegriffen (Imhoff, 1999). Zur Berechnung des Überschussschlammfalls wird zusätzlich ein Ansatz nach Kayser (1971, 1983) verwendet, der auch in dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 zu finden ist.

Eine erweiterte Schlammliste findet sich in dem Merkblatt ATV-DVWK-M 368 zur biologischen Stabilisierung von Klärschlamm. Hierbei werden unterschiedliche Verfahrensarten und Betriebsbedingungen berücksichtigt. Die Spannbreiten der Kennwerte nach ATV-DVWK-M 368 sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Schlammfall und –beschaffenheit (nach ATV-DVWK , 2003)

Schlammart	TR-Gehalt	TR-Fracht	oTR/TR	Ort	Bestandteile
	[%]	[g/E/d]	[%]	[-]	[-]
Primärschlamm (PS)	2-8	30 - 40	67	Vorklärung	partikuläre Stoffe
Überschussschlamm (ÜS)	0,7	30 - 56	65-75	Nachklärung	Biomasse
Fällschlamm (ÜS <sub>P</sub> , ÜS <sub>FF</sub> )	-	2,5 - 7,5	0	Fällmittelzugabe	Anorganik

### 2.3 Einfluss der Schlammstabilisierung auf die Energiebilanz

Aufgrund ihres hohen Gehaltes an organischer Substanz müssen die bei der Abwasserreinigung anfallenden Schlämme weiter behandelt bzw. stabilisiert werden. Kleinere Kläranlagen der Größenklasse 1 bis 4 setzen hierzu meist die simultane aerobe Schlammstabilisierung ein, während auf größeren Kläranlagen (GK 4 und 5) der Rohschlamm überwiegend einer separaten Schlammfäulung zugeführt wird.

Die Art der Schlammstabilisierung hat einen erheblichen Einfluss auf den Energiehaushalt der Abwasserreinigung. Mit der Verkürzung des Schlammalters von einer simultan aerob stabilisierenden Anlage zu einer Anlage mit reiner Nährstoffelimination steigt der Anteil des mit dem Überschussschlamm aus der biologischen Stufe abgezogenen biologisch abbaubaren CSB.

Bei Einsatz einer Vorklärung wird der Anteil des über den Schlamm entnommenen CSB nochmals vergrößert. Der Anteil des CSB, der in der biologischen Stufe veratmet wird, geht proportional dazu zurück. Der im Rohschlamm enthaltene abbaubare CSB wird bei der Schlammfäulung anaerob aufgeschlossen und in Methan überführt, welches energetisch für die Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt werden kann. Eine Verlängerung der Vorklärdauer erhöht die Gasproduktion, ist jedoch in ihrer Wechselwirkung mit dem Betrieb der Nährstoffelimination zu bewerten, da sich das C/N-Verhältnis verändert. Bei der separaten Schlammfäulung ist weiterhin die Rückbelastung der biologischen Stufe mit Stickstoff in Höhe von etwa  $1,5 \text{ g N}/(\text{E} \cdot \text{d})$  aus den Prozesswässern der Schlamm-entwässerung zu beachten.

Die nachfolgenden Bilder zeigen vergleichend die CSB- und die Energiebilanz einer Kläranlage bei Betrieb als Anlage mit simultaner aerober Schlammstabilisierung bzw. bei Einsatz einer separaten Schlammfäulung mit Klärgasverstromung.

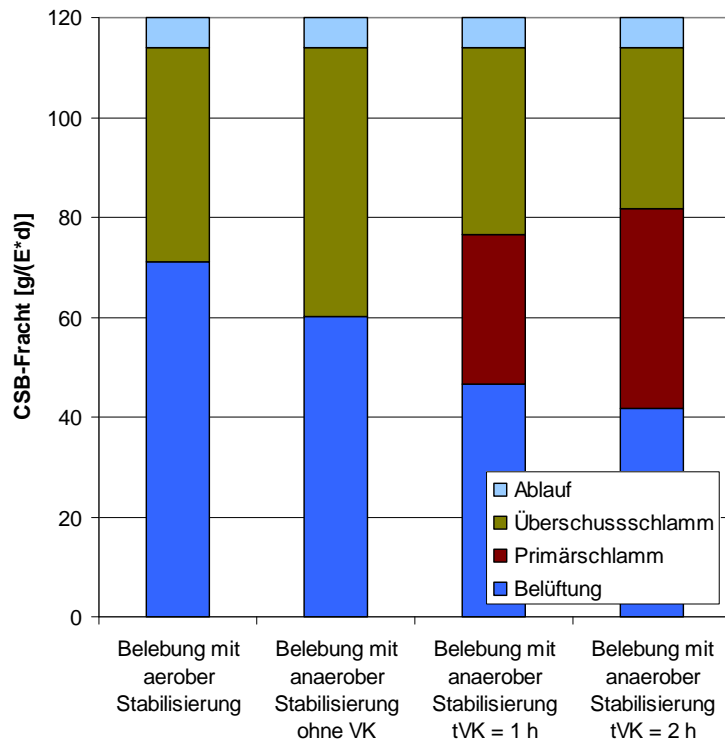


Bild 2.3: CSB-Bilanz bei der simultanen aeroben und der anaeroben Schlammstabilisierung (LU, 2009)

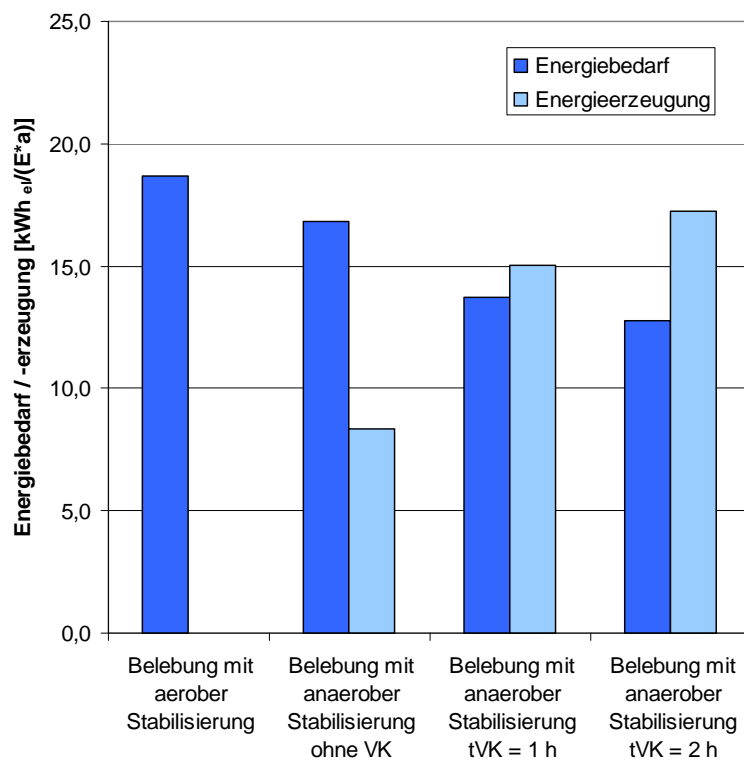


Bild 2.4: Energiebedarf für den Sauerstoffeintrag in der biologischen Stufe im Vergleich zu der Stromerzeugung aus dem produzierten Faulgas (LU, 2009)

## 2.4 Energieausbeute bei der Schlammfäulung

Für die biologische Abwasserreinigung mit einem Schlammanfall von rund 80 g TR/(EW\*d) ergibt sich bei einer nachfolgenden Fäulung des Schlammes eine spezifische Klärgasproduktion von ca. 20 l/(EW\*d). Mit einem Methananteil von 65 % errechnet sich eine Ausbeute an Primärenergie von 48 kWh/(EW\*a). Bei einer Nutzung des Klärgases in einer BHKW-Anlage ( $\eta_{el} = 35\%$ ) können rund 17 kWh<sub>el</sub>/(EW\*a) produziert werden. Die bei der Stromerzeugung anfallende Abwärme ( $\eta_{th} = 55\%$ ) ermöglicht zudem eine Wärmenutzung von 27 kWh<sub>th</sub>/(E\*a).

Beim Vergleich mit dem in Kapitel 2.1 berechneten Energiegehalt des Abwassers in Höhe von rund 150 kWh<sub>el</sub>/(E\*d) wird deutlich, dass das Energiepotential des Abwassers über den Weg der Schlammproduktion mit nachfolgender anaerober Stabilisierung nur in begrenztem Umfang genutzt werden kann. Bezogen auf einen spezifischen Gesamtstromverbrauch kommunaler Kläranlagen von ca. 30 bis 40 kWh/(E\*a) ermöglicht diese jedoch eine Stromeigendeckung von etwa 50% sowie eine volle Eigendeckung des Wärmebedarfs der Kläranlage.

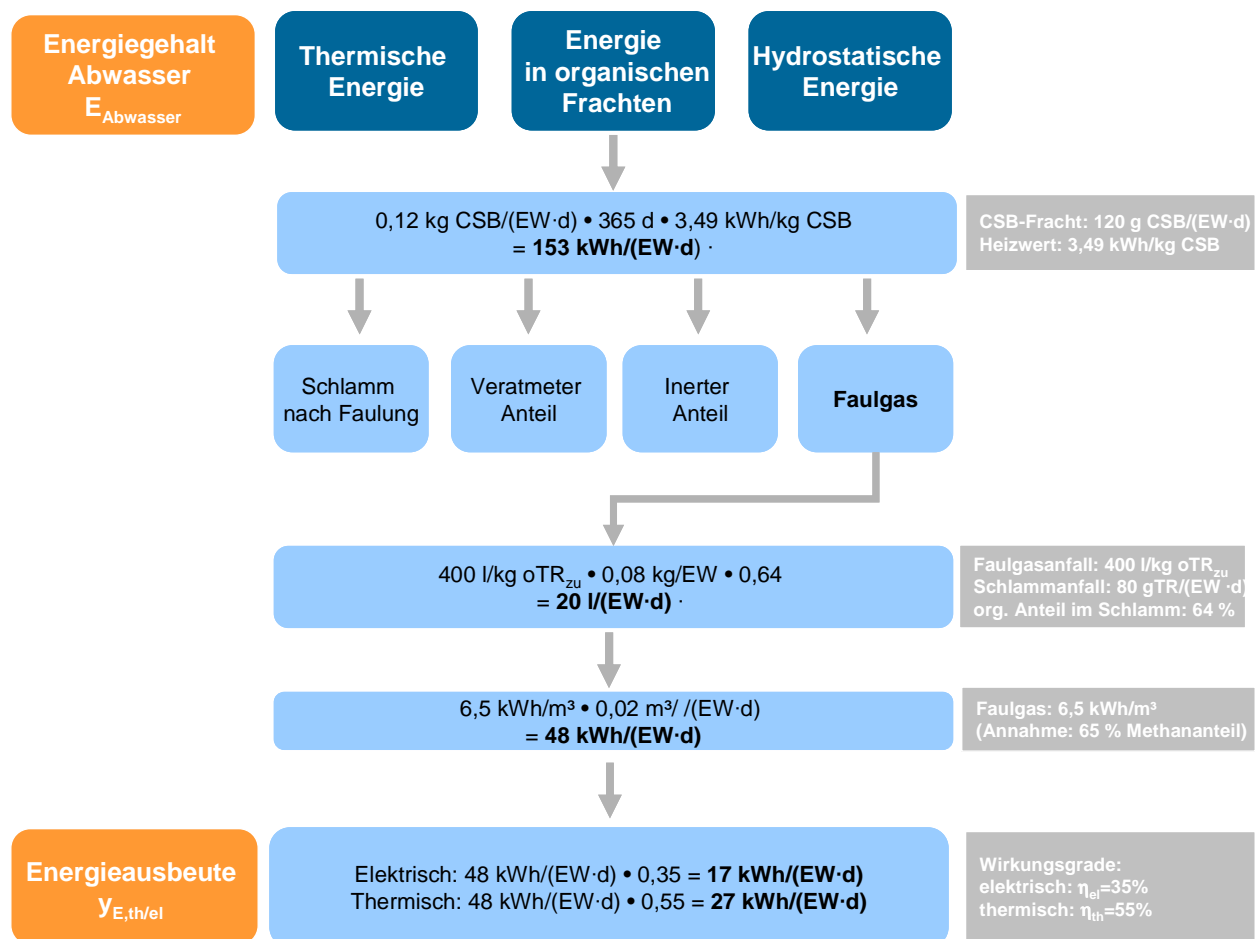


Bild 2.5: Energieausbeute bei der Abwasserreinigung (nach Gretzschel et al, 2012)



## 2.5 Energienutzung

Zur Verwertung des Faulgases gibt es mehrere örtliche Nutzungswege. Die Energieausbeute bei der Erzeugung von elektrischer Energie und Heiz- bzw. Prozesswärme ist dabei maßgeblich von dem Wirkungsgrad der eingesetzten Aggregate abhängig. Die Nutzungsmöglichkeiten sind zusammenfassend in Bild 2.6 dargestellt.

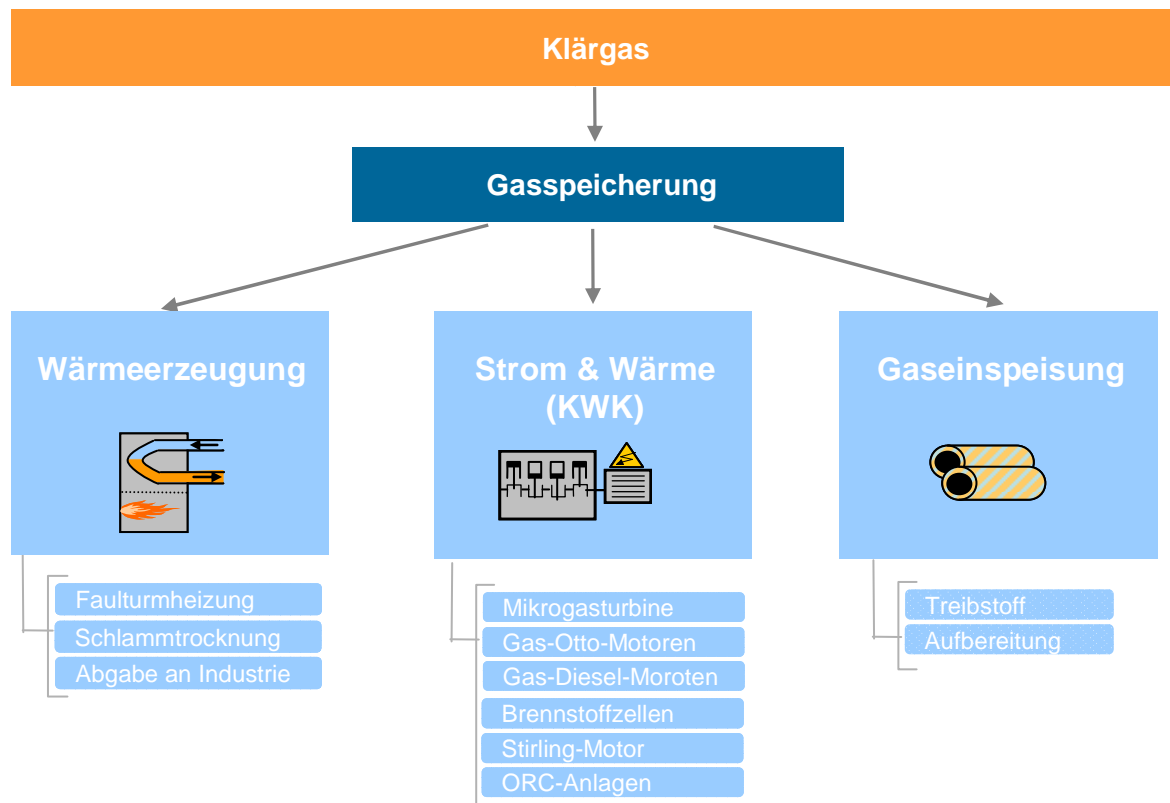


Bild 2.6: Schema zu den Nutzungswegen bei der Faulgasverwertung

### Wärmeerzeugung mit Faulgas

Zur reinen Wärmeerzeugung wird das Faulgas in einem Heizkessel eingesetzt. Zum Einsatz kommen hierbei in der Regel Brennwertkessel, bei denen die im Faulgas enthaltene chemische Energie fast vollständig in thermische Energie umgewandelt wird ( $\eta_{th} = 90\%$ ). Die Heizkessel sind üblicherweise mit Zweistoffbrennern (Faulgas/Öl oder Faulgas/Erdgas) ausgerüstet, damit auch bei Betriebsstörungen der Schlammfäulung die Wärmeproduktion sichergestellt werden kann.

Bei Kläranlagen mit beheizter anaerober Schlammfäulung wird die Wärme überwiegend zur Aufheizung des Rohschlammes benötigt. Falls keine Aggregate zur Kraft-Wärme-Kopplung vorhanden sind, wird das nach Deckung des Wärmebedarfs verbleibende Klärgas über die Fackel entsorgt. Diese Vorgehensweise ist auch heute noch auf einer Vielzahl kleinerer Kläranlagen mit Schlammfäulung zu finden.

### Kraft- Wärme- Kopplung

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird das Faulgas als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor oder einer Gasturbine verwendet wodurch ein Generator angetrieben wird und Netzstrom produziert wird. Die zeitgleich anfallende Abwärme des Motors und aus dem Abgas kann zum Heizen genutzt werden. Aufgrund der hohen Strombezugspreise und der im Vergleich deutlich niedrigeren Vergütung nach EEG ist es wirtschaftlicher den eigenproduzierten Strom direkt auf der Kläranlage einzusetzen als ihn ins Stromnetz einzuspeisen. Die Klärgasnutzung durch Kraft-Wärme-Kopplung stellt heute insbesondere auf den großen Kläranlagen mit Schlammfaulung die Regel dar. Aus Redundanzgründen und zur ggf. erforderlichen Spitzendeckung wird zumeist eine Kesselanlage parallel zum BHKW vorgehalten.

Als Aggregate stehen Blockheizkraftwerke (BHKW) oder Mikrogasturbinen (MGT) zur Verfügung (siehe Bild 2.7). Die Entscheidung für ein BHKW oder eine MGT hängt von der produzierten Faulgasmenge und der Schwankungsbreite der Gasproduktion ab.



Mikrogasturbinen-Anlage (Capstone, 2\*65 kW<sub>el</sub>), KA Warendorf



Blockheizkraftwerk (MWM, 4\*490 kW<sub>el</sub>), KA Buchenhofen

Bild 2.7: KWK-Aggregate zur Nutzung des Faulgases

Der Gesamtwirkungsgrad eines BHKWs liegt heute üblicherweise bei 85 %, der elektrische Wirkungsgrad liegt zwischen 30 und 40 %, die Differenz ergibt den thermischen Wirkungsgrad. Das BHKW-Modul sollte so ausgelegt sein, dass es nicht in einem ungünstigen Teillastbereiches kleiner 70 % geregelt werden muss. Im Vergleich dazu liegt der elektrische Wirkungsgrad einer MGT mit 25 bis 30 % deutlich niedriger als bei einem

BHKW. Der Gesamtwirkungsgrad liegt bei 80 %. Vorteile der MGT sind demgegenüber ein guter Wirkungsgrad auch im Teillastbereich von 60 bis 100 %. Darüber hinaus fallen bei der MGT die Betriebs- und Wartungskosten aufgrund des verschleißarmen Antriebs geringer aus als bei einem BHKW.

Neben der Verstromung des Faulgases in einer KWK-Anlage besteht auch die Möglichkeit, das Faulgas direkt für die Belüftung einzusetzen und anstelle eines Generators einen Verdichter anzutreiben. Der hohe Nutzungsgrad dieser Variante ist allerdings mit einem gegenüber den stromgetriebenen Aggregaten reduzierten Regelbereich verbunden. Eine Staffelung würde den kostenintensiveren Einsatz mehrerer Gasmotoren erfordern, so dass in der Regel ein stromgetriebenes kleineres Aggregat parallel vorgehalten und betrieben werden muss. Wird dieses während der Schwachlastzeiten ausschließlich betrieben, kann u.U. nicht in ausreichendem Umfang Wärme für den Betrieb der Faulstufe ausgekoppelt werden. Insofern finden sich direktangetriebene Verdichter nur in selteneren Fällen auf kommunalen Kläranlagen.

### Gaseinspeisung ins Erdgasnetz

Die Einspeisung des Faulgases in das Erdgasnetz als sogenanntes „Bioerdgas“ bedeutet, dass die im Gas gespeicherte Energie über das örtliche Erdgasnetz zu externen Verbrauchern transportiert wird, um dort die Energie unter Umständen mit einem besseren Wirkungsgrad zu nutzen. Für die Einspeisung muss das Faulgas allerdings auf Erdgasqualität gereinigt und aufbereitet werden, was zusätzliche Kosten verursacht. Bevor die Aufbereitung durch Erhöhung des Methangehaltes durchgeführt werden kann, sind Maßnahmen zur Entfeuchtung und Entschwefelung notwendig. Der Methananteil wird erhöht, indem CO<sub>2</sub> abgetrennt wird. Mögliche Verfahren hierzu sind in Tabelle 2.3 aufgelistet.

Tabelle 2.3: Verfahrensübersicht der Faulgasaufbereitung (Schürig, 2010)

Verfahren	Methode	Effekt
Druckwechseladsorption	Adsorption	CO <sub>2</sub> wird an Kohlenstoffmolekularsieben adsorbiert
Druckwasserwäsche	Physikalische Absorption	CO <sub>2</sub> wird in Wasser gelöst
Aminwäsche	Chemische Absorption	CO <sub>2</sub> reagiert chemisch mit Aminen in wässriger Lösung

Aufgrund der hohen investiven Kosten ist eine Aufbereitung von Klärgas auf Erdgasqualität erst bei großen Volumenströmen von deutlich über 100 m<sup>3</sup>/h wirtschaftlich (Kolisch, 2011). Erschwerend kommt hinzu, dass mit der Abgabe des aufbereiteten Klärgases die Möglichkeit zur Eigenerzeugung von elektrischer Energie entfällt.

### 3 Stand der Energieausbeute auf Kläranlagen in NRW

Als Grundlage für die Untersuchungen zur Steigerung der Energieausbeute und Verbesserung der Klärgasnutzung auf kommunalen Kläranlagen wird nachfolgend die derzeitige Situation in Nordrhein-Westfalen näher betrachtet.

In Abstimmung mit dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz in Nordrhein-Westfalen (MKULNV-NRW) wurde hierzu eine Datenabfrage mittels Fragebogen durchgeführt. Die erhaltenen Betreiberdaten wurden statistisch ausgewertet. Hierauf aufbauend wurden Kennwerte für den IST-Zustand abgeleitet und die Ausgangssituation in NRW bewertet.

Ergänzend wurden abgeschlossene Energieanalysen aus den Jahren 2007 bis 2011 berücksichtigt, die durch das Land NRW über das *Investitionsprogramm Abwasser* (IPA) gefördert wurden. Die Ergebnisse dieser Studien wurden umfassend ausgewertet, so dass nicht nur der IST-Zustand abgeleitet werden kann, sondern insbesondere vorhandene Optimierungspotentiale aufgezeigt werden können.

#### 3.1 Ausgangssituation

In Nordrhein-Westfalen werden 634 kommunale Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von insgesamt 35,0 Mio. EW betrieben (LANUV-NRW, 2013). In Bild 3.1 ist die Verteilung der Anlagen jeweils nach Verfahrensart der Schlammstabilisierung dargestellt. Es zeigt sich, dass bei 313 Anlagen der anfallende Rohschlamm getrennt anaerob stabilisiert wird, wobei 284 dieser Anlagen über beheizte Faulbehälter verfügen. Da es sich hierbei überwiegend um Anlagen der Größenklassen 4 und 5 handelt, entsprechen diese Anlagen zusammen 31,6 Mio. EW und damit 90 % der gesamten Reinigungskapazität in NRW.

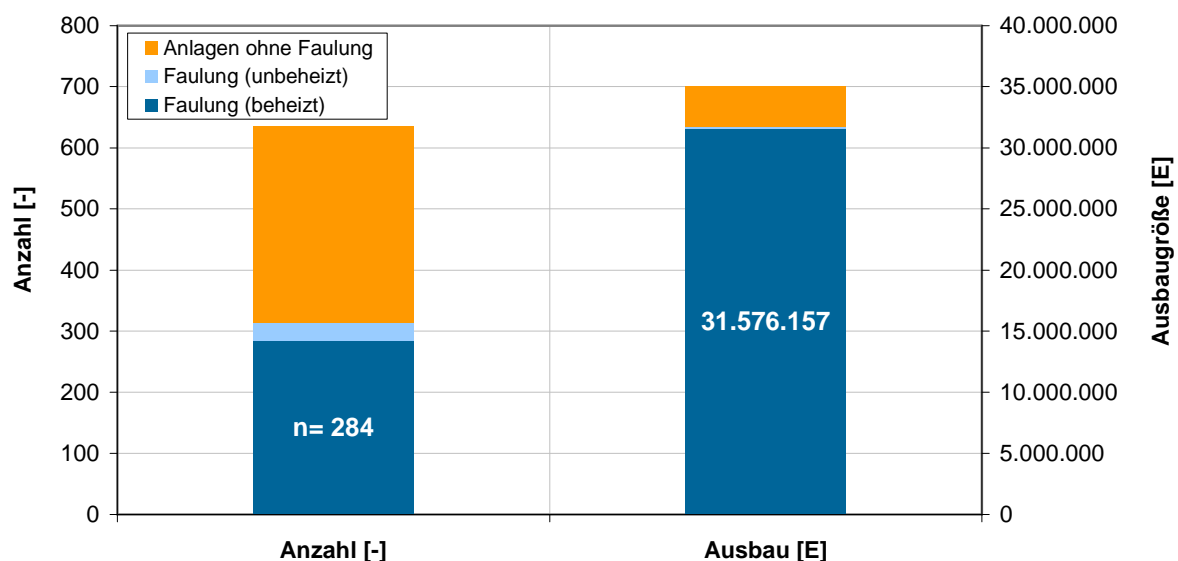


Bild 3.1: Verteilung kommunaler Kläranlagen in NRW nach Ausbaugröße (LANUV, 2013)

## 3.2 Datenabfrage von Faulungsanlagen in NRW

Um den Stand der Energieausbeute und Klärgasnutzung zu ermitteln, wurden im Rahmen dieser Studie die Betreiber der 284 Kläranlagen mit beheizter Faulstufe angeschrieben. Der verwendete Fragebogen findet sich im Anhang dieses Berichtes (siehe Bild 10.1).

### 3.2.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage für die statistischen Auswertungen stehen in Summe **176 verwertbare Datensätze** als Datenrücklauf zur Verfügung (Rücklaufquote 62%). Die hohe Rücklaufquote wurde insbesondere durch die Unterstützung des Projektes über die großen Abwasserverbände in NRW erzielt, die jeweils eine Vielzahl von Anlagen betreiben.

Die örtliche **Verteilung der ausgewerteten Kläranlagen** ist in Bild 3.2 dargestellt. Die Unterschiede der Ausbaugrößen werden durch die Symbolgrößen berücksichtigt. Es zeigt sich eine relativ gleichmäßige Verteilung über NRW mit großen Anlagen in den Ballungsgebieten und kleineren Anlagen im ländlichen Raum. Insgesamt decken die ausgewerteten Kläranlagen mit einer summierten Ausbaugröße von 18,3 Mio. EW etwa 52 % der gesamten Reinigungskapazität aller kommunalen Kläranlagen in NRW ab.

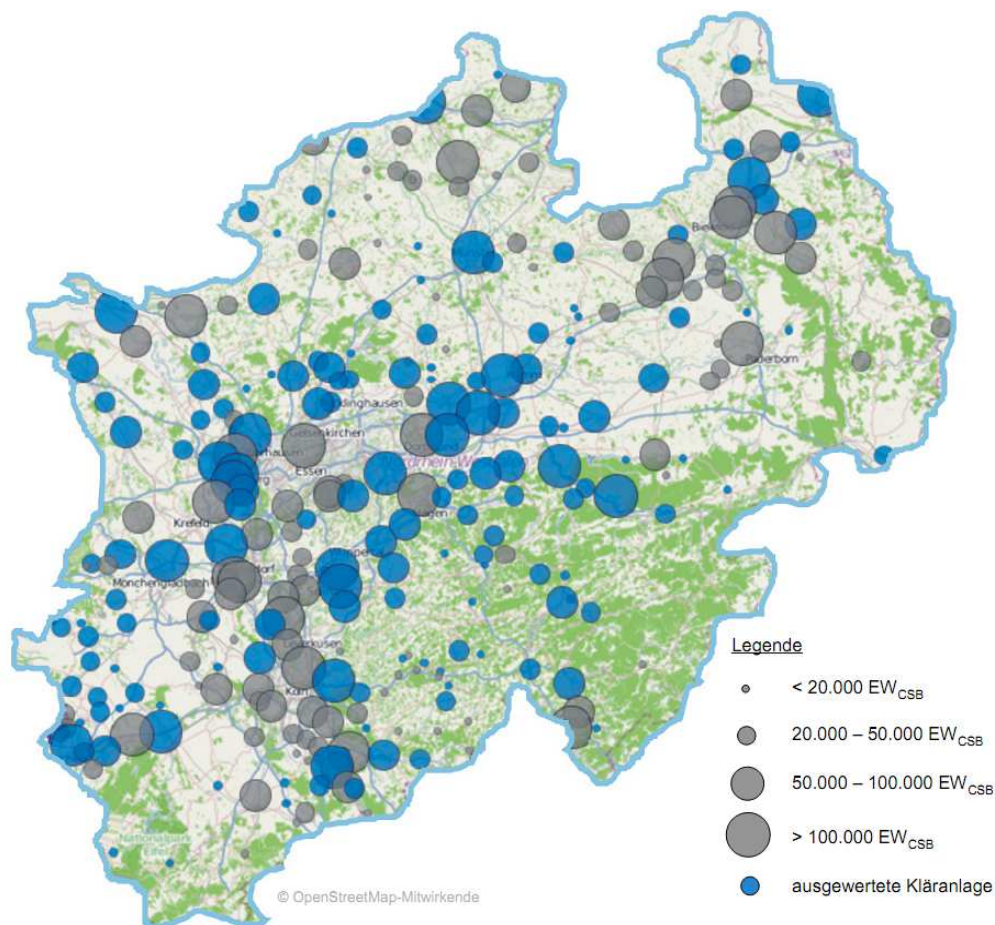


Bild 3.2: Verteilung der Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung in NRW

Die **erhobenen Daten** umfassen folgende Kennwerte:

- grundlegende abwassertechnische Daten ( $Q_d$ ,  $B_{d,CSB}$ ,  $B_{d,Nges}$ ,  $t_{VK}$ ,  $t_{TS}$ )
- Schlammanfall (ÜS, PS, externe Schlämme und Co-Substrate)
- Faulstufe (Volumen, Verfahrensweise, Temperaturbereich)
- Klärgasanfall (Volumen und Methangehalt)
- Klärgasnutzung (Speichervolumen, Art und Leistung der verwendeten Aggregate)
- Strombezug und -eigenerzeugung

Für die Bewertung des Energieverbrauchs, der Schlammproduktion und der Gaserzeugung wird als **maßgebende Kenngröße** die mittlere Belastung zu Grunde gelegt. Diese wird aus den Jahresmittelwerten der Schmutzfrachten im Kläranlagenzulauf berechnet. Die jeweiligen Einwohnerwerte werden hierauf aufbauend mit den spezifischen Werten aus dem DWA-Arbeitsblatt A 131, Tabelle 1 ermittelt. In Anlehnung an das DWA Arbeitsblatt A 216 *Energiecheck und Energieanalyse* (Gelbdruck) wird als Bezugsgröße der Parameter CSB herangezogen und durchgängig zur Berechnung der einwohnerspezifischen Kennwerte verwendet. Es ergibt sich die in Bild 3.3 dargestellte Verteilung der ermittelten Einwohnerwerte.

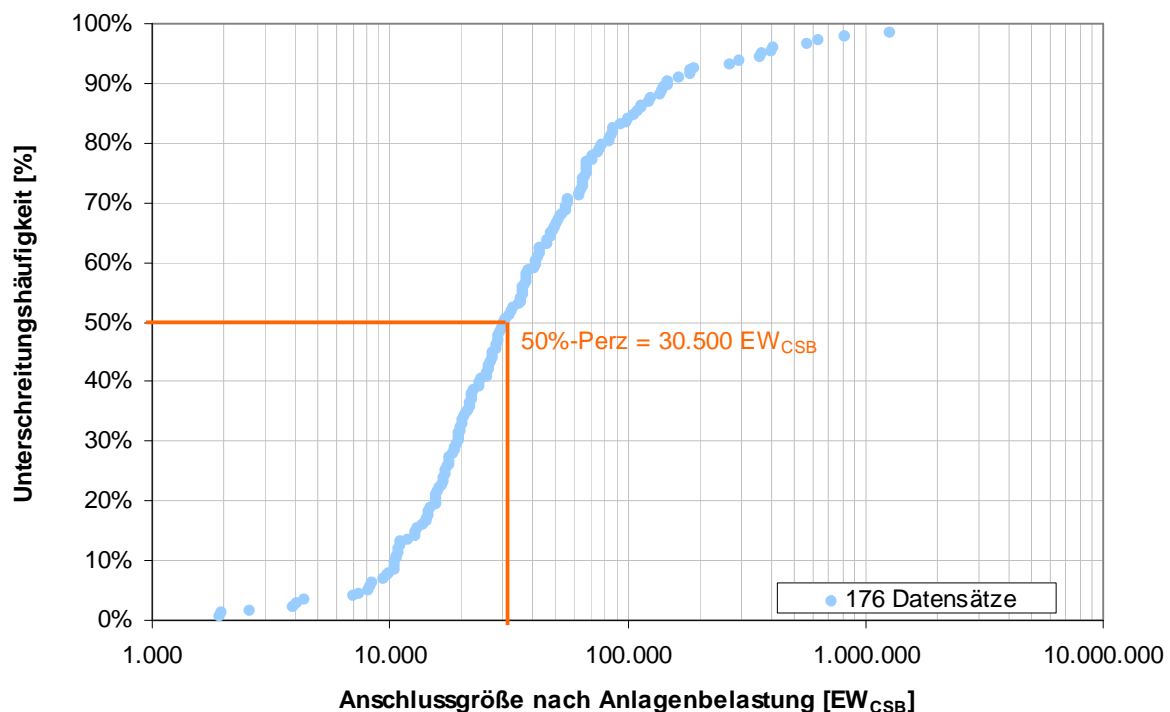


Bild 3.3: Verteilung der Anschlussgrößen, errechnet aus der Belastung im Jahresmittel

Die **Kategorisierung der Kläranlagengrößen** erfolgt nicht nach den Größenklassen gemäß Anhang 1 der Abwasserverordnung, da die Größenklasse 4 mit 125 von 176 Anlagen zu stark dominiert (siehe Bild 3.4). Stattdessen erfolgt eine Aufteilung in EW-Kategorien nach mittlerer Anschlussgröße. Es werden dabei die 4 EW-Kategorien < 20.000 EW, 20.000 – 50.000 EW, 50.000 – 100.000 EW und > 100.000 EW unterschieden. Wie in Bild 3.5 zu erkennen ist, ergibt sich hierdurch eine gleichmäßigere Verteilung im Vergleich zu den Größenklassen gemäß der Abwasserverordnung.

Die untere Grenze von 20.000 EW wurde gewählt, da ab diesem Wert heutzutage eine Wirtschaftlichkeit für die Umrüstung von aeroben Stabilisierungsanlagen zu Faulungsanlagen gegeben ist. Es zeigt sich, dass hiervon abweichend bereits heute in NRW eine Vielzahl kleinerer Anlagen mit einer Schlammfaulung ausgestattet ist (Bild 3.5).

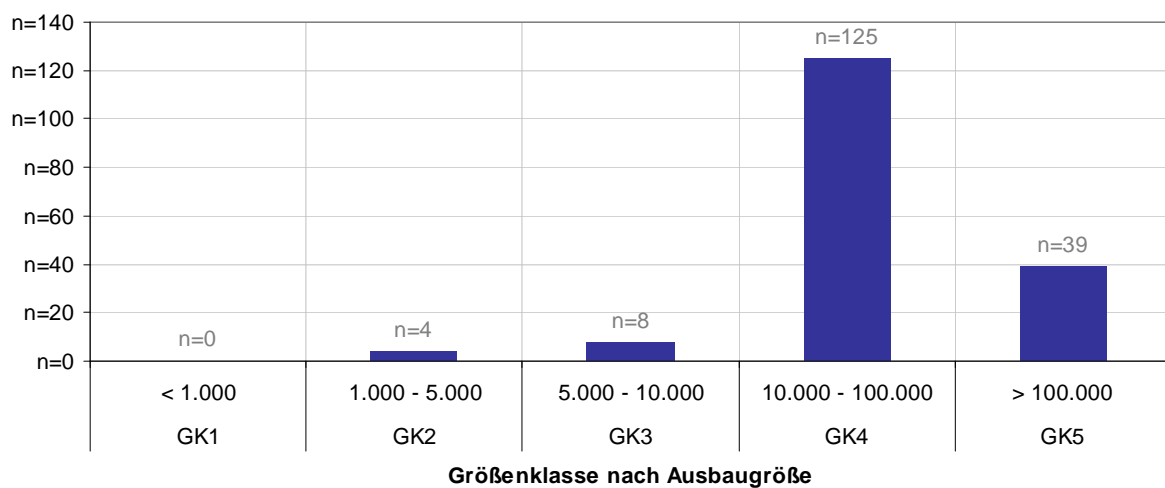


Bild 3.4: Verteilung der ausgewerteten Kläranlagen mit Faulung nach Größenklassen

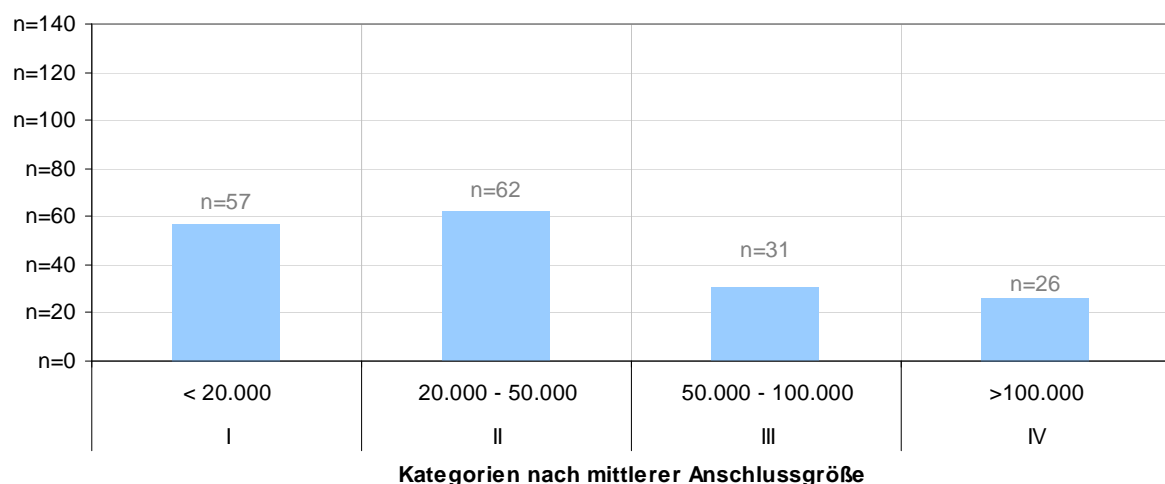


Bild 3.5: Verteilung der ausgewerteten Kläranlagen mit Faulung nach EW-Kategorien

Vor den weitergehenden Berechnungen einzelner Kennwerte wurden die Daten einer Plausibilitätsprüfung unterzogen, bei der auffällige und untypische Daten aussortiert wurden. Da sich die unplausiblen Werte zum Teil nur auf einen Bereich beziehen, wurde nicht der gesamte Datensatz gelöscht. Hierdurch ergeben sich in den folgenden Auswertungen Unterschiede bei der Anzahl der Datenpunkte je nach Bereich.

Die **Auswertung der spezifischen Kennwerte** erfolgt über Häufigkeitsverteilungen, d.h. es werden 25-, 50- und 75-Perzentilwerte gebildet. Zusammen bilden diese Werte den Interquartilsabstand und den zugehörigen Zentralwert (Median). Generell haben Perzentile den Vorteil, dass sie keine Normalverteilung der Datenkollektive voraussetzen. Zudem sind sie nicht so anfällig gegenüber Ausreißern. Aus den Perzentilwerten werden für die Auswertungen Boxplot-Diagramme gebildet, die für die unterschiedlichen Größenkategorien die statistische Verteilung aufzeigen.

### 3.2.2 Schlamm- und Gasanfall

#### Aufenthaltszeit in der Vorklärung

Der Primärschlammanfall hängt von der Aufenthaltszeit in der Vorklärung ( $t_{VK}$ ) und damit vom Wirkungsgrad der dortigen Feststoffabtrennung ab. Die Aufenthaltszeit ist definiert als Durchflusszeit in der Vorklärung während des maximalen täglichen Trockenwetterabflusses ( $Q_T$  bzw.  $Q_{T,2h,max}$ ).

Zur Berechnung des maximalen Abflusses bei Trockenwetter wird der tägliche Trockenwetterzufluss über den Faktor  $X_{Q_{max}}$  [h/d], der in Abhängigkeit der Größe der Kläranlage nach ATV-DVWK A 198 entnommen werden kann, in einen Tagesspitzenabfluss umgerechnet. Da keine separaten Daten zum Fremdwasserzufluss vorliegen, wird bei der hier durchgeführten Berechnung nicht zwischen Schmutz- und Fremdwasserzufluss unterschieden.

Zudem wurde bei der Datenabfrage nicht der Trockenwetterzufluss ( $Q_T$ ), sondern der tägliche Zufluss im Jahresmittel ( $Q_{d,am}$ ) abgefragt. Die Vorklärzeit wird damit auf einen erhöhten Spitzenabfluss im Jahresmittel bezogen, so dass die Berechnung gegenüber dem A 131 reduzierte Verweildauern  $t_{VK}$  ergibt.



$$Q_{T,2h,max} = \frac{24 \cdot Q_{S,aM}}{x_{Q,max}} + Q_{F,aM}$$

$$\Rightarrow Q_{d,2h,max} = \frac{24 \cdot Q_{d,aM}}{x_{Q,max}}$$

mit:	$Q_{T,2h,max}$	=	maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	[l/s]
	$Q_{S,aM}$	=	Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	[l/s]
	$Q_{F,aM}$	=	Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	[l/s]
	$Q_{d,aM}$	=	täglicher Abfluss im Jahresmittel	[l/s]
	$Q_{d,2h,max}$	=	maximaler Abfluss als 2-Stunden-Mittel	[l/s]
	$x_{Q,max}$	=	Divisor gemäß A198 für Stunden-Spitzenwert	[h/d]

Die auf diese Weise berechneten Aufenthaltszeiten werden nach Bild 3.6 in vier verschiedene Kategorien unterteilt. Die Mehrzahl der Kläranlagen arbeitet hiernach mit energetisch günstigen hohen Vorklärauern von über einer Stunde. Bei einem Bezug auf den nicht abgefragten Trockenwetterzulauf würde sich dies noch deutlicher zeigen.

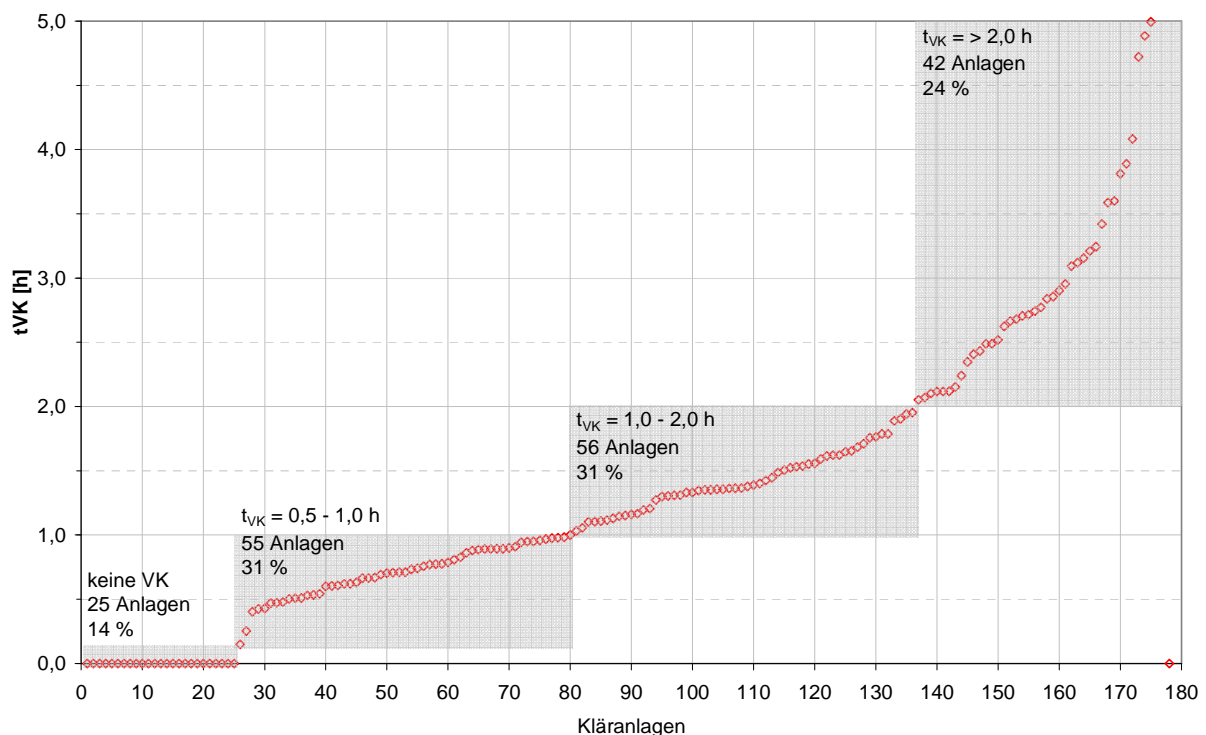


Bild 3.6: Summenlinie der berechneten Aufenthaltszeiten in der Vorklärung bei mittlerem Tageszufluss (nicht auf Trockenwetterzufluss bezogen)

### Einwohnerspezifischer Schlammanfall

Abgefragt wurden die Messdaten im Zulauf zur Faulstufe nach der Voreindickung sowie im Ablauf der Faulstufe. Die mittlere spezifische TR-Fracht aus dem Überschussschlamm beträgt 42,9 g/(EW\*d) und die mittlere TR-Fracht aus dem Primärschlamm 50,2 g/(EW\*d). Da nicht alle Anlagen Primär- und Überschussschlamm getrennt erfassen und mehr Daten zum Rohschlamm vorliegen, entspricht die mittlere Rohschlammfracht mit 84 g/(EW\*d) nicht der Summe von den vorliegenden Daten für PS und ÜS. Unter Berücksichtigung der überwiegend hohen Vorklär dauern wird der Primärschlammfall nach Tabelle 1 des A 131 von 45 g/(E\*d) für Durchflusszeiten von 1,5 bis 2,0 h aber ebenso bestätigt wie der Rohschlammfall gemäß der Imhoff-Liste in Höhe von 80 g TS/(E\*d).

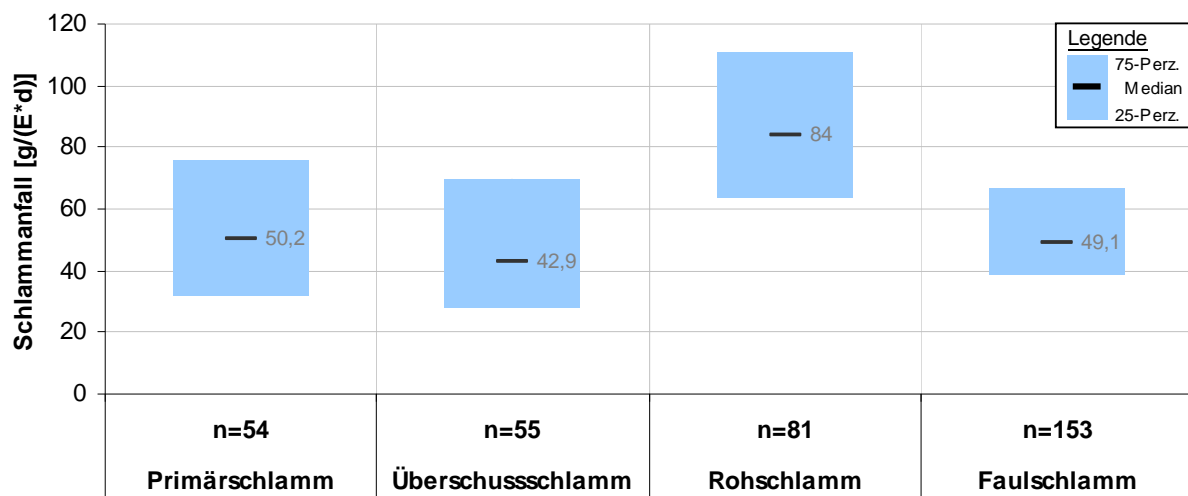


Bild 3.7: Spezifischer Schlammanfall je nach Schlammart

### Rohschlammfall nach Anlagengröße

Die meisten Daten (153) liegen für den Faulschlamm vor und die Schwankungsbreite ist am geringsten. Für diesen Schlammstrom wurden auch die meisten Angaben zum Glühverlust gemacht, so dass als Datengrundlage für die Kennwertermittlung der Faulstufe die Faulschlammmenge als maßgebend angesetzt wird.

Da anorganische Anteile der Trockensubstanz nicht abgebaut werden, kann unter Verwendung des als Glühverlust (GV) gemessenen Organikanteils des Roh- und Faulschlammes der Abbau berechnet werden. Als Summe von abgebauter Trockensubstanz und Trockensubstanz im Faulschlamm ergibt sich die der Faulstufe zugeführte Fracht inklusive Anteilen aus externen Schlämmen und Co-Substraten. Es ergeben sich je nach Anschlussgröße im Mittel TR-Frachten von 65 bis 83 g/(EW\*d) (siehe Bild 3.8). Die ermittelten Werte decken sich mit den in der „allgemeinen Schlammliste“ nach Imhoff und Möller angegebenen einwohnerspezifischen Werten.

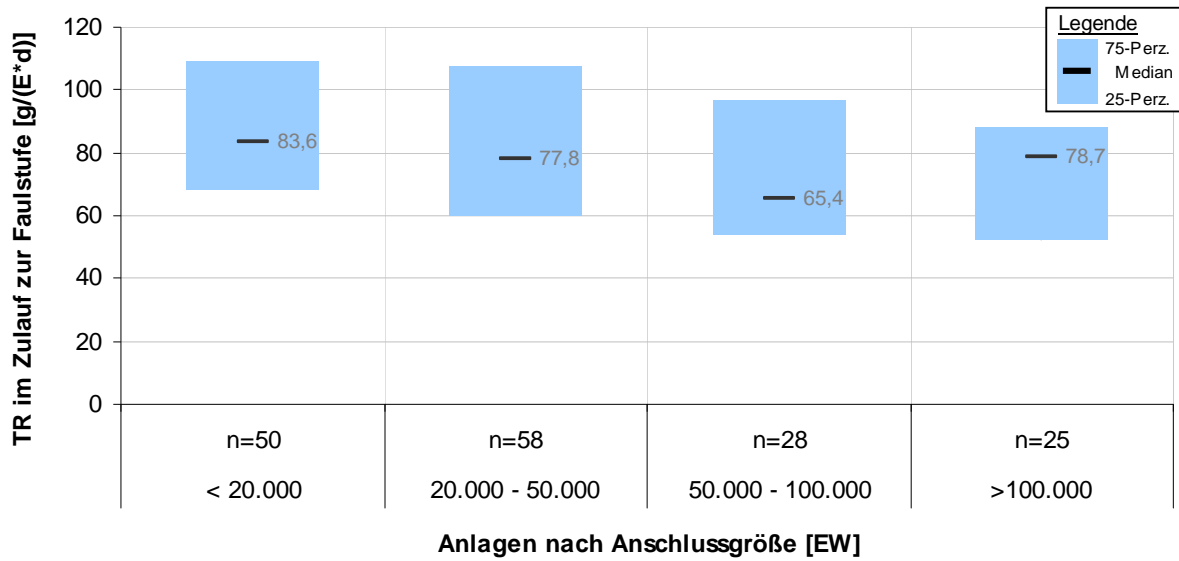


Bild 3.8: Schlammmanfall im Zulauf zur Faulung je nach Anschlussgröße der Anlage

### Primärschlammmanfall in Abhängigkeit der Vorklärdauer

Der Primärschlammmanfall hängt im Wesentlichen von der Aufenthaltszeit in der Vorklärung ab. Bei Auswertung des Schlammmanfalls unter Verwendung der zuvor erläuterten  $t_{VK}$ -Kategorien ist zu erkennen, dass der Primärschlammmanfall mit zunehmender Aufenthaltszeit deutlich gesteigert werden kann, wobei die erhobenen Daten stark variieren.

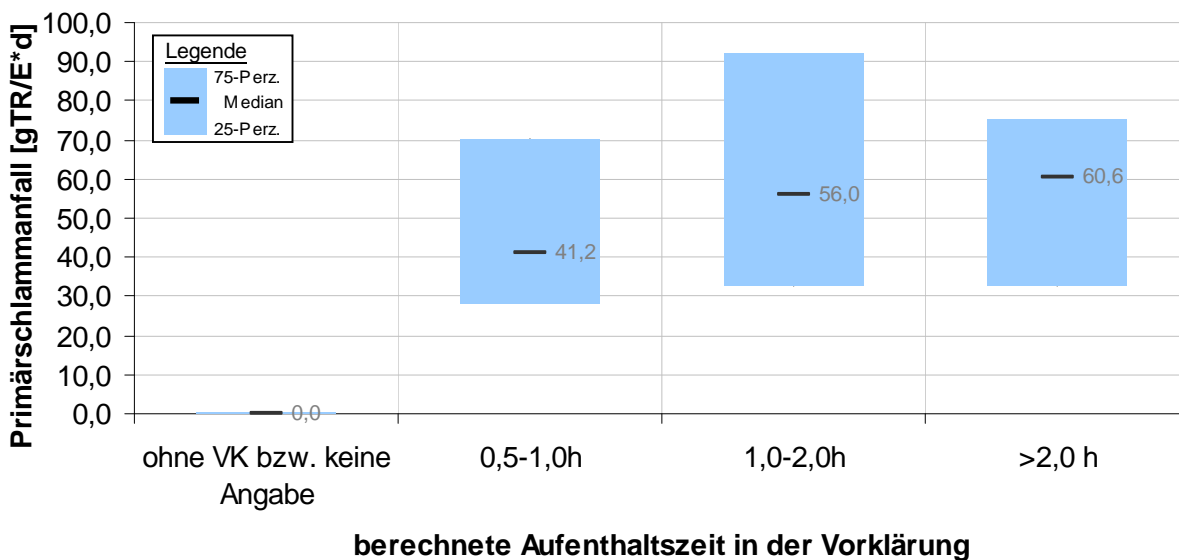


Bild 3.9: Spezifischer Primärschlammmanfall in Abhängigkeit von der berechneten Aufenthaltszeit in der Vorklärung

### Feststoffgehalt

Der abgezogene Primärschlamm weist im Mittel eine vergleichsweise niedrige TR-Konzentration von 3,8 % TR bei niedriger Streubreite auf, die auf die ähnliche Zusammensetzung und die in der Regel nur statische Eindickung zurückgeführt werden kann. Demgegenüber zeigt der Überschussschlamm, der insbesondere auf größeren Kläranlagen der GK 4 und 5 maschinell unter Polymereinsatz eingedickt wird, einen höheren Eindickgrad bei deutlich vergrößerter Streubreite auf.

Der Rohschlamm im Zulauf der Faulung liegt insgesamt mit im Mittel nur 4 % TR relativ niedrig. Durch eine verbesserte Eindickung könnte die Faulzeit verlängert, der Wärmebedarf der Faulstufe sowie die Laufzeiten der Schlammwässerung deutlich verringert werden. Der ausgefaulte Schlamm bestätigt mit einem niedrigen mittleren TR-Gehalt von nur 2,5 % dieses Bild.

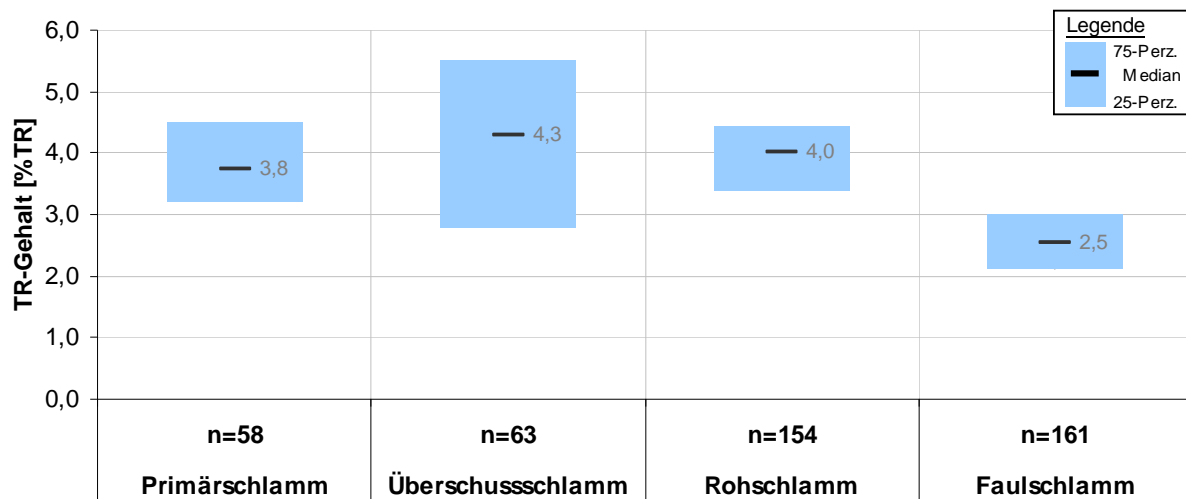


Bild 3.10: Gemessener Feststoffgehalt (%TR) der Schlammfraktionen

### Organikanteil und Abbaugrad

Die Primärschlämme weisen einen Glühverlust von rund 75 % und die Überschussschlämme einen organischen Anteil von rund 70 % des TR auf (Bild 3.11). Hierbei ist die unterschiedliche Zusammensetzung der beiden Schlämme zu beachten: während die Kohlenstoffverbindungen des Zulaufs überwiegend direkt für die Gasproduktion zur Verfügung stehen, erfordern die Zellstrukturen der gebildeten Biomasse einen vorherigen Aufschluss.

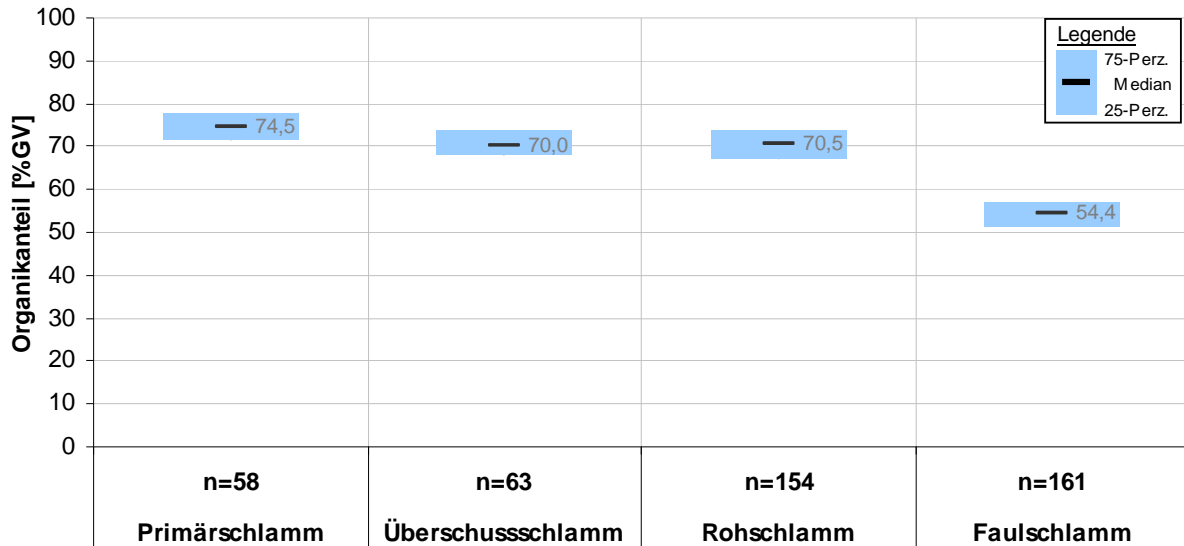


Bild 3.11: Gemessener Organikanteil der Schlammfraktionen

Mit einem oTR-Gehalt des Faulschlammes von rund 55 % und einem Abbaugrad der organischen Substanz von rund 50 % in allen EW-Kategorien sind die Faulschlämme als stabilisiert einzustufen (Bild 3.12). Insbesondere die kleinen Faulungsanlagen zeigen einen erhöhten oTR-Abbau, der möglicherweise auf einen erhöhten Primärschlammanteil und hohe Faulzeiten (vgl. Kap. 3.3.3) zurückzuführen ist.

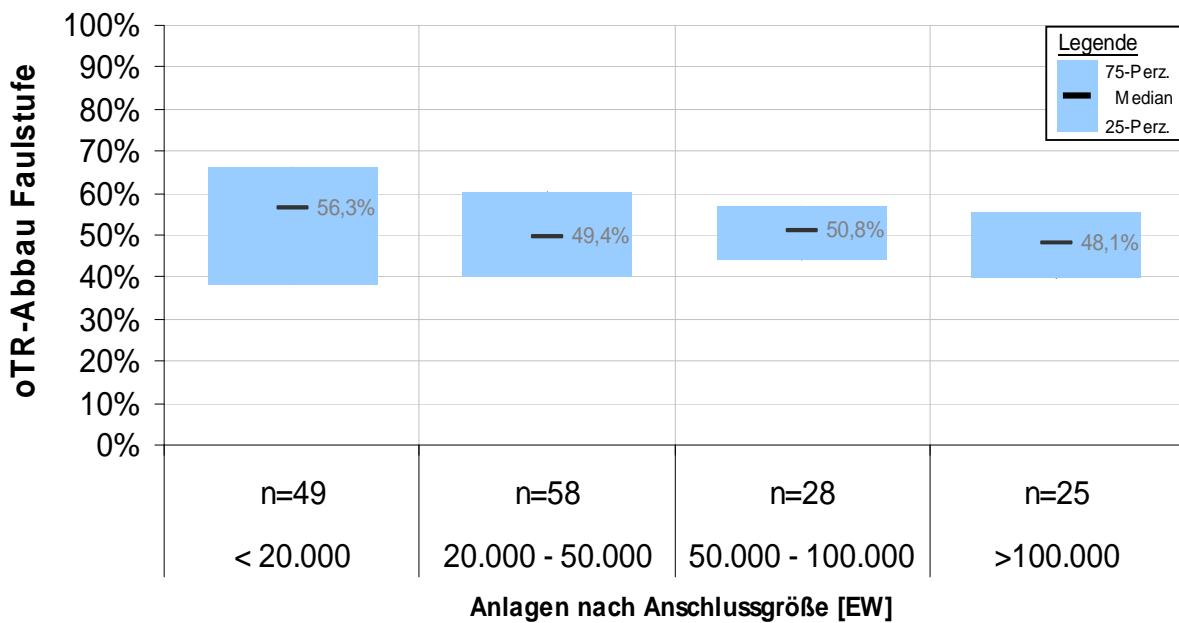


Bild 3.12: Prozentualer oTR-Abbaugrad in der Faulstufe

### Vorhandenes Faulvolumen

Das vorhandene Faulraumvolumen der abgefragten Kläranlagen beträgt im Mittel 47,0 l/EW. Je nach Kläranlagengröße variieren die Volumina jedoch zwischen 30 und 60 l/EW (siehe Bild 3.13). Für die Auslegung wird üblicherweise ein Wert von 30 l/EW gewählt (vgl. Imhoff, 1993), der auf den größeren Kläranlagen als Medianwert auch nahezu eingehalten wird. Dieser Wert entspricht bei einem spezifischen Rohschlammanfall von 80 g/(EW\*d) und einem TR-Gehalt von 5 % einer Faulzeit von 19 Tagen.

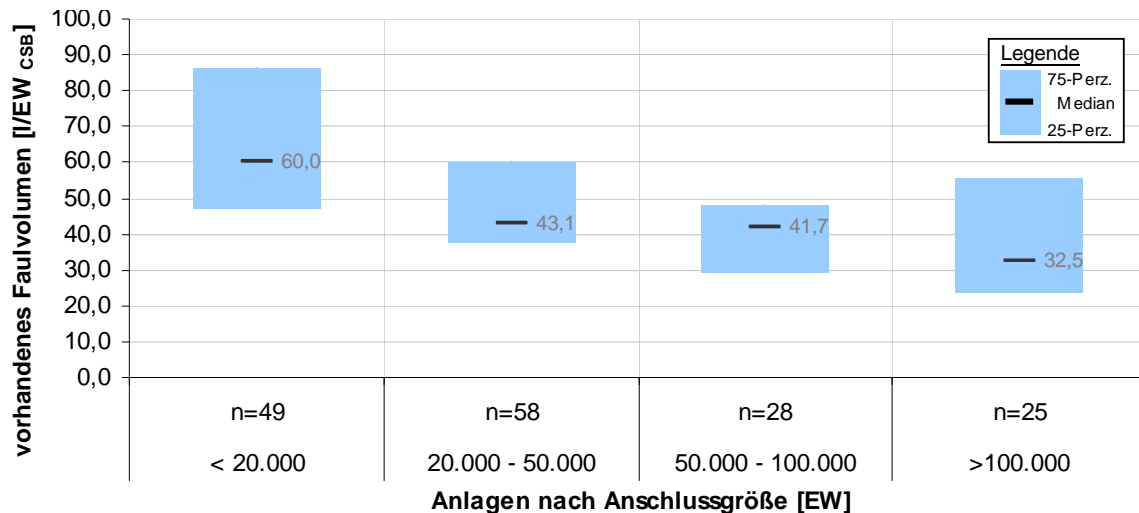


Bild 3.13: Vorhandenes Faulvolumen in Abhängigkeit der Anschlussgröße

### Mittlere Faulzeit

Im Vergleich zu üblichen Auslegungswerten ergeben sich aus den vorhandenen Volumina besonders bei kleineren Anlagen sehr hohe Aufenthaltszeiten von 30 bis 60 Tagen. Im Gegensatz dazu betragen die Faulzeiten bei den größeren Kläranlagen im Mittel 27 Tage. Damit sind die Faulzeiten trotz der in der Umfrage festgestellten niedrigen TR-Gehalte des Rohschlammes (vgl. Kapitel auf Grund der großen spez. Faulraumvolumina relativ lang.

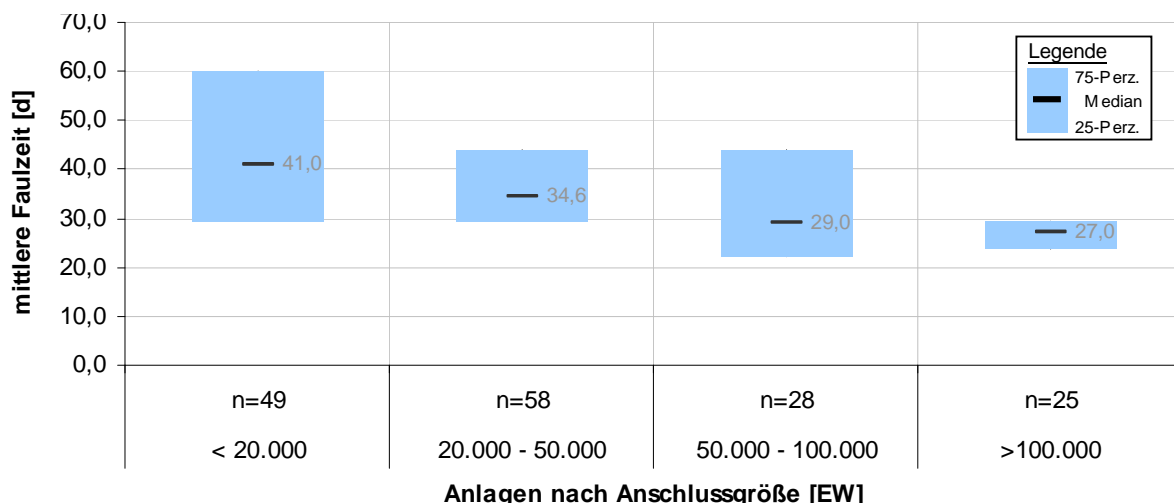


Bild 3.14: mittlere Faulzeit in Abhängigkeit der Anschlussgröße

### Mittlere Raumbelastung

Analog zu den vergleichsweise hohen Faulzeiten ergeben sich niedrige Raumbelastungen (Bild 3.15). Im Mittel beträgt die Raumbelastung für alle ausgewerteten Anlagen 0,8 kg oTR/(m<sup>3</sup>\*d). Sie liegt damit deutlich unter dem Vergleichswert nach Imhoff und deutet auf ein hohes Reservepotenzial bei nahezu allen Faulungsanlagen hin.

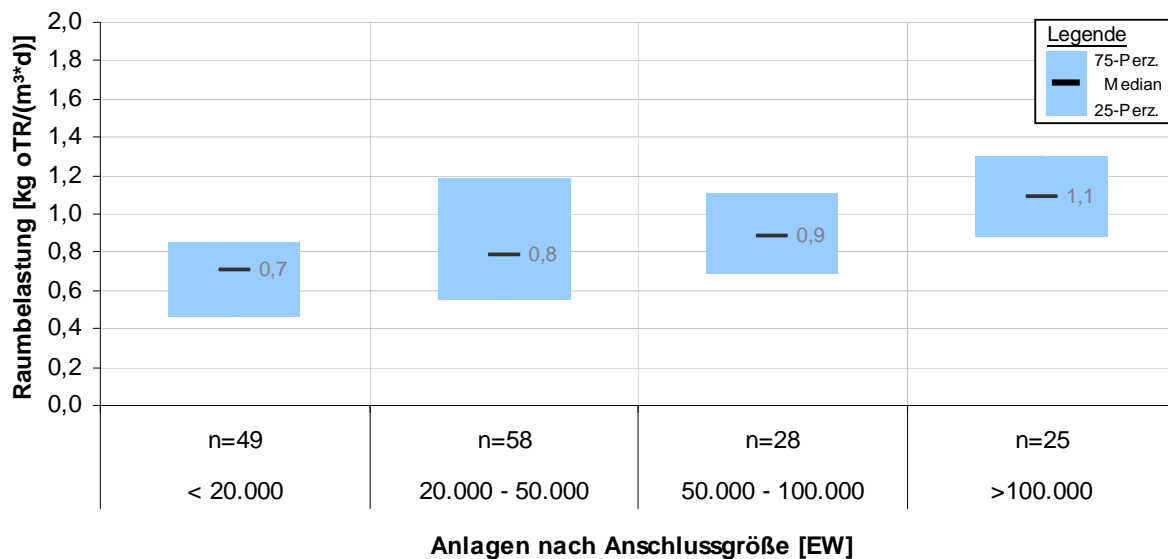


Bild 3.15: Mittlere Raumbelastung der Faulstufe in Abhängigkeit der Anschlussgröße

### Vergleich mit Literaturwerten

Das Handbuch „Co-Fermentation für den Einsatz auf kommunalen Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen“ (MUNLV, 2001) gibt für Faulstufen verschiedene Richtwerte an (siehe Tabelle 3.1). Anhand dieser Kenngrößen können die verfügbaren Reservekapazitäten abgeschätzt werden. Beim Vergleich der Daten aus Tabelle 3.1 mit den in Bild 3.14 und Bild 3.15 dargestellten Belastungswerten zeigt sich, dass die Faulstufen aller Kategorien noch freie Kapazitäten aufweisen.

Tabelle 3.1: Kennwerte bei Einsatz einer Co-Fermentation (MUNLV, 2001)

Parameter	Einheit	Anlagengröße		
		< 50.000 EW	50.000 – 100.000 EW	> 100.000 EW
Faulzeit, $t_F$	[d]	20 – 30	15 – 20	15 – 18
Organische Raumbelastung, $B_R$	[kg oTR/m <sup>3</sup> /d]	1,5	3,0	4,5
Organische Säuren, $Hac_{aq}$	[mg/l]	< 300 im täglichen Betrieb		

### Einwohnerspezifische Faulgasproduktion

Im Mittel liegt die Faulgasausbeute, bezogen auf die Anschlussgröße, gemäß Datenabfrage bei  $24,9 \text{ l}_N/(\text{EW} \cdot \text{d})$ . Da einige der Kläranlagen externe Schlämme und Co-Substrate annehmen, ist bei diesem Kennwert der dadurch zusätzlich erzielte Gasertrag enthalten.

Um diesen Einfluss zu bereinigen, wird über die zugeführten externen Schlämme und Co-Substrate eine zusätzliche EW-Belastung der Schlammstufe ( $\text{EW}_{\text{extern}}$ ) berechnet, die dann der Anschlussgröße der Kläranlage hinzuaddiert wird. Zur Berechnung von  $\text{EW}_{\text{extern}}$  werden sowohl die externen Schlämme als auch die Co-Substrate mit einem spezifischen Schlammanfall von  $80 \text{ g}/(\text{EW} \cdot \text{d})$  umgerechnet. Eine spezifische Zusammensetzung einzelner Co-Substrate wurde nicht abgefragt und konnte daher nicht weiter berücksichtigt werden. Die mittlere einwohnerspezifische Faulgasproduktion verringert sich durch die Bereinigung auf  $23,9 \text{ l}_N/(\text{EW} \cdot \text{d})$ .

Die in Bild 3.16 dargestellte Auswertung der spezifischen Gaserträge in Abhängigkeit der Anschlussgröße ergibt eine Verteilung im Bereich von  $20 - 30 \text{ l}_N/(\text{EW} \cdot \text{d})$ . Der Medianwert liegt bei Anlagen mit Anschlussgrößen von  $50.000$  bis  $100.000 \text{ EW}$  mit  $22 \text{ l}_N/(\text{EW} \cdot \text{d})$  etwa  $10 \%$  unter der Ausbeute der übrigen Anlagen mit Werten von rund  $24 \text{ l}_N/(\text{EW} \cdot \text{d})$ .

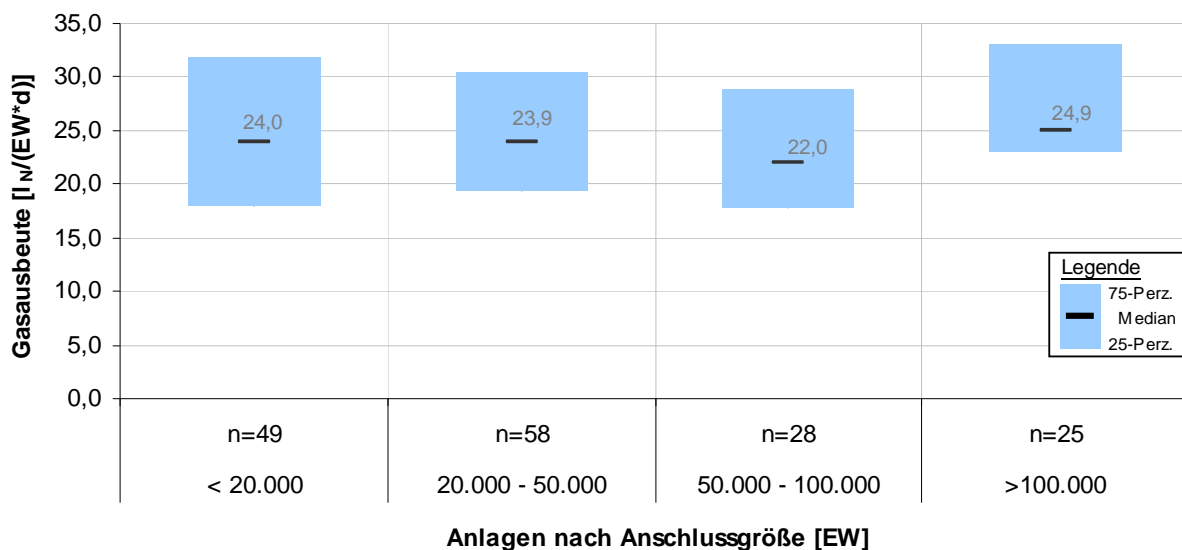


Bild 3.16: spezifischer Faulgasanfall (bezogen auf  $\text{EW}_{\text{CSB}}$  inkl.  $\text{EW}_{\text{extern}}$ )



### Spezifische Faulgasproduktion bezogen auf die organische Schlammmasse

Bezogen auf die organische Feststofffracht im Zulauf der Faulstufe ( $\text{oTR}_{\text{zu}}$ ) liegt die mittlere Ausbeute aller untersuchten Anlagen bei  $478 \text{ l}_\text{N}/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$ . Dieser spezifische Gasertrag beinhaltet allerdings ebenfalls den Abbau der externen Schlämme und der sehr gut abbaubaren Co-Substrate. Da eine Bereinigung in diesem Fall, zumindest ohne Kenntnis der Substratarten, nicht ohne Weiteres möglich ist, werden zur weiteren Auswertung nur Anlagen ohne Co-Vergärung oder externer Schlammannahme berücksichtigt. Hierdurch verringert sich der mittlere Gasertrag auf  $466 \text{ l}_\text{N}/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$ .

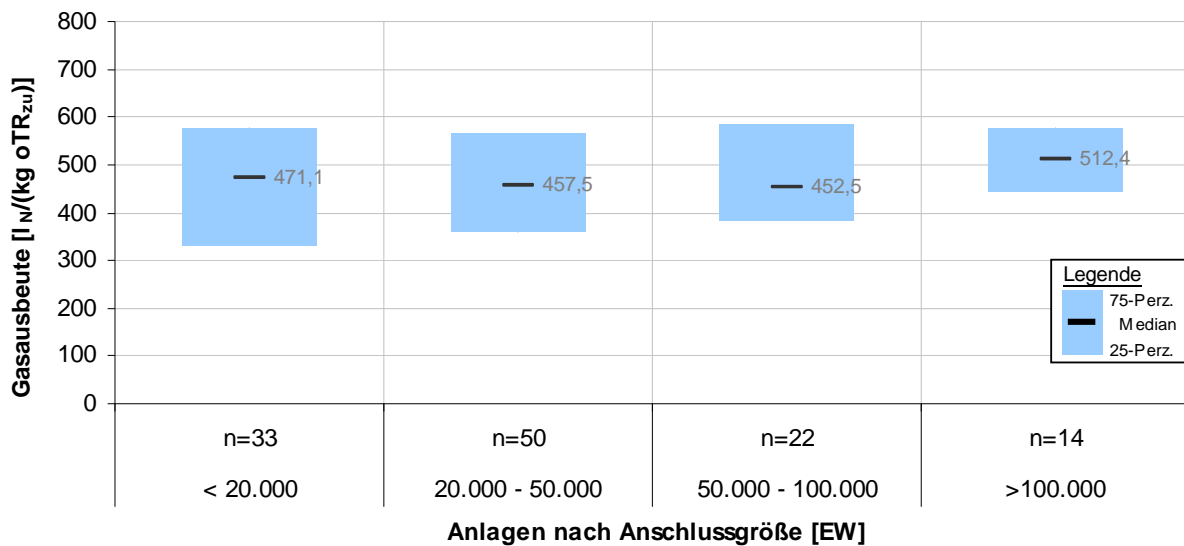


Bild 3.17: Spez. Faulgasanfall, bezogen auf zugeführte  $\text{oTR}$ -Fracht in Abhängigkeit der Anschlussgröße, ohne Anlagen mit Co-Vergärung oder externen Schlämmen

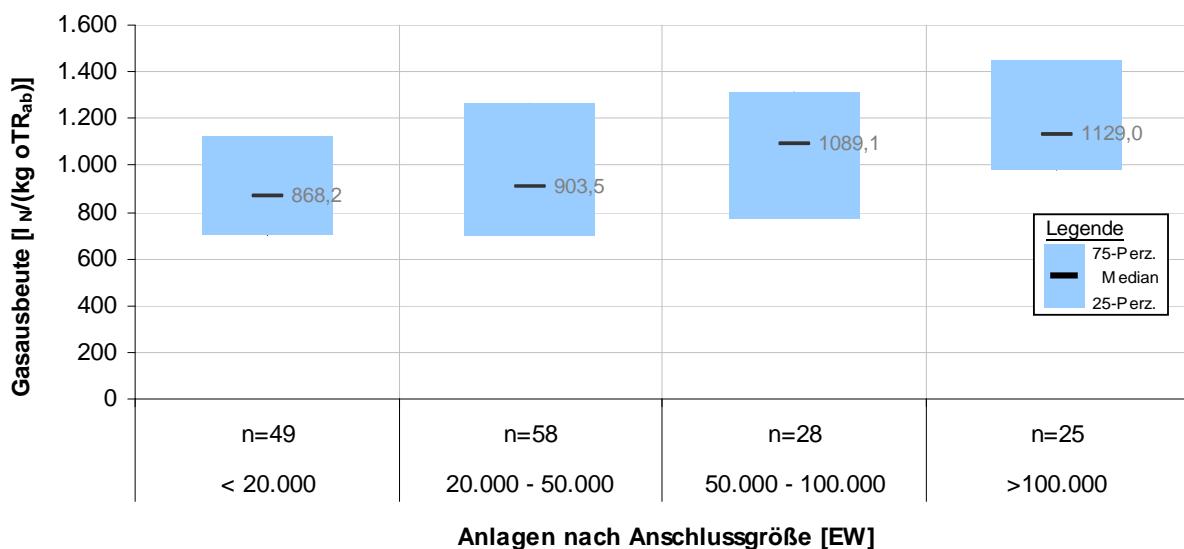


Bild 3.18: Spez. Faulgasanfall, bezogen auf abgebaute  $\text{oTR}$ -Fracht in Abhängigkeit der Anschlussgröße, ohne Anlagen mit Co-Vergärung oder externen Schlämmen

Insbesondere bezogen auf die abgebaute Organik fällt ein Anstieg der spezifischen Gasausbeuten parallel zu den Ausbaugrößen auf. Mögliche Erklärungen hierfür bestehen in erhöhten Ungenauigkeiten der Gasmengenmessung bei kleinen Volumenströmen und erhöhten Schlammaltern bei kleineren Kläranlagen mit einem hohen Stabilisierungsgrad des abgezogenen Überschussschlammes. Auch ist zu beachten, dass ein Teil der kleineren Anlagen ganz ohne Vorklärung betrieben wird, was den Vergleich statistischer Kennwerte erschwert.

### oTR-spezifische Gasausbeute in Abhängigkeit der Vorklärzeit

Der Gasertrag in Abhängigkeit der Vorklärdauer bestätigt den hohen Einfluss eines Primärschlammabzugs. Trotz der Streubreite der Zahlenwerte ist der positive Einfluss einer erhöhten Verweildauer in der Vorklärung zu erkennen, dem jedoch der Kohlenstoffbedarf der biologischen Stufe für die Denitrifikation gegenübersteht. In Tabelle 3.2 sind die ermittelten Gasertragswerte den Werten gemäß Energiehandbuch NRW (MURL, 1999) gegenübergestellt. Im Vergleich zu den Literaturwerten erscheinen die ermittelten Gaserträge plausibel. Auch der Einfluss der Vorklärzeit wird bestätigt.

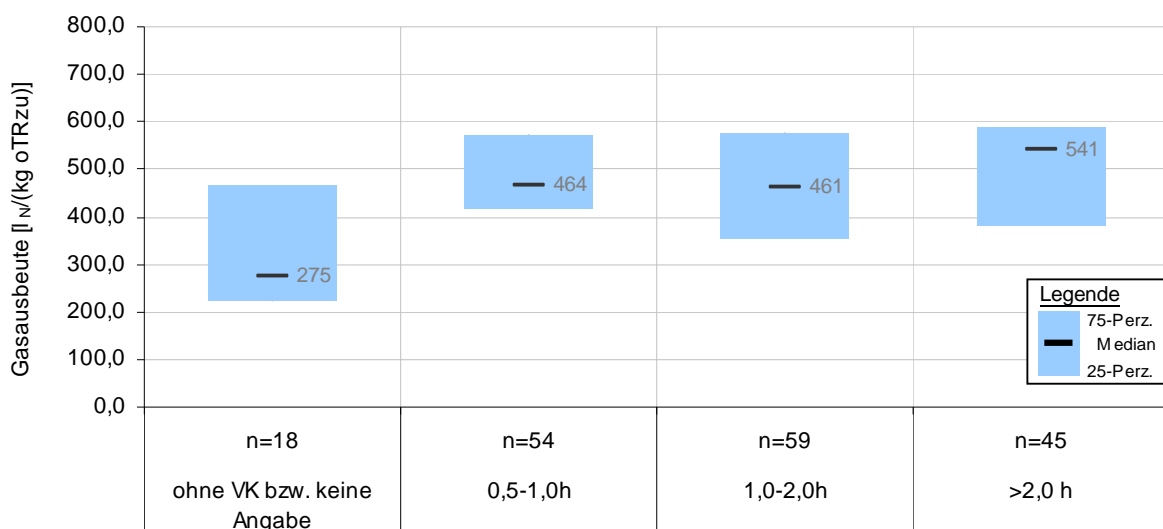


Bild 3.19: Statistische Auswertung des Gasertrages in Abhängigkeit der Vorklärzeit

Tabelle 3.2: Gasertrag in Abhängigkeit der Vorklärzeit im Vergleich zu Literaturwerten

	Gemäß Datenerhebung		Literaturwert (MUNLV, 1999)	
	$l_N/(EW*d)$	$l_N/kg \text{ oTR}_{zu}$	$l_N/(EW*d)$	$l_N/kg \text{ oTR}_{zu}$
ohne VK	16,5	361	13-15	295-340
0,5 h	22,5	464	19-22	380-440
1,0 h	24,9	475	22-25	400-465
2,0 h	25,0	529	25-29	425-470

### oTR-spezifische Gasausbeute in Abhängigkeit der Faulzeit

Die nachfolgende Abbildung zeigt die erreichten oTR-spezifischen Gasausbeuten als Funktion der hydraulischen Verweilzeit im Faulbehälter. Die Vielzahl der Randeinflüsse, wie z.B. Schlammzusammensetzung, Eindickgrad, Faulraumbeschickung und –temperatur, spiegeln sich in der Streubreite der Einzelwerte wider.

Grundsätzlich sollte die Entwicklung der Gasausbeute dem Verlauf der Gasproduktion in einem Batchversuch folgen, d.h. mit steigender Versuchsdauer strebt die Gasmenge asymptotisch gegen einen technisch erreichbaren Maximalwert. Die in das Diagramm eingezeichneten zwei Kurvenverläufe nehmen diesen Zusammenhang auf Basis eines Modellansatzes nach Rückauf et al. (1988) für eine maximale Ausbeute von 450 bzw. 550 l<sub>N</sub>/kg oTR<sub>zu</sub> auf. Das Optimierungspotenzial für die Einzelanlagen gegenüber diesen Idealkurven wie auch die Steigerung der Ausbeute durch eine Verlängerung der Faulzeit (=Verbesserung der Voreindickung bei konstantem Faulraumvolumen) beträgt in vielen Fällen 20 bis 50 %.

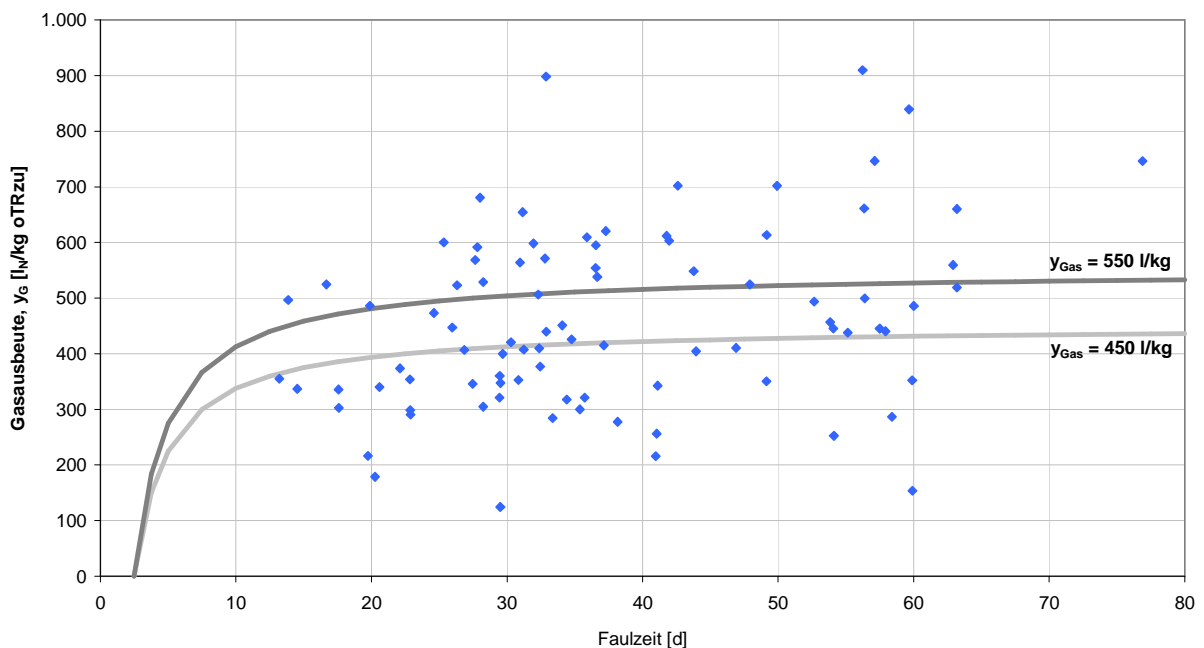


Bild 3.20: oTR-spezifische Gasausbeute in Abhängigkeit der Faulzeit

### 3.2.3 Faulgasnutzung

#### Gasspeicherung

Die mögliche Speicherzeit des anfallenden Gases lässt sich über das vorhandene Speichervolumen und den mittleren täglichen Gasanfall berechnen. Es ergibt sich im Mittel eine Speicherdauer von 6,7 bis 12,8 Stunden, je nach Anschlussgröße. Für alle Anlagengrößen variieren die Werte sehr stark (siehe Bild 3.21), eine untere Speichergröße von etwa einem viertel Tag wird jedoch von fast allen Faulungsanlagen erreicht bzw. deutlich überschritten.

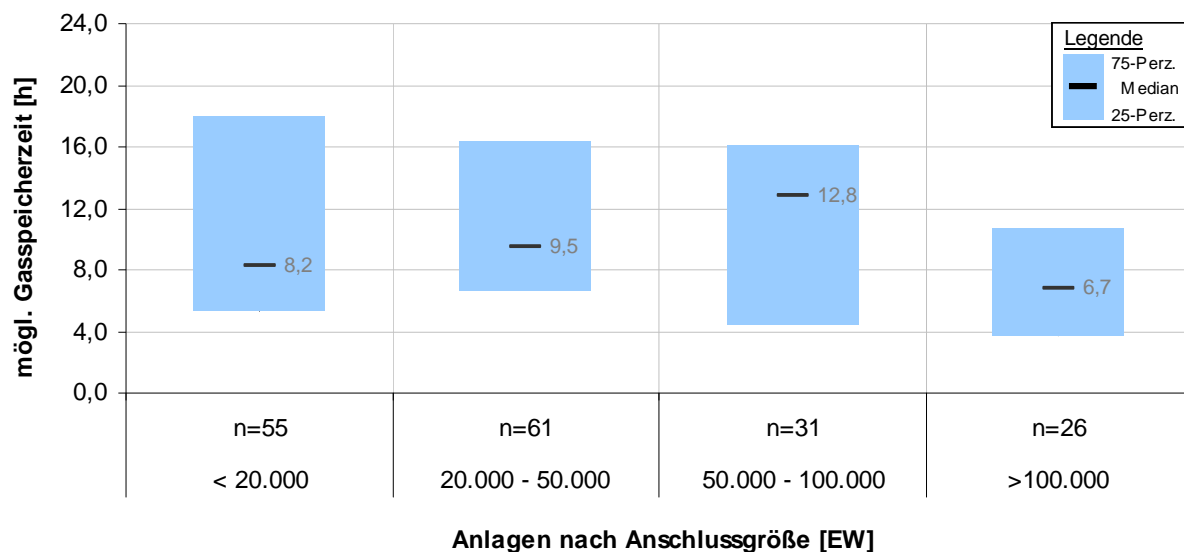


Bild 3.21: Verteilung der errechneten Gasspeicherzeiten

#### Aufteilung der Gasnutzung

Die Verteilung der Gasnutzung je nach Anschlussgröße ist in Bild 3.22 dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Anlagengröße der Anteil des zur Stromerzeugung verwendeten Faulgases ansteigt und somit bei den größeren Anlagen von einer kompletten Verstromung des Faulgases auszugehen ist.

Hinsichtlich der Faulgasnutzung wird bei den großen Kläranlagen nahezu das gesamte Faulgas den KWK-Anlagen zugeführt. Mit sinkender Ausbaugröße steigt sowohl der Anteil des Gaseinsatzes in der Kesselanlage als auch der der Fackelverluste an. Als Ursachen sind das spezifisch größere Faulbehältervolumen, eine zu geringe Voreindickung und die fehlende Redundanz bei den KWK-Anlagen zu benennen.

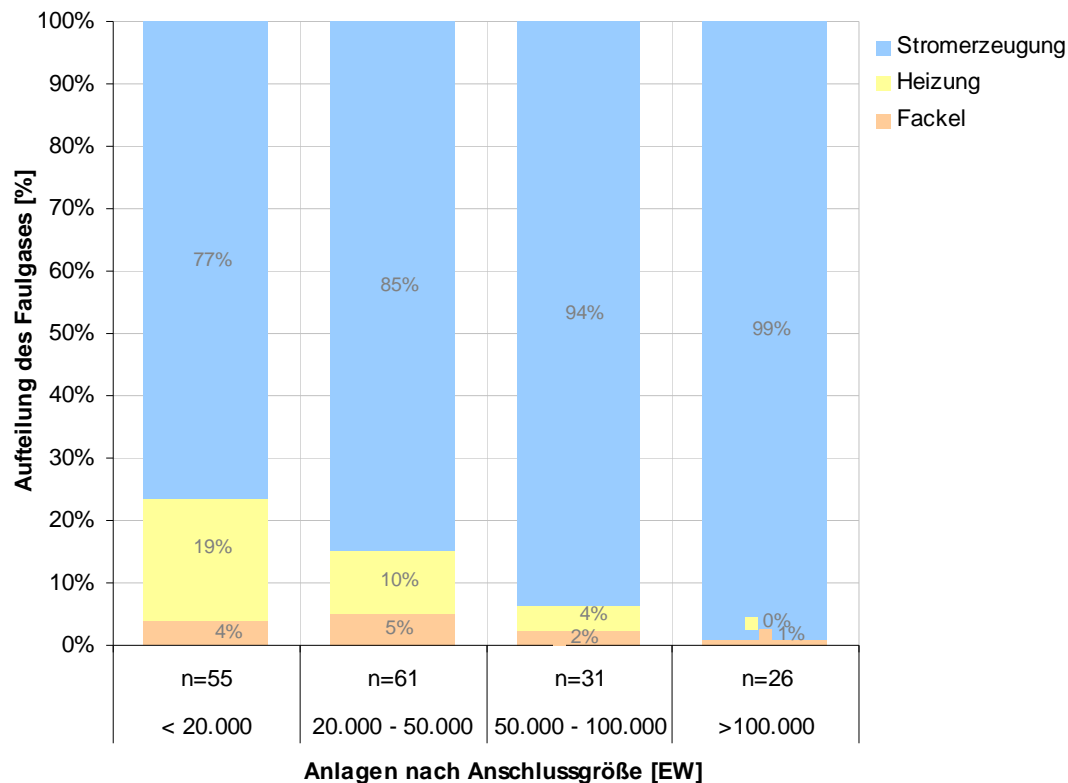


Bild 3.22: Verteilung des Faulgaseinsatzes je nach Anschlussgröße

Die Art der Verstromung geht aus Tabelle 3.3 hervor. Mikrogasturbinen stellen nach dieser Auswertung trotz des einfachen und wartungsarmen Betriebs keine Alternative zu Blockheizkraftwerken dar. Die Gründe liegen in dem höheren elektrischen Wirkungsgrad dieser Aggregate, der bei der Betrachtung von Lebenszykluskosten in der Regel zu einer höheren Wirtschaftlichkeit führt. Auffällig ist der hohe Anteil von Kläranlagen ohne Kraft-Wärme-Kopplung, auf denen damit zumindest im Sommerhalbjahr von einem erheblichen Wärmeüberhang auszugehen ist. Das Vernachlässigen einer Eigenstromproduktion ist auf diesen Kläranlagen weiterhin mit erhöhten Strombezugskosten verbunden.

Tabelle 3.3: Kläranlagen mit Aggregaten zur Verstromung des Faulgases

	Anzahl der Kläranlagen	Anteil
BHKW	130	72,2%
Mikrogasturbine	4	2,2%
Stadtwerke	4	2,2%
BHKW in Bau	2	1,1%
Keine Angabe oder kein Aggregat	38	21,1%

### Wirkungsgrad der Verstromung

Aus den angegebenen Faulgasmengen, Methangehalten und produzierten Strommengen lässt sich der erreichte Wirkungsgrad berechnen. Es ergibt sich im Mittel ein Wirkungsgrad von 28%. Von den Betreibern wurde demgegenüber ein mittlerer Nennwirkungsgrad der eingesetzten Aggregate zur Verstromung des Faulgases mit rund 33 % angegeben. Der Unterschied ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der berechnete Wert den mittleren Wirkungsgrad unter Berücksichtigung von Teillastzeiten darstellt, der damit niedriger als der Nennwirkungsgrad der Aggregate liegt.

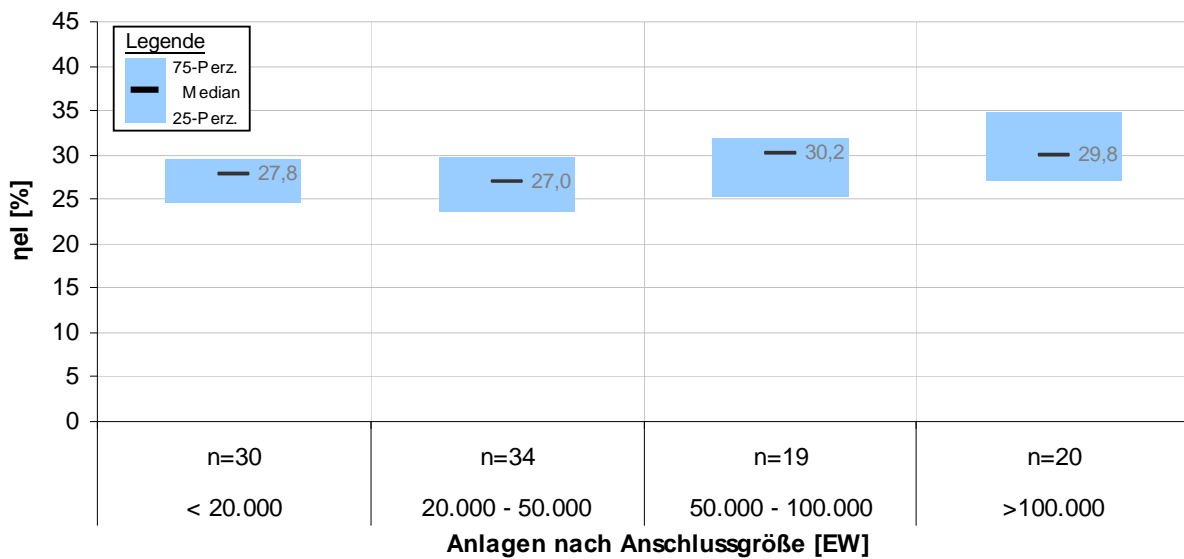


Bild 3.23: Errechneter Wirkungsgrad der Verstromung in Abhängigkeit der Anlagengröße

### 3.2.4 Energetische Kennwerte

#### Gesamtstromverbrauch pro Anlage

Die 176 ausgewerteten Kläranlagen weisen in Summe einen jährlichen Stromverbrauch von 468 Mio. kWh/a auf. Der Stromfremdbezug hat dabei mit 271 Mio. kWh/a einen Anteil in Höhe von 58 %. Der größte Teil des Gesamtstromverbrauchs ist auf die Kläranlagen mit Anschlussgrößen über 100.000 EW zurückzuführen. Wie aus Bild 3.24 hervorgeht, verbrauchen diese im Mittel (Median) 6,0 Mio. kWh/a pro Anlage.

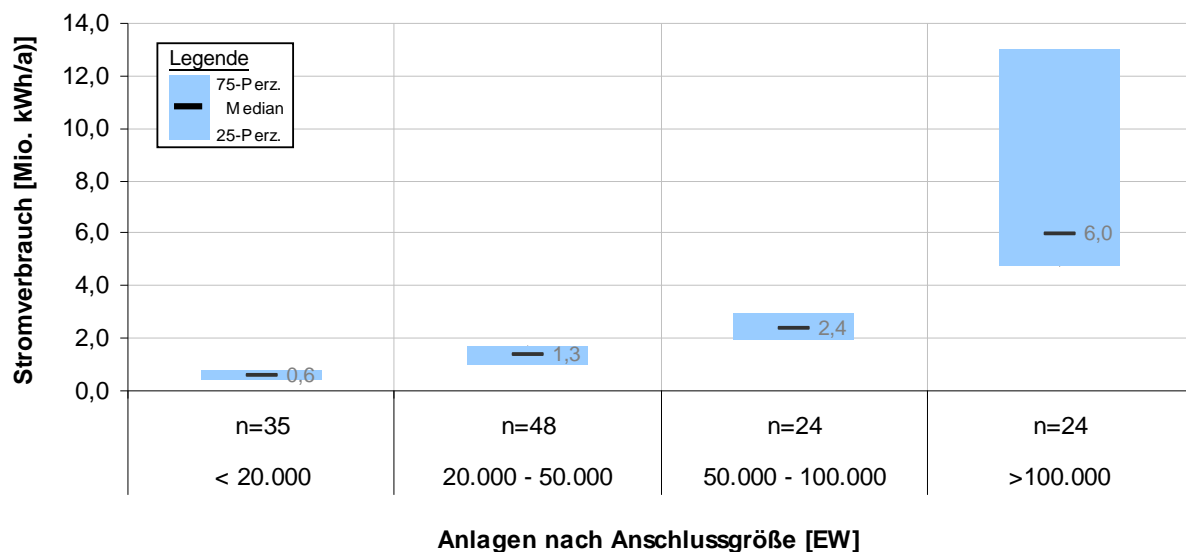


Bild 3.24: Jahresverbrauch pro Kläranlage in Abhängigkeit der Anschlussgröße auf Basis der Belastung im Jahresmittel

#### Einwohnerspezifischer Stromverbrauch

Der spezifische Elektrizitätsverbrauch bezogen auf die Anschlussgröße ( $EW_{CSB}$ ) liegt bei den ausgewerteten Kläranlagen im Mittel (Median) bei  $40 \text{ kWh}/(EW \cdot a)$ . In Bild 3.25 sind die einzelnen spezifischen Verbrauchsdaten für alle ausgewerteten Kläranlagen in Abhängigkeit der Anschlussgröße (mittlere Belastung) dargestellt. Es zeigt sich, dass der Verbrauchswert wie zu erwarten mit steigender Anlagengröße abnimmt.

Der für die einzelnen Anlagen ermittelte Verbrauchswert wird zudem mit den Richt- und Idealwerten des vom Umweltministerium in Nordrhein-Westfalen herausgegebenen Energiehandbuchs (MURL-NRW, 1999) verglichen (Bild 3.26). Hierbei ist zu beachten, dass diese Kennwerte abweichend von dem Entwurf des DWA Arbeitsblattes A 216 die spezifischen Randbedingungen der einzelnen Kläranlage nicht einbeziehen. Es zeigt sich, dass die Idealwerte des Energiehandbuchs von Kläranlagen in allen Größenklassen erreicht und teilweise sogar unterschritten werden. Auf der anderen Seite ist jedoch festzustellen, dass die überwiegende Mehrzahl der Kläranlagen auch rund 15 Jahre nach der

Ableitung der Vorgabewerte diese weit überschreiten und selbst bei großen Kläranlagen der GK 4 spezifische Verbrauchswerte von über 50 kWh/(E\*a) erreicht werden.

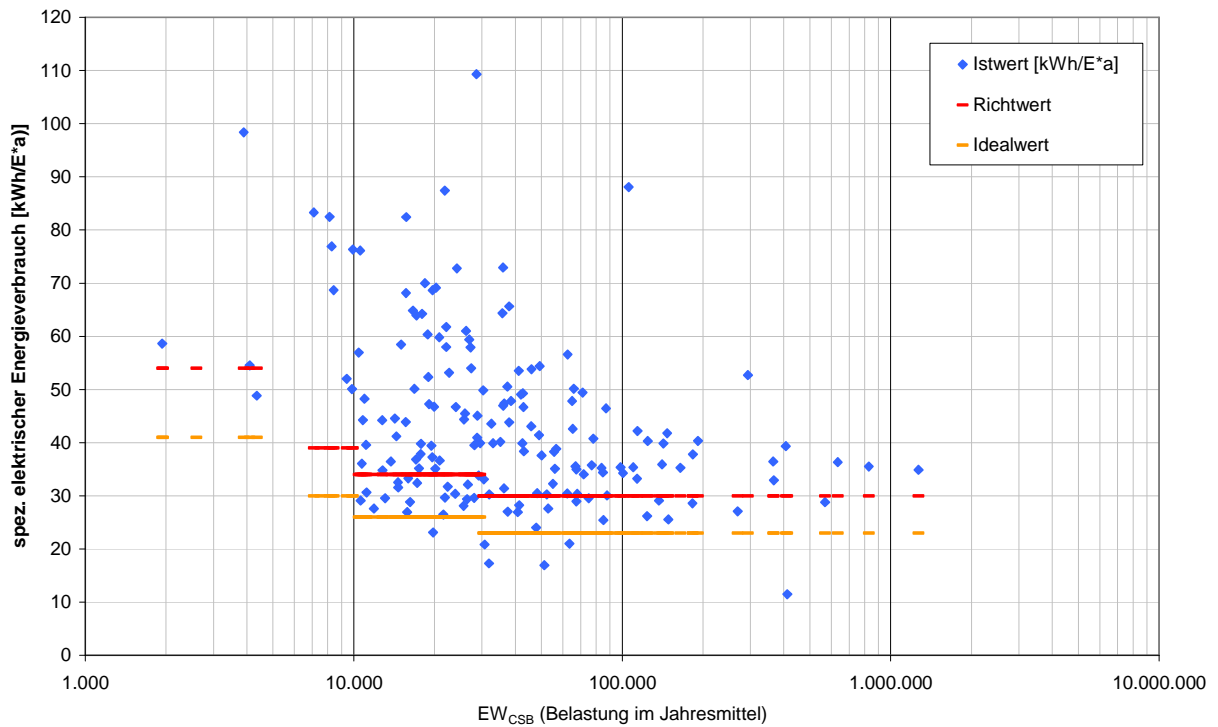


Bild 3.25: Spezifischer elektrischer Energieverbrauch in Abhängigkeit der Anlagengröße

Die kleineren Kläranlagen mit Anschlussgrößen unter 20.000 EW besitzen mit einer Häufigkeitsverteilung von 32 bis 65 kWh/(EW\*a) die größte Schwankungsbreite, erreichen jedoch zum Teil durchaus die Vorgabewerte. Dies bestätigt das große Optimierungspotenzial für die einzelne Kläranlage unabhängig von der Größenklasse.

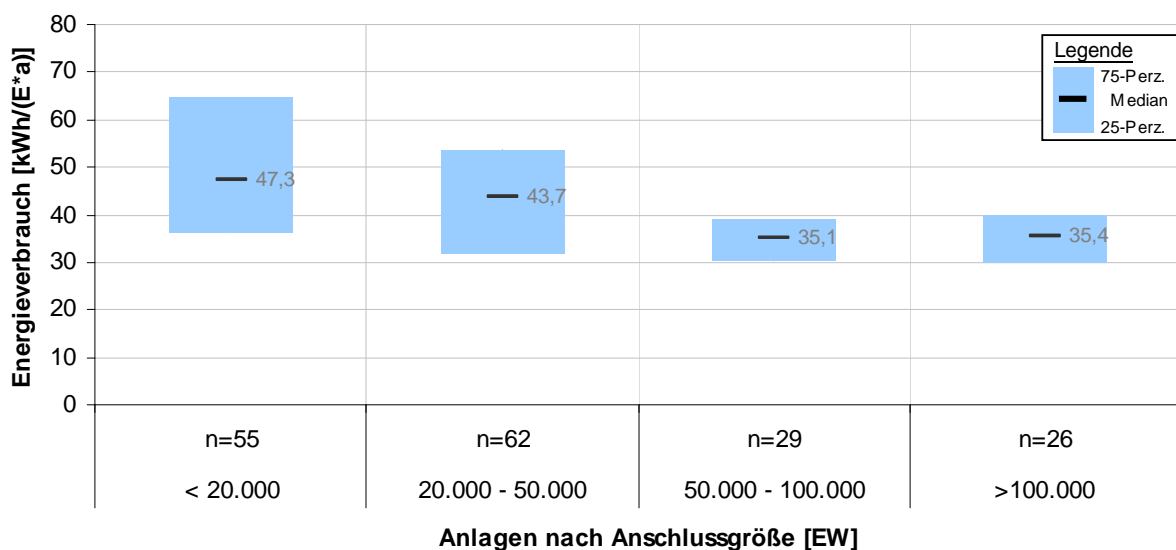


Bild 3.26: Statistische Auswertung des einwohnerspezifischen Stromverbrauchs



### Einwohnerspezifische Eigenstromproduktion

Die Eigenproduktion liegt für alle ausgewerteten Anlagen im Mittel bei 16 kWh/(EW\*a). Auffällig ist hierbei die verhältnismäßig hohe Eigenproduktion der kleinen Anlagen bis 20.000 EW Anschlussgröße, die damit auf dem gleichem Niveau liegt wie bei den Anlagen mit Anschlussgrößen zwischen 20.000 und 100.000 EW. Demgegenüber steht jedoch der erhöhte spezifische Energiebedarf dieser Anlagen, der letztlich zu einem niedrigeren Eigendeckungsgrad für den Parameter Elektrizität führt.

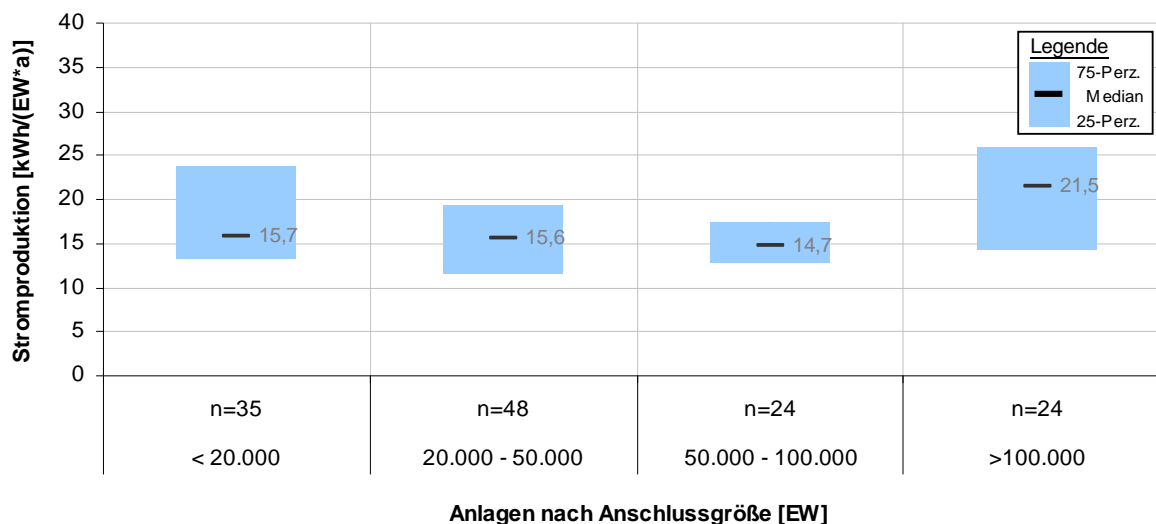


Bild 3.27: spezifische Eigenproduktion

### Einwohnerspezifischer Eigenversorgungsgrad

Der elektrische Eigenversorgungsgrad liegt im Mittel (Median) bei 42 %. Die in Bild 3.28 gezeigten Häufigkeitsverteilungen machen jedoch deutlich, dass die Werte zum Teil eine erhebliche Varianz aufweisen. Bei Anlagen mit Ausbaugrößen über 100.000 EW wird ein mittlerer Eigenversorgungsgrad von 61 % erreicht.

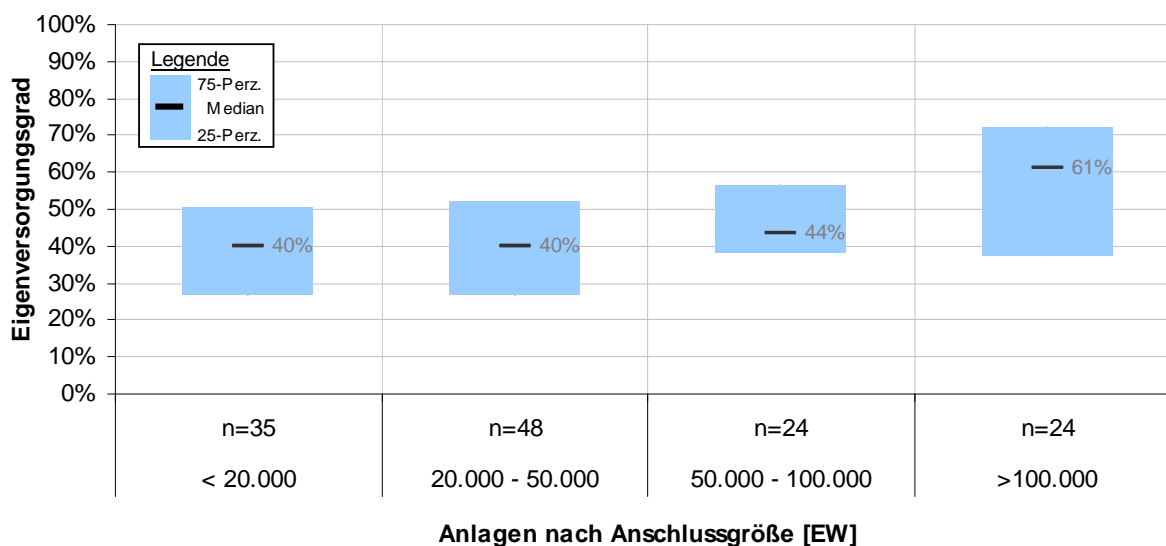


Bild 3.28: Elektrischer Eigenversorgungsgrad in Abhängigkeit der Kläranlagengröße

### 3.2.5 Kennzahlen im Überblick

Tabelle 3.4: Kennzahlen im Überblick (Median nach Anschlussgröße)

	Einheit	Kat. I	Kat. II	Kat. III	Kat. IV
		< 20.000	20.000 - 50.000	50.000 - 100.000	>100.000
<b>Anlagendaten</b>					
Ausbaugröße ( $EW_{\text{Ausbau}}$ )	EW	18.000	48.000	97.800	250.000
Anschlussgröße ( $EW_{\text{CSB}}$ )	EW	14.242	30.415	67.024	173.580
Abwassermenge	m <sup>3</sup> /a	4.227	8.940	17.183	47.835
Volumen Vorklärung	m <sup>3</sup>	387	674	1.492	3.450
Vorklärdauer $t_{\text{VK}}$	h	1,2	1,2	1,2	1,8
<b>Schlammfall</b>					
Schlammalter (tTS)	d	19,8	20,0	20,0	17,8
Rohschlammmenge	m <sup>3</sup> /a	10.430	22.047	43.800	133.779
Rohschlammfracht	t TR/a	385	864	1.784	5.711
spez. Rohschlammfall	g TR/(EW*d)	83,6	77,8	65,4	78,7
<b>Faulgasanfall</b>					
Faulvolumen	m <sup>3</sup>	900	2.000	3.800	8.250
Raumbelastung Faulstufe	kg oTR/(m <sup>3</sup> *d)	0,7	0,8	0,9	1,1
mittlere Faulzeit	d	41,0	34,6	29,0	27,0
Faulgasproduktion	Nm <sup>3</sup> /a	130.162	298.828	552.183	2.334.616
spez. Faulgasproduktion	l <sub>N</sub> /(EW*d)	24,0	23,9	22,0	24,9
<b>Faulgasnutzung</b>					
Anteil Faulgas verstromt	%	62%	74%	76%	79%
elektr. Nennwirkungsgrad	%	31,3	31,5	34,0	35,7
elektr. Wirkungsgrad (ber.)	%	27,8	27,0	30,2	29,8
<b>Energieverbrauchsdaten</b>					
Stromverbrauch gesamt	kWh/a	593.332	1.339.570	2.361.610	5.809.400
spez. Stromverbrauch	kWh/(EW*a)	47,3	43,7	35,1	35,4
Stromproduktion aus FG <sup>1</sup>	kWh/a	238.728	541.976	919.344	3.024.095
Eigenversorgungsgrad-Strom <sup>1</sup>	%	39,9	39,7	43,6	61,0

<sup>1</sup> bezogen auf Anlagen mit Verstromung

### 3.3 Auswertung von Energieanalysen des IPA-Förderprogramms

Zur systematischen Optimierung des Energieverbrauchs der Abwasserbehandlung wurde Ende der 1990er-Jahre das Werkzeug der Energieanalyse mit dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ (MURL, 1999) eingeführt. Diese Analysen haben sich seitdem in der Praxis dazu bewährt, einerseits den energetischen IST-Zustand der Kläranlagen aufzuzeigen und andererseits den Betreibern unter betrieblichen, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten Handlungsempfehlungen für die Optimierung des Energieverbrauchs zu geben. Das Land NRW hat die Durchführung von Energieanalysen über verschiedene Förderprogramme bereits seit 1999 unterstützt. Zuletzt wurde das von 2007 bis 2011 laufende *Investitionsprogramm Abwasser NRW* (IPA) durch die neue Förderrichtlinie *Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW* (ResA) ersetzt.

#### 3.3.1 Datengrundlage

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Energieanalysen des abgelaufenen IPA-Förderprogramms umfassend hinsichtlich zusätzlicher Informationen für das TP 2 ausgewertet. Insgesamt wurden etwa 110 entsprechende Studien durch das Land NRW im Rahmen des IPA-Programms gefördert. Zum Zeitpunkt der Auswertung standen hiervon 92 in Berichtsform zur Verfügung.

Alle relevanten energetischen Kennwerte und sonstigen Kläranlagendaten wurden mit dem Ziel einer möglichst umfassenden Auswertung der Energieanalysen aus den vorliegenden Berichten entnommen. Hierzu zählen folgende Kategorien:

- **Objektdaten** (Baujahr, Betreiber, Erstellungsjahr der Analyse, etc.)
- **Anlagendaten** (Untersuchungszeitraum, Belastungsdaten, Ausrüstung, Förderhöhen, Faulgasverteilung, Strom- und Wärmebilanz, etc.)
- **Energiematrix** (Stromverbrauch der Verfahrensgruppen, anlagenspezifische Idealwerte)
- **Energienachweis** (spezifischer Gesamtstromverbrauch, Grad der Faulgasnutzung, Eigenversorgungsgrad, etc.)
- **Maßnahmen** (Kategorie der Maßnahme, Verfahrensgruppe, Kurzbeschreibung, Energiereduktion bzw. zusätzliche Produktion, Kosten)

Der Umfang und die Qualität der Daten variieren dabei je nach Studie, so dass die Datensätze in ihrer Vollständigkeit zum Teil erheblich voneinander abweichen. Hierdurch ergeben sich in den folgenden Auswertungen Unterschiede bei der Anzahl der dargestellten Datenpunkte. Analog zu Kapitel 3.2 erfolgt die **Auswertung der Kennwerte** anhand von

Häufigkeitsverteilungen, die in Boxplot-Diagrammen und Summenlinien dargestellt werden. Als Mittelwert wird aus diesen statistischen Auswertungen jeweils der Zentralwert (Median) abgeleitet. Die **Bezugsgröße der einwohnerspezifischen Kennwerte** wurde den einzelnen Energieanalysen entnommen. Hierbei ist zu beachten, dass die zugrundeliegenden Berechnungen der mittleren Anlagenbelastung nicht einheitlich sind (Bild 3.29).

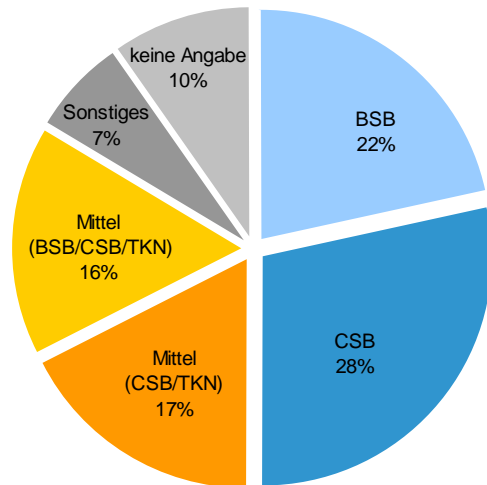


Bild 3.29: Verteilung der in den untersuchten Energieanalysen verwendeten Bezugsgrößen zur Ermittlung der mittleren Anlagenbelastung bzw. der Anschlussgröße

Unter Verwendung der genannten Bezugsgrößen ergibt sich die in Bild 3.30 dargestellte **Verteilung der Einwohnerwerte**. Die Mediananlage weist demzufolge eine mittlere Anschlussgröße von 36.600 EW auf.

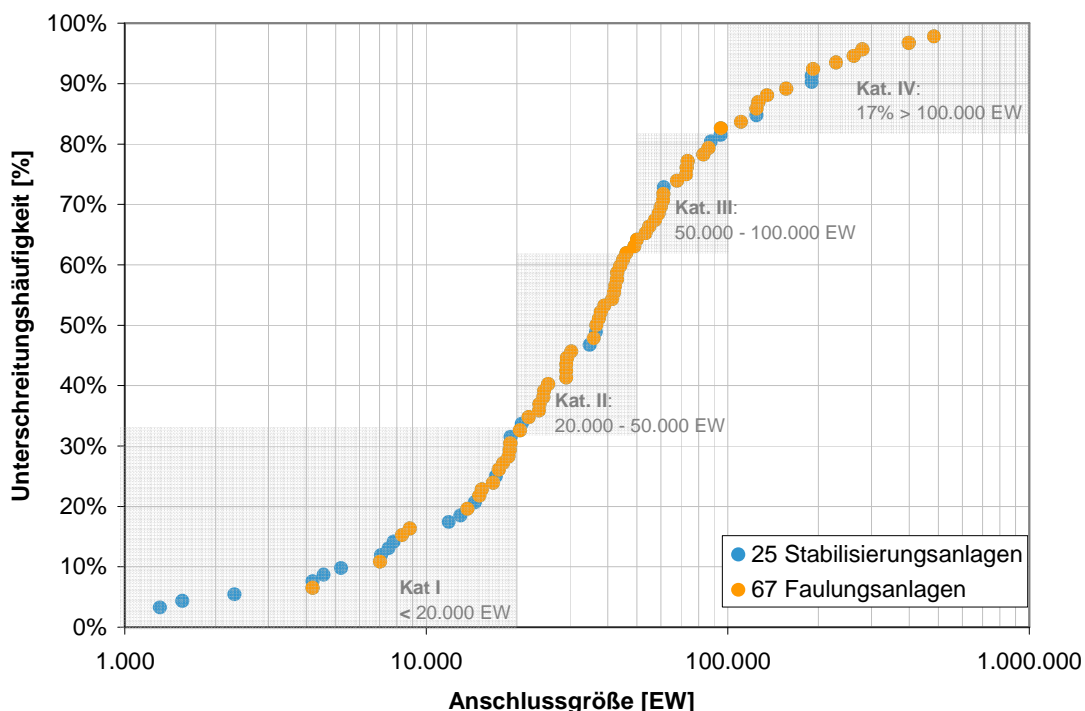


Bild 3.30: Verteilung der Anschlussgrößen gemäß Angaben der Energieanalysen

### 3.3.2 Energiebedarf nach Verfahrensgruppen

Energieanalysen beinhalten detaillierte energetische Verbrauchsdaten der jeweiligen Kläranlage. Somit besteht die Möglichkeit, den spezifischen Elektrizitätsverbrauch nicht nur für die Gesamtanlage, sondern auch für die einzelnen verfahrenstechnischen Verbrauchergruppen auszuwerten. In Bild 3.31 sind hierzu die spezifischen Verbräuche der Verfahrensgruppen Biologie, Schlammbehandlung, Mechanik, Infrastruktur und Hebewerke dem Gesamtstromverbrauch gegenübergestellt.

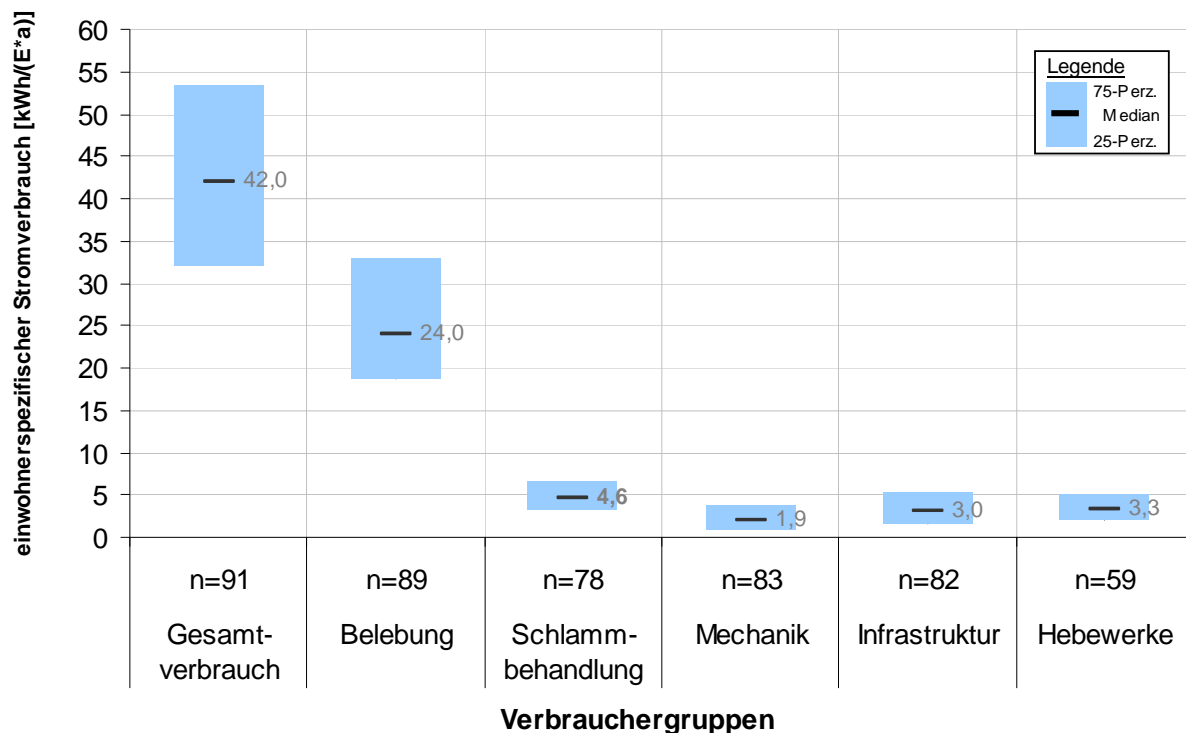


Bild 3.31: Spezifischer Stromverbrauch nach Verfahrensgruppen

Die biologische Stufe hat mit einem mittleren spezifischen Verbrauch von 24 kWh/(E\*a) mit Abstand den höchsten Strombedarf. Die Schlammbehandlung folgt der Biologie als nächst größter Stromverbraucher. Der einwohnerspezifische Stromverbrauch liegt gemäß Bild 3.31 bei 3 - 7 kWh/(E\*a), mit einem Medianwert in Höhe von 4,6 kWh/(E\*a). Damit entspricht der Verbrauch der Schlammbehandlung im Mittel etwa 11 % des Gesamtverbrauchs einer kommunalen Kläranlage.

Insbesondere für den Bereich der Belebung zeigt sich zudem eine starke Abhängigkeit zur jeweiligen Anschlussgröße der Kläranlage. Auch der Bereich der Mechanik hat bei kleineren Anlagen einen deutlich höheren spezifischen Verbrauch. Die Schlammbehandlung hat dagegen bei allen Größenkategorien einen vergleichbar hohen Stromverbrauch (siehe Bild 3.32).

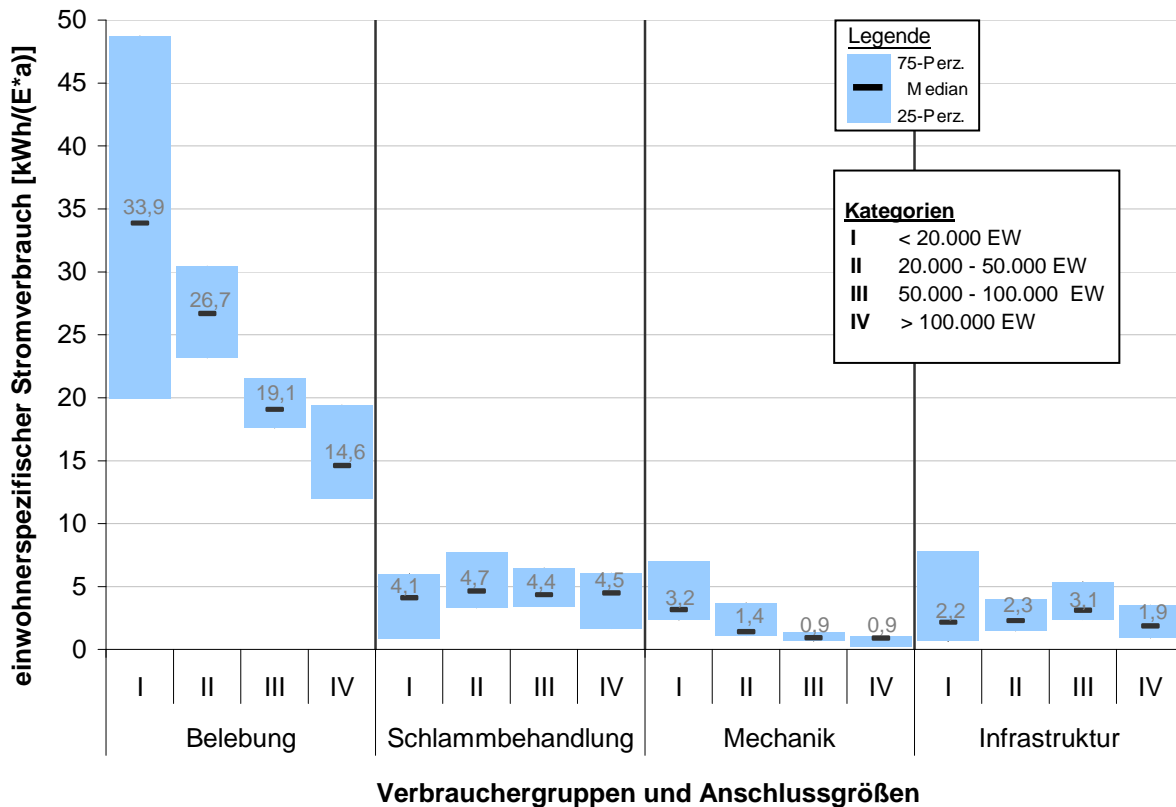


Bild 3.32: Spezifischer Stromverbrauch nach Verfahrensgruppen und Anschlussgrößen

Die Behandlung der anfallenden Klärschlämme erfordert die verfahrenstechnischen Teilschritte: Voreindickung, Schlammstabilisierung, Nacheindickung und Entwässerung. Den jeweiligen Anteil des Stromverbrauchs dieser Untergruppen zeigt Bild 3.33. Mehr als die Hälfte des Strombedarfs entfällt demnach auf die Faulstufe und etwa ein Drittel auf die Schlammmentwässerung.

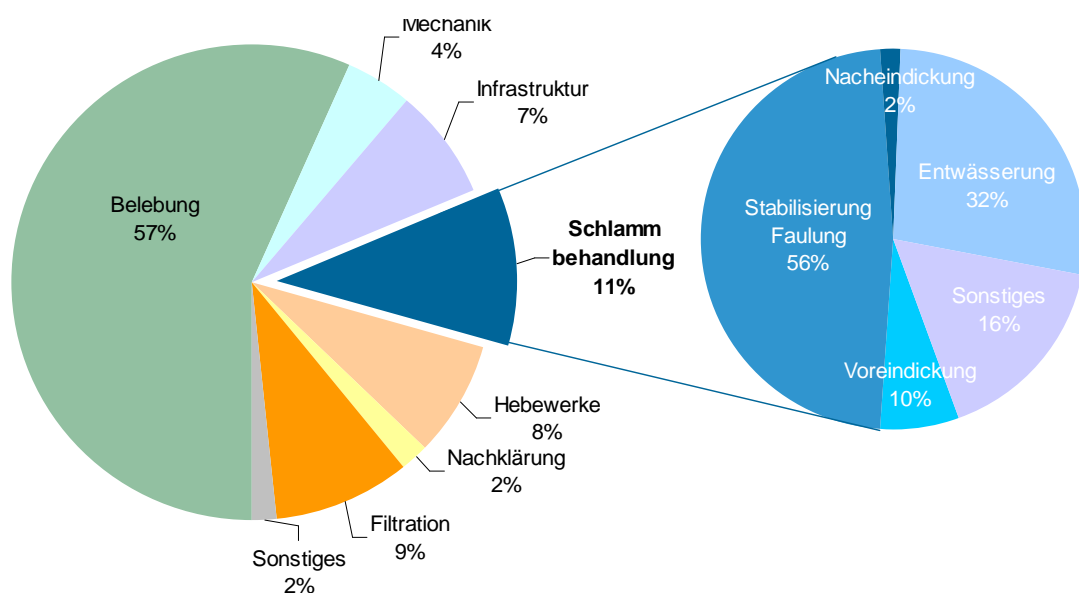


Bild 3.33: Verteilung des Stromverbrauchs auf die Verfahrensschritte der Abwasserbehandlung und Teilschritte der Schlammbehandlung

Bei näherer Betrachtung der Verbrauchsanteile innerhalb der Schlammbehandlung weist insbesondere die Faulstufe eine ungleiche Verteilung mit hoher Streuung auf (siehe Bild 3.34). Auch die Daten zum Stromverbrauch der Schlammentwässerung variieren deutlich. Dies ist in erster Linie auf die unterschiedlichen verfahrenstechnischen Gegebenheiten und Variationen zurückzuführen.

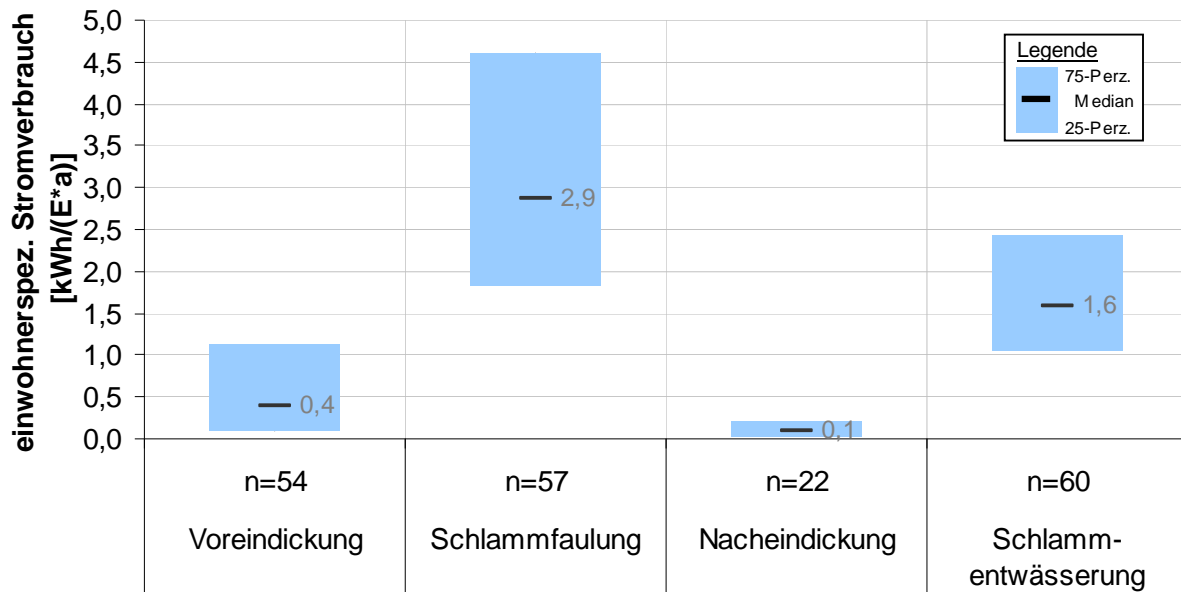


Bild 3.34: Verteilung des einwohnerspezifischen Stromverbrauchs unterteilt nach Teilschritten der Schlammbehandlung

### 3.3.3 Faulgaserzeugung

Auf 73 % der Kläranlagen, deren Energieanalysen ausgewertet wurden, werden die anfallenden Klärschlämme in einer separaten Faulstufe unter anaeroben Bedingungen stabilisiert (vgl. dazu Bild 3.30). Bezogen auf die zugeführte Organik wurden für diese Anlagen im IST-Zustand spezifische Klärgasausbeuten von ca. 300 bis 600  $\text{l}_\text{N}/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$  ermittelt (siehe Bild 3.35). Der Median der Gasausbeute, beträgt 460  $\text{l}_\text{N}/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$  und liegt damit knapp über dem Richtwert in Höhe von 450  $\text{l}_\text{N}/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$  gemäß Energiehandbuch NRW bzw. in dem Wertebereich, welcher gemäß DWA-A-216 (Gelbdruck) als spezifischer Kennwert angegeben wird.

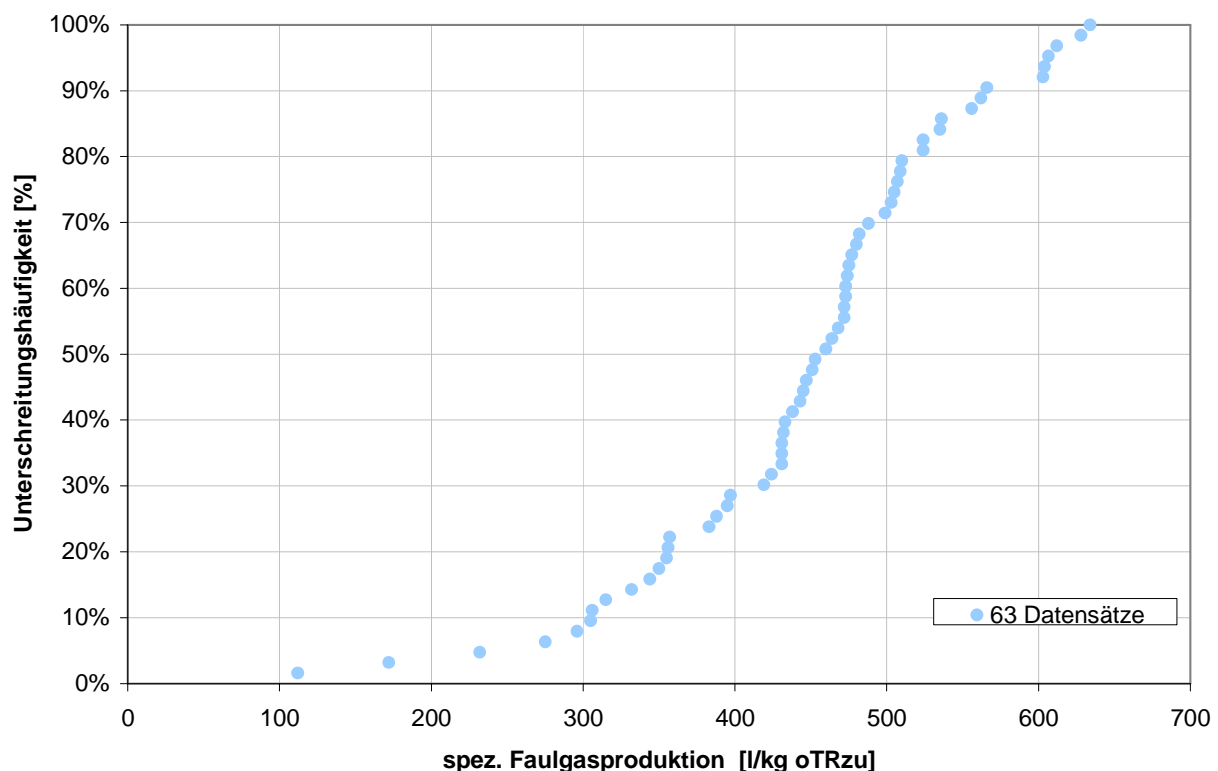


Bild 3.35: Faulgasproduktion im IST-Zustand (Energieanalysen der Jahre 2007-2011)

Ein Großteil der untersuchten Kläranlagen hat damit bereits im IST-Zustand (Untersuchungszeitraum: 2007 - 2011) eine sehr gute Faulgasausbeute. Diese Aussage wird durch die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Betreiberabfrage bestätigt, bei der eine mittlere Faulgasausbeute von 478  $\text{l}_\text{N}/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$  berechnet wurde (vgl. Kapitel 3.2.2). Als Grund für die hohe Ausbeute sind einerseits die auf einigen Anlagen praktizierte Mitausfäulung von energiereichen Co-Substraten und andererseits die langen Faulzeiten zu nennen, die insbesondere für kleinere Anlagen deutlich über den erforderlichen Verweilzeiten im Faulbehälter liegen (vgl. Tabelle 3.4).



### 3.3.4 Faulgasnutzung

Neben der Senkung des Energieverbrauchs wird in den Energieanalysen gleichermaßen die optimierte Nutzung des anfallenden Faulgases untersucht. Als Bewertungsfaktoren dienen dabei der Anteil des genutzten und somit nicht der Notfackel zugeführten Faulgases sowie die prozentuale Umwandlung der im Gas enthaltenen Energie in Kraft bzw. Elektrizität. Desweiteren wird für die abschließende Bewertung der prozentuale Eigenversorgungsgrad an Strom und Wärme berechnet.

Die Auswertung der Energieanalysen des IPA-Förderprogramms ergibt im Mittel eine Faulgasnutzung in Höhe von 94 %. Bezogen auf die gesamte Faulgasproduktion, wird die Energie des Faulgases dabei im Mittel zu 22 % in Elektrizität umgewandelt (vgl. dazu Bild 3.36). Von den untersuchten Anlagen verfügten dabei allerdings zum Zeitpunkt der Untersuchung knapp 30 % über kein Aggregat zur Verstromung des anfallenden Faulgases.

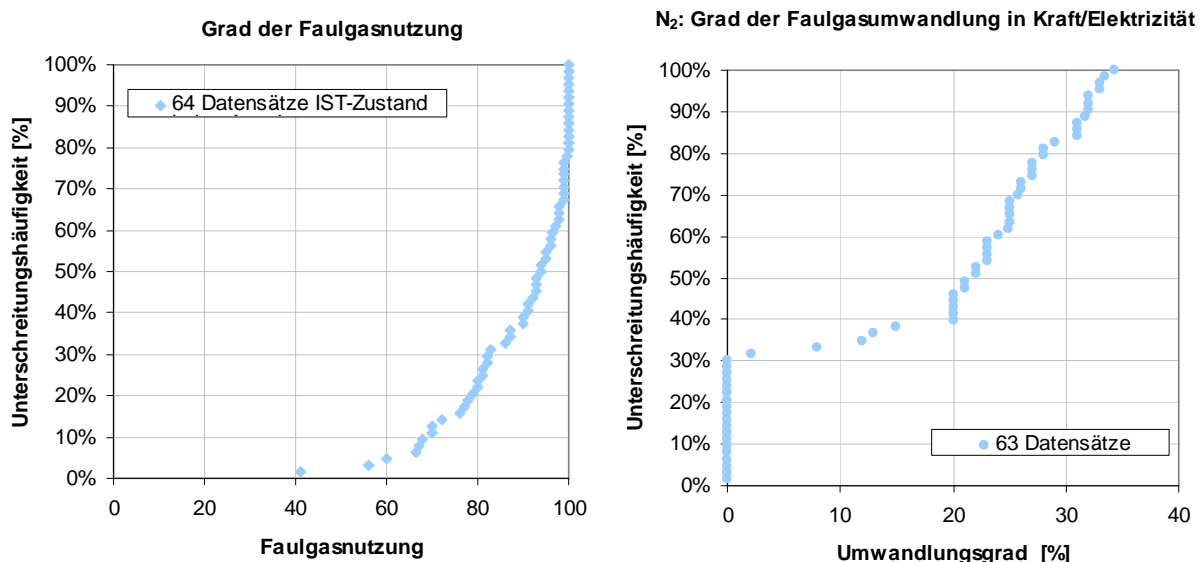


Bild 3.36: Summenlinien zur Gasnutzung (links) und Gasumwandlung (rechts)

Der geringe Grad der Umwandlung von Faulgas in Elektrizität führt in Verbindung mit den teilweise sehr hohen Energieverbrauchswerten zu einem insgesamt niedrigen Strom-Eigenversorgungsgrad in Höhe von etwa 29 %. Bezogen auf die Versorgung mit Wärme liegt der mittlere Eigenversorgungsgrad dagegen - bereits ohne die Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen - bei etwa 93 % (siehe Bild 3.37).

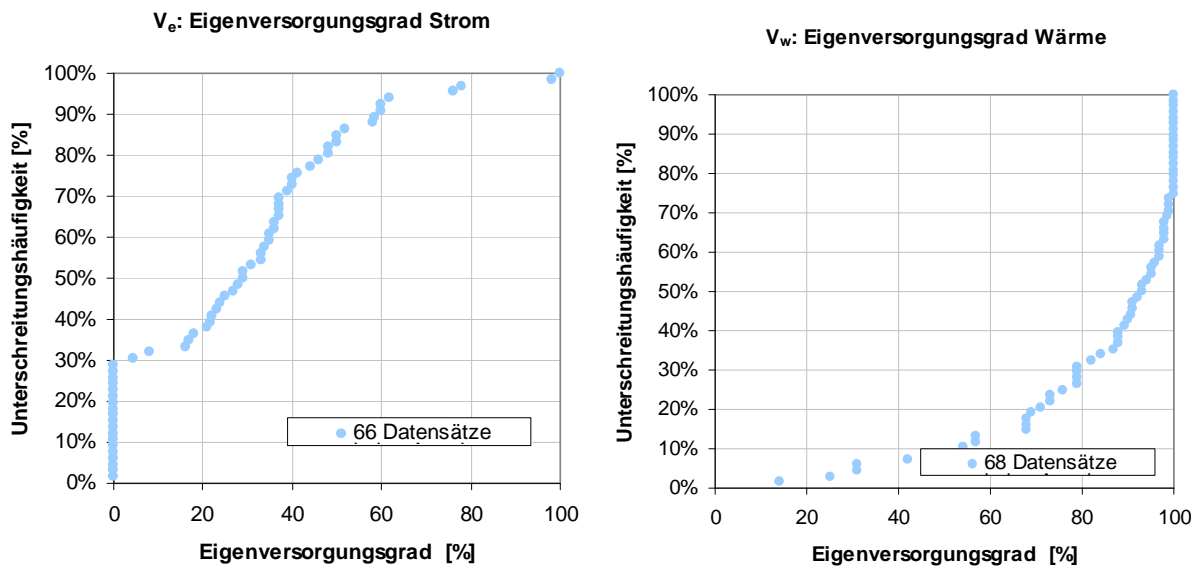


Bild 3.37: Eigenversorgungsgrad für Wärme und Elektrizität im IST-Zustand gemäß Energieanalysen

### 3.3.5 Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz

In Energieanalysen werden aus den Untersuchungen der energetischen IST-Situation Maßnahmen zur Optimierung der Energieeffizienz abgeleitet. Durch energieoptimierte Betriebsführung oder den Einsatz energieeffizienter Aggregatetechnik tragen diese Maßnahmen dazu bei, den Energieverbrauch zu senken. Die Optimierungsmaßnahmen werden dabei in drei Realisierungsphasen zeitlich unterteilt:

- **Sofortmaßnahmen (S)** sind sehr rentabel, erfordern geringe Investitionen und können auf Grund der technischen Randbedingungen sofort realisiert werden.
- **Kurzfristige Maßnahmen (K)** sind in der Regel insgesamt wirtschaftlich, aber mit entsprechenden Investitionen verbunden.
- **Abhängige Maßnahmen (A)** sind an bestimmte Bedingungen geknüpft und können vielfach erst mittel- bzw. langfristig realisiert werden.

In den 92 ausgewerteten Energieanalysen wurden in Summe 751 Optimierungsmaßnahmen vorgeschlagen. Anzahl, Einsparpotential und Kategorisierung dieser Maßnahmen sind in Bild 3.38 getrennt nach Verfahrensgruppen dargestellt. Die größte Anzahl von Maßnahmen (45 %) betreffen die biologische Stufe. Wie bereits in Kapitel 3.3.2 dargestellt, handelt es sich hierbei um die Verfahrensgruppe mit dem größten Energieverbrauch, so dass sich auch insgesamt das bei Weitem größte Einsparpotential ergibt. Im Weiteren werden die Maßnahmen zu den Kategorien Schlammbehandlung und Faulgasnutzung näher untersucht.

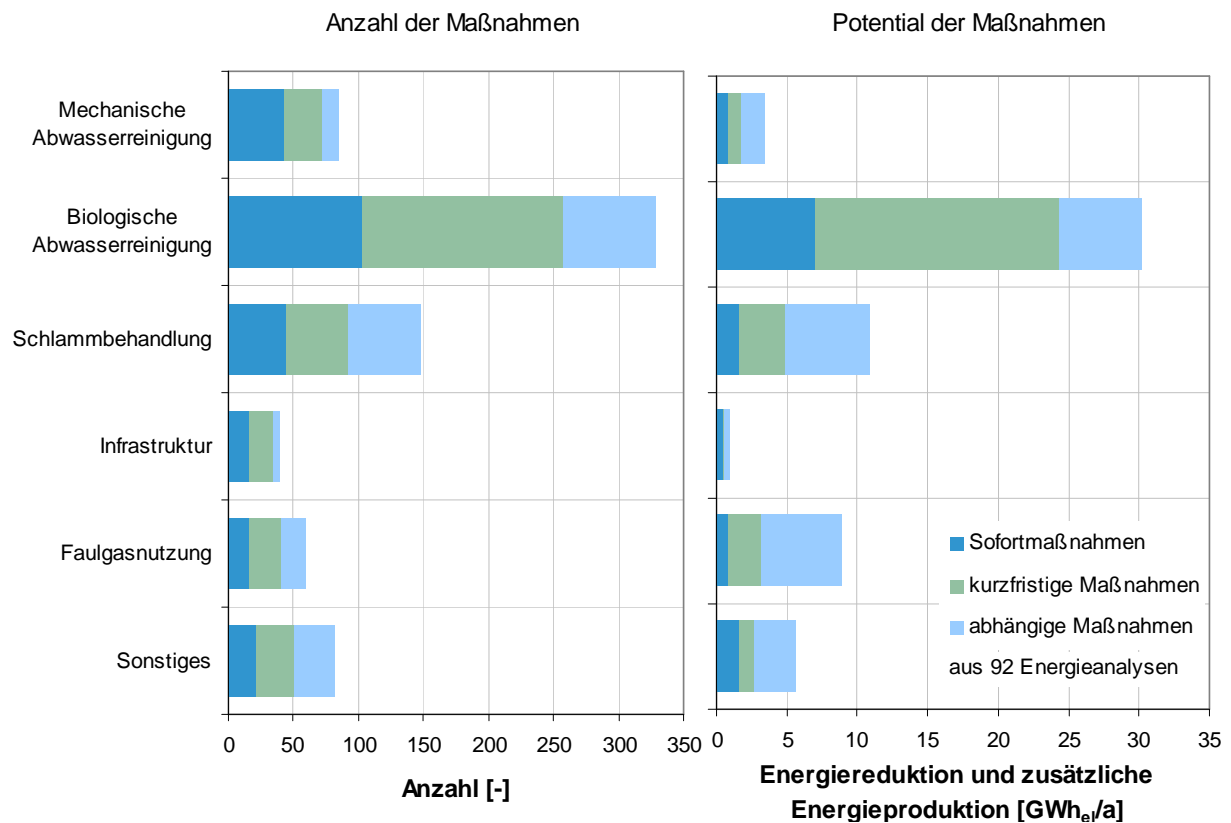


Bild 3.38: Anzahl und Potential der Maßnahmen getrennt nach Verbraucherguppen.

### Maßnahmen zur Optimierung der Effizienz der Schlammbehandlung

Mit einem Anteil von 20 % der vorgeschlagenen Maßnahmen weist die Schlammbehandlung ebenfalls ein erhebliches Optimierungspotential auf. Die Maßnahmen betreffen dabei überwiegend folgende Bereiche (siehe auch Tabelle 3.5):

- Umwälzung des Faulraums (z.B. Austausch der Umwälzpumpen / Mischer oder ein getakteter Intervall-Betrieb vorhandener Aggregate)
- Voreindickung (z.B. maschinelle Überschussschlammeindickung)
- Entwässerung (z.B. Austausch durch neue effizientere Technik)
- Schlammalter der Biologie (höherer Organikanteil im Überschussschlamm)
- Faulraumtemperatur (z.B. Absenkung der Temperatur im Winter)

Bei den untersuchten Maßnahmen variieren sowohl die Einsparpotentiale, als auch die notwendigen Zusatzinvestitionen. Als Folge ergeben sich erhebliche Unterschiede bei den Kosten-Nutzen-Faktoren. Die zugrundeliegenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind den jeweiligen Energieanalysen entnommen. D.h. die angesetzten Strombezugspreise zur Ermittlung der eingesparten Energiekosten sowie die angesetzten Zinssätze zur Kapitalisierung der Zusatzinvestitionen, sind nicht einheitlich gewählt. Im Mittel ergeben sich pro Maßnahmenbereich die in Tabelle 3.5 aufgelisteten Kosten/Nutzen-Faktoren.

Tabelle 3.5: Verfahrensbereiche vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen innerhalb der Schlammbehandlung mit Angaben zu Kosten und Nutzen

		Kosten / Nutzen im Mittel pro Maßnahme				
Maßnahmenbereich	Anzahl	Reduktion Strombezug	Investitions-kosten	Jahres-kosten	Jahres-nutzen	K/N
		[kWh <sub>e</sub> /a]	[€]	[€/a]	[€/a]	-
Umwälzung Faulraum	n=43	41.128	25.981	2.260	6.669	0,3
Voreindickung	n=36	73.879	137.777	15.496	22.902	0,7
Entwässerung	n=15	55.956	319.239	15.948	9.296	1,7
Reduzierung Schlammalter	n=13	45.479	3.846	1.472	6.924	0,2
Temperaturanpassung	n=13	12.020	769	15	6.816	0,0
Pumpen	n=9	32.770	16.955	1.608	4.742	0,3
Nacheindickung	n=9	37.681	6.128	227	5.174	0,0
Co-Fermentation	n=8	194.421	54.125	13.396	20.256	0,7
Prozesswasser	n=5	154.980	67.300	7.439	15.152	0,5
Wärmerückgewinnung	n=4	-	91.750	4.611	6.320	0,7
Faulstufe errichten	n=2	748.328	45.000	9.622	22.424	0,4
Desintegration	n=1	600.000	600.000	123.300	85.200	1,4

Im Fokus steht bei den Maßnahmen die Verringerung des Energieeinsatzes. Eine erhöhte Gasproduktion durch Verbesserung der Faulgasausbeute wird bei Umsetzung der Maßnahmen dagegen kaum erzielt (Bild 3.39). Eine optimierte Energieausbeute durch verbesserte Faulgasproduktion ist jedoch Thema der vorliegenden Studie. Detaillierte Hinweise zu einer optimierten Faulgasausbeute werden in Kapitel 4 gegeben.

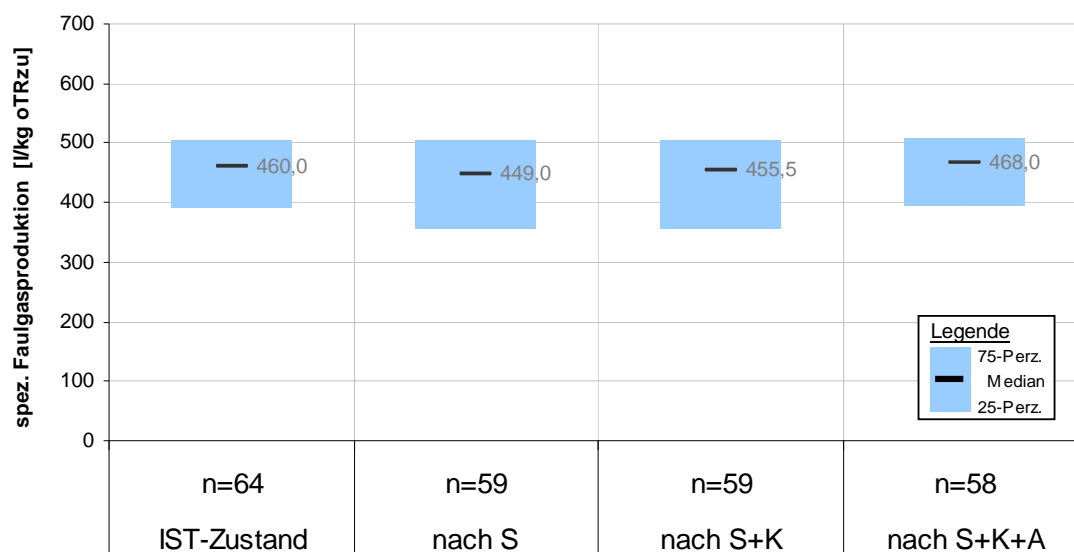


Bild 3.39: Faulgasausbeute vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

### Maßnahmen zur Optimierung der Faulgasnutzung

Insgesamt entfallen zwar verhältnismäßig wenige Maßnahmen auf die Faulgasnutzung (8 %), allerdings weisen diese ein erhebliches Energiepotential auf. Die Maßnahmen unterteilen sich dabei in drei Bereiche:

- Austausch vorhandener Aggregate durch moderne KWK-Anlagen (Repowering)
- Neubau auf Kläranlagen ohne vorhandene KWK-Nutzung (Nachrüstung)
- detaillierte Anpassung der Betriebsführung (Betriebsoptimierung)

Etwa 70 % der kommunalen Kläranlagen verfügen bereits im IST-Zustand über Aggregate zur Kraft-Wärme-Kopplung (vgl. Kapitel 3.2.3 und 3.3.4). Der Austausch durch effizientere Aggregate (Repowering) überwiegt aus diesem Grund bei den ausgewerteten Energieanalysen mit 24 von 54 Optimierungsmaßnahmen. Bei den Kläranlagen mit vorhandenen KWK-Anlagen handelt es sich dabei zumeist um größere Anlagen der GK 4 und 5, die Gasmotoren in sehr hohen Leistungsbereichen betreiben. Die Repowering-Maßnahmen erfordern daher im Mittel weit höhere Investitionen als eine Nachrüstung von KWK-Anlagen auf kleinen Kläranlagen. Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen ist in Tabelle 3.6 zusammengefasst.

Tabelle 3.6: Kosten und Nutzen der Maßnahmen zur Optimierung der Faulgasnutzung.

		Kosten / Nutzen im Mittel pro Maßnahme				
Maßnahmenbereich	Anzahl	Reduktion Strombezug	Investitions-kosten	Jahres-kosten	Jahres-nutzen	K/N
		[kWh <sub>e</sub> /a]	[€]	[€/a]	[€/a]	-
BHKW-Repowering	n=24	622.520	450.968	50.995	96.390	0,5
BHKW-Nachrüstung	n=20	364.104	201.613	26.181	42.535	0,6
BHKW-Betriebsoptimierung	n=15	64.733	6.917	2.795	9.146	0,3

Die Wirtschaftlichkeit des Austauschs bestehender Gasnutzungsaggregate ergibt sich aus diversen Randbedingungen, die in Kapitel 5 der vorliegenden Studie ausführlich untersucht werden. Es werden Hinweise gegeben, ab wann ein Repowering mit und ohne Einbezug von zusätzlichen KWK-Vergütungen sinnvoll ist.

Bei Umsetzung aller in den Energieanalysen vorgeschlagenen Maßnahmen wird die mittlere Gasnutzung der untersuchten Kläranlagen auf 100% gesteigert (vgl. Bild 3.40) und zeitgleich der Umwandlungsgrad in Elektrizität von 22 % auf 31 % angehoben (vgl. Bild 3.41).

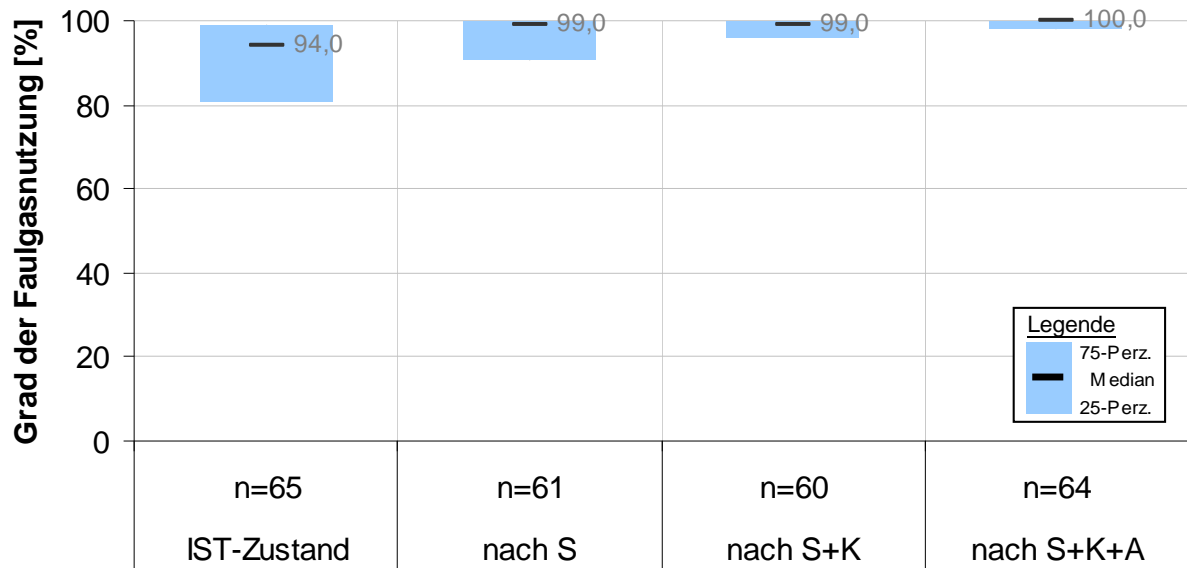


Bild 3.40: Grad der Faulgasnutzung vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

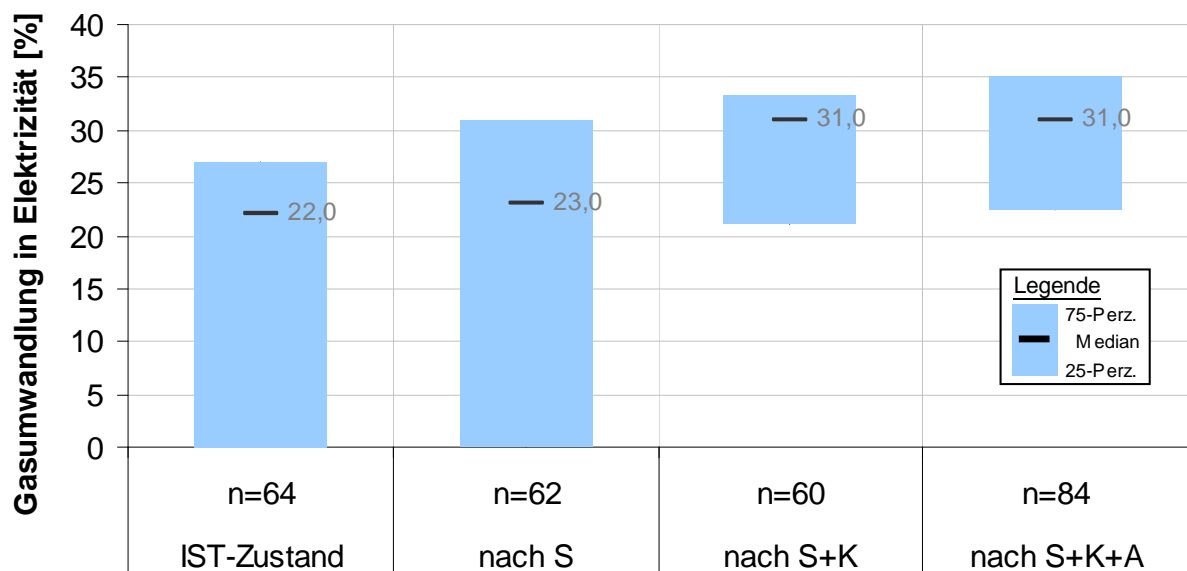


Bild 3.41: Gasumwandlung in Elektrizität vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

### Auswirkungen auf den Eigenversorgungsgrad

In Summe führen die Einsparmaßnahmen und die Optimierung der Gasnutzung zu einem deutlichen Anstieg des Strom-Eigenversorgungsgrades. So steigt der Anteil der Eigenversorgung mit elektrischer Energie von 29 % im Mittel auf knapp 60% nach Umsetzung aller Maßnahmen (siehe Bild 3.42).

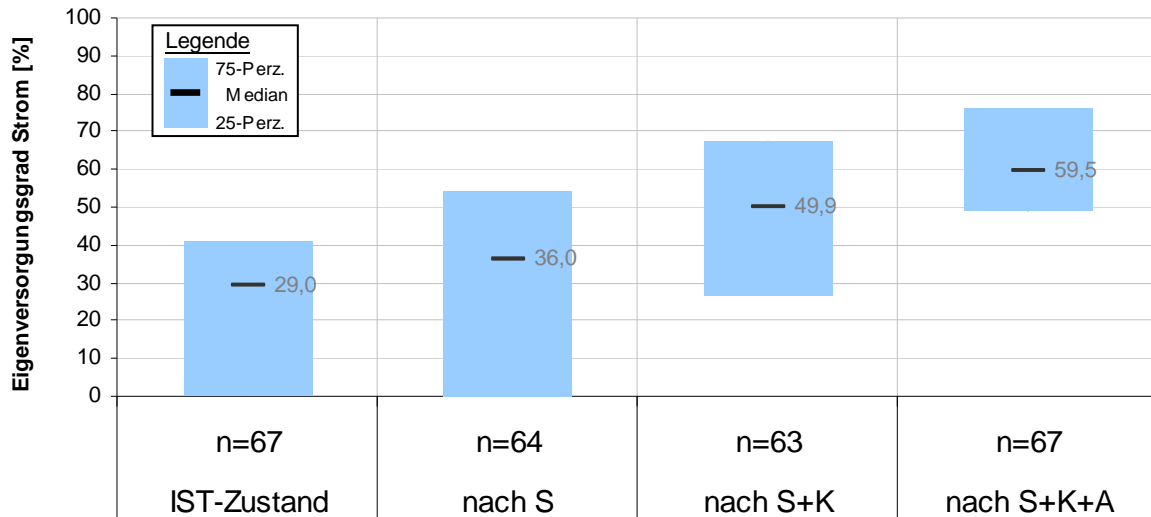


Bild 3.42: Strom-Eigenversorgungsgrad vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

### 3.4 Zwischenfazit zur IST-Situation

Das Thema „Energie auf Kläranlagen“ umfasst neben dem Energieverbrauch der Abwasserreinigung ebenso die Ausbeute der zur Verfügung stehenden Energiepotentiale sowie die technischen Möglichkeiten zur effektiven Nutzung dieser Energie. Anhand einer Betreiberabfrage mit einem Rücklauf von 176 Datensätzen und der Auswertung von 92 Energieanalysen, konnte die energetische IST-Situation in NRW umfassend untersucht werden.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass mit einer Ausbaugröße von 31,6 Mio. EW kommunale Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung einen Großteil der in NRW vorhandenen Abwasserreinigungskapazität ausmachen (90%). Die Kennwerte bezüglich der auf diesen Anlagen erreichten Energieausbeute variieren dabei allerdings zum Teil erheblich und weisen in einigen Bereichen Optimierungspotential auf.

Als Grundlage für die weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Studie, mit dem Ziel einer Optimierung der Faulgasausbeute und Verbesserung der Gasnutzung, konnten auf Basis der IST-Situation folgende Zwischenergebnisse ermittelt werden:

- **Energiepotential**
  - Menge und Organikanteil der anfallenden Klärschlämme liegen für alle Größenklassen in den üblichen Bereichen, welche in den allgemeinen Schlamm-listen angesetzt werden.

- **Faulgasausbeute**

- Es wurden hohe Faulgasausbeuten ermittelt ( $24 \text{ I}_N/\text{EW}/\text{d}$ ;  $> 450 \text{ I}_N/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$ ), die im Wesentlichen auf die Mitvergärung von Co-Substraten sowie lange Faulzeiten (27 d) zurückzuführen sind.
- Ein geringer TR Gehalt im Zulauf zur Faulstufe (4%) bietet weiteres Optimierungspotential im Hinblick auf die Aufenthaltszeit der Schlammfäulung.
- Raumbelastung und Faulzeit deuten insbesondere bei kleineren Anlagen auf freie Kapazitäten hin ( $B_R = 0,7-0,8 \text{ kg oTR}/\text{m}^3/\text{d}$ ,  $t_{\text{TR}} = 36-41 \text{ d}$ ).
- Der Einfluss der Abscheideleistung der Vorklärung auf die Energieausbeute, konnte bestätigt werden. Zusätzlich abgeschiedene Mengen an energiereichem Primärschlamm, führen zu einer verbesserten Faulgasausbeute.

- **Energienutzung**

- Mit sinkender Ausbaugröße steigt sowohl der Anteil des Gaseinsatzes in der Kesselanlage als auch der Fackelverluste an.
- Insgesamt verfügen viele Anlagen über keine KWK-Anlagen. Der Anteil beträgt 21 % gemäß Betreiberabfrage, bzw. 30 % gemäß Energieanalysen.
- Der Strom-Eigenversorgungsgrad verbessert sich mit steigender Anlagengröße, da die elektrischen Wirkungsgrade von ca. 27 % auf 30-31% ansteigen.

- **Energieverbrauch**

- Unabhängig von der Anlagengröße ist im Vergleich zu den Idealwerten weiteres Einsparpotential vorhanden.
- Nach der biologischen Stufe ist die Schlammbehandlung der größte Energieverbraucher (ca. 11 % des Gesamtverbrauchs). Wobei über die Hälfte der Energie dabei auf die Fäulung entfällt und etwa ein Drittel auf die Schlamm-entwässerung.

- **Optimierungsmöglichkeiten**

- Nach der biologischen Stufe besitzen Schlammbehandlung und Faulgasnutzung die größten Potentiale zur Verbesserung der Energiesituation.
- Im Vergleich zur IST-Situation kann insbesondere die Gasnutzung noch weiter verbessert werden.
- Die Strom-Eigenversorgung kann im Mittel auf bis zu 60% bei Umsetzung aller Optimierungsmaßnahmen gesteigert werden.



## 4 Optimierung der Faulgaserzeugung

Menge und Qualität des Faulgases hängen von einer Reihe von Faktoren ab. Neben der Betriebsweise des Faulbehälters hat insbesondere das zugeführte Substrat, also der anfallende Klärschlamm, einen wesentlichen Einfluss auf den Gasertrag. Zusammengefasst berechnet sich die erreichbare Faulgaserzeugung ( $\dot{V}_G$ ) somit aus dem zugeführten Massenstrom an organischem Substrat ( $\dot{m}_{oTR, zu}$ ) und der spezifischen Gasausbeute ( $y_G$ ):

$$\dot{V}_G = \dot{m}_{oTR, zu} \cdot y_G$$

mit:  $\dot{V}_G$  = Faulgaserzeugung [l<sub>N</sub>/d]  
 $\dot{m}_{oTR, zu}$  = organische Fracht im Zulauf zur Faulung [kg oTR<sub>zu</sub>/d]  
 $y_G$  = Faulgasausbeute bezogen auf zugeführte Organik [l<sub>N</sub>/kg oTR<sub>zu</sub>]

Beide Faktoren lassen sich auf unterschiedliche Art beeinflussen. Die Ansatzpunkte hierzu ergeben sich prinzipiell bereits durch die Verfahrensart der Abwasserreinigung, die einen wesentlichen Einfluss auf den Schlammanfall hat. Die Ausbeute an Faulgas hängt dagegen maßgeblich von den Prozessen der Schlammbehandlung ab, wozu die eigentliche Fermentation und auch die Vorbehandlung oder Voreindickung gehören. Zusammenfassend ergeben sich die in Bild 4.1 dargestellten Teilpunkte. Diese Faktoren werden im Weiteren beschrieben und verfahrenstechnische oder betriebliche Möglichkeiten zur Einflussnahme dargestellt. Anschließend werden Auswirkungen auf den Gasertrag und realistische Kombinationen der Ansätze zusammengefasst und die Umsetzbarkeit bewertet.

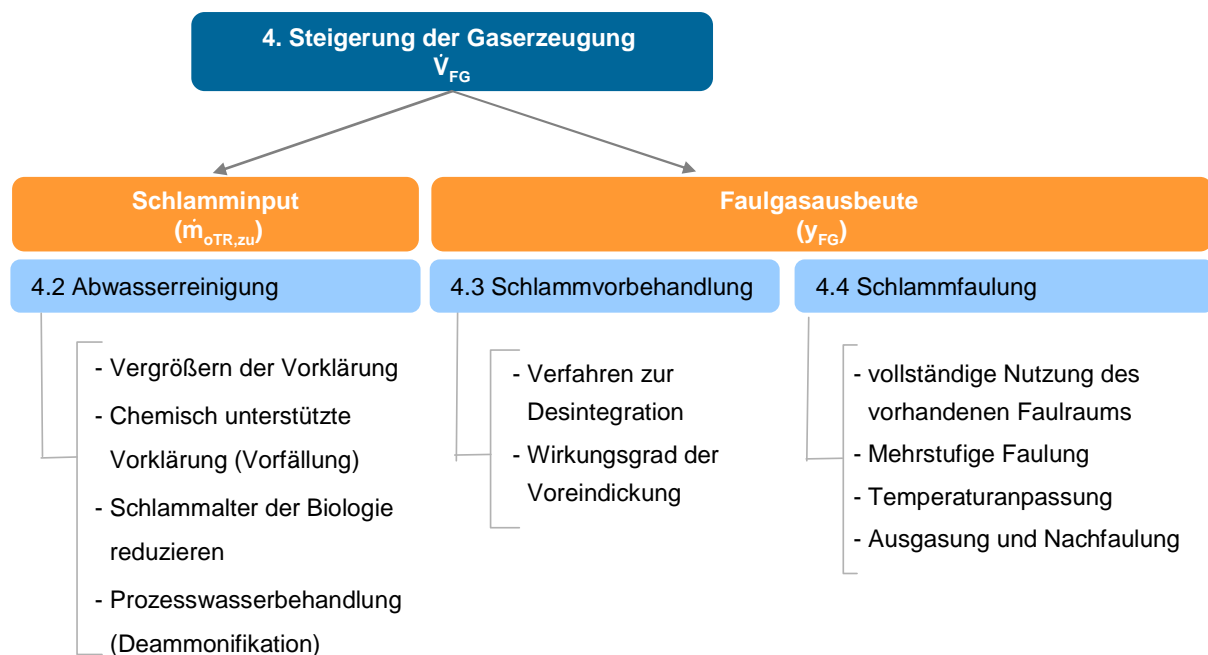


Bild 4.1: Ansatzpunkte zur Steigerung des Faulgasertrags

## 4.1 Faulgaserzeugung durch Integration einer Schlammfäulung

### Beschreibung

Die Art der Schlammstabilisierung hat einen erheblichen Einfluss auf den Energiehaushalt einer kommunalen Kläranlage (siehe Kapitel 2). Die im Rohabwasser bzw. Klärschlamm gespeicherte Primärenergie ( $y_{ep,max} = 153 \text{ kWh/EW/d}$ ) kann bei einer aeroben Schlammstabilisierung nur unzureichend genutzt werden. Durch die Integration einer Schlammfäulung wird die gespeicherte Energie dagegen anaerob aufgeschlossen und in nutzbares Faulgas bzw. Methan überführt.

Damit die Umstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung allerdings wirtschaftlich durchgeführt werden kann, muss der Nutzen infolge des verbesserten Energiehaushaltes größer sein als die anfallenden Kosten der Umstellung. Die Kosten ergeben sich dabei hauptsächlich aus den Baumaßnahmen, welche zur Integrierung der erforderlichen Anlagenstruktur erforderlich sind. Wie Bild 4.2 zeigt, gehören hierzu nicht nur die Faulbehälter, sondern auch die Gasnutzungsaggregate und Vorklärbecken.

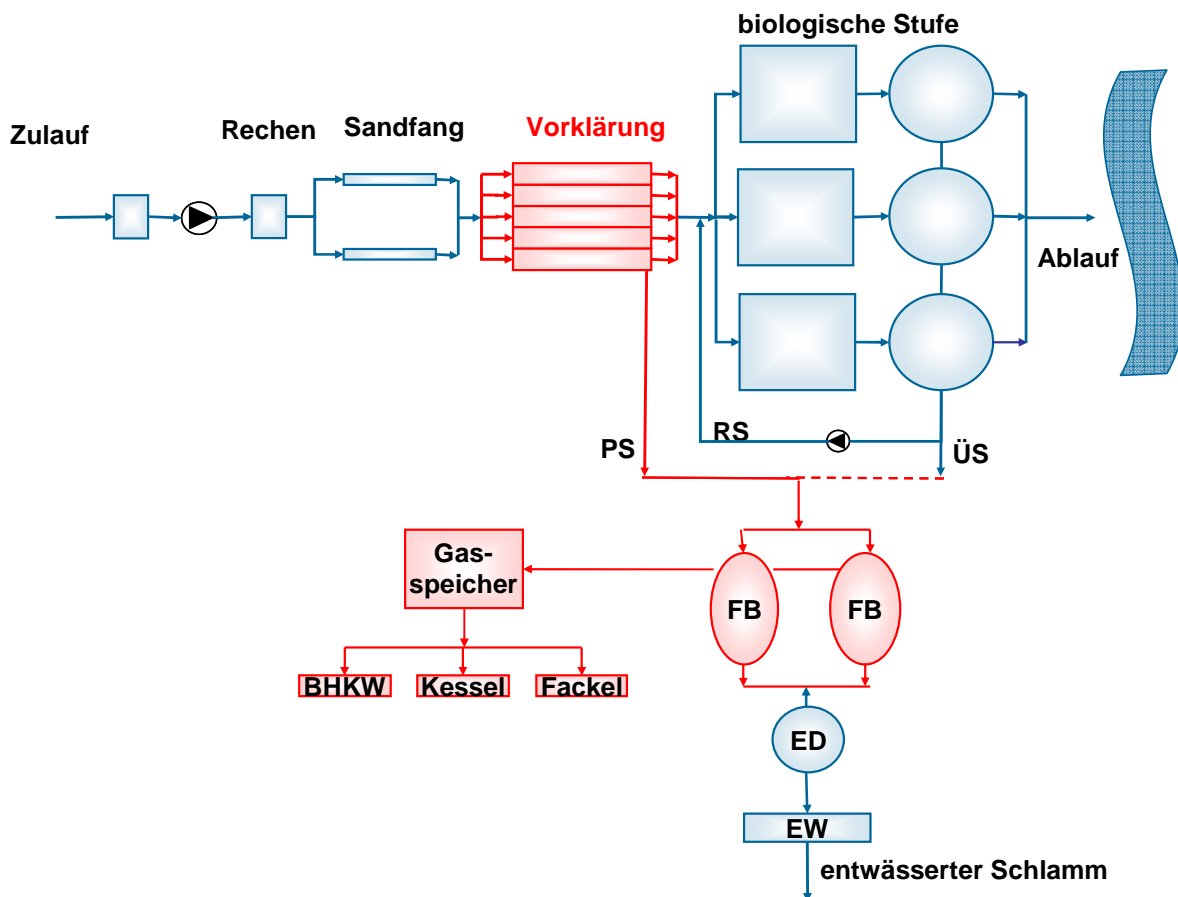


Bild 4.2: Notwendige Umbaumaßnahmen bei Umstellung der Schlammstabilisierung

Die Grenze für einen wirtschaftlichen Einsatz der Schlammfäulung auf kommunalen Kläranlagen lag in der Vergangenheit bei einer Anlagengröße von etwa 50.000 EW. Der kontinuierliche Anstieg der Energiekosten während der letzten Jahre, die technische Weiterentwicklung im Bereich der Schlammfäulung und Faulgasnutzung sowie veränderte gesetzliche Rahmenbedingungen haben dazu geführt, dass die Wirtschaftlichkeit für die Verfahrensumstellung heute bereits bei etwa 20.000 EW gesehen wird (Gretzschel et al., 2011).

### **Technische Realisierung**

Zur Umstellung der Schlammstabilisierung von gemeinsamer aerober Stabilisierung auf eine Schlammfäulung sind im Wesentlichen folgende Teilschritte notwendig:

- Errichtung einer Vorklärung samt Primärschlammumpwerk
- Vermeidung der simultanen aeroben Schlammstabilisierung
- Errichtung eines Faulbehälters
- Errichtung einer Gasspeicherung und -verwertung

Bei der Errichtung einer Vorklärung sollte zur Kosteneinsparung, soweit möglich, vorhandene Anlagenstruktur genutzt werden. Beispielhaft kann hierzu Belebungsbeckenvolumen, das bei der Umstellung durch eine Verringerung des Schlammalters verfügbar wird, umfunktioniert werden. So bedingt die Verfahrensumstellung eine Reduzierung des Schlammalters in der Biologie von etwa 25 d auf 10 bis 15 d. Des Weiteren werden die Zulauffrachten zur Biologie durch eine Vorklärung erheblich verringert. Das einwohnerspezifische Belebungsbeckenvolumen reduziert sich hierdurch von ca. 300 bis 400 l/EW auf Werte zwischen etwa 150 und 200 l/EW, so dass nach der Umstellung überschlägig 50 % des vorhandenen Beckenvolumens  $V_{BB}$  nicht mehr benötigt werden.

Eine Checkliste und entsprechende Kostenfunktionen für die einzelnen Bestandteile der Verfahrensumstellung können dem Abschlussbericht des Projektes „Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmendbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz“ (NAwaS) entnommen werden (Gretzschel et al., 2011).

Grundlage dieser Kostenfunktionen sind spezifische Preise aus neuen Ausschreibungsergebnissen, die in Abhängigkeit der Kläranlagenausbaugröße ausgewertet wurden. In Kombination mit einer Sensitivitätsanalyse in Bezug auf steigende Energie- und Entsorgungskosten, liefert diese Auswertung die Möglichkeit die Wirtschaftlichkeitsgrenze der Verfahrensumstellung individuell auszulesen.

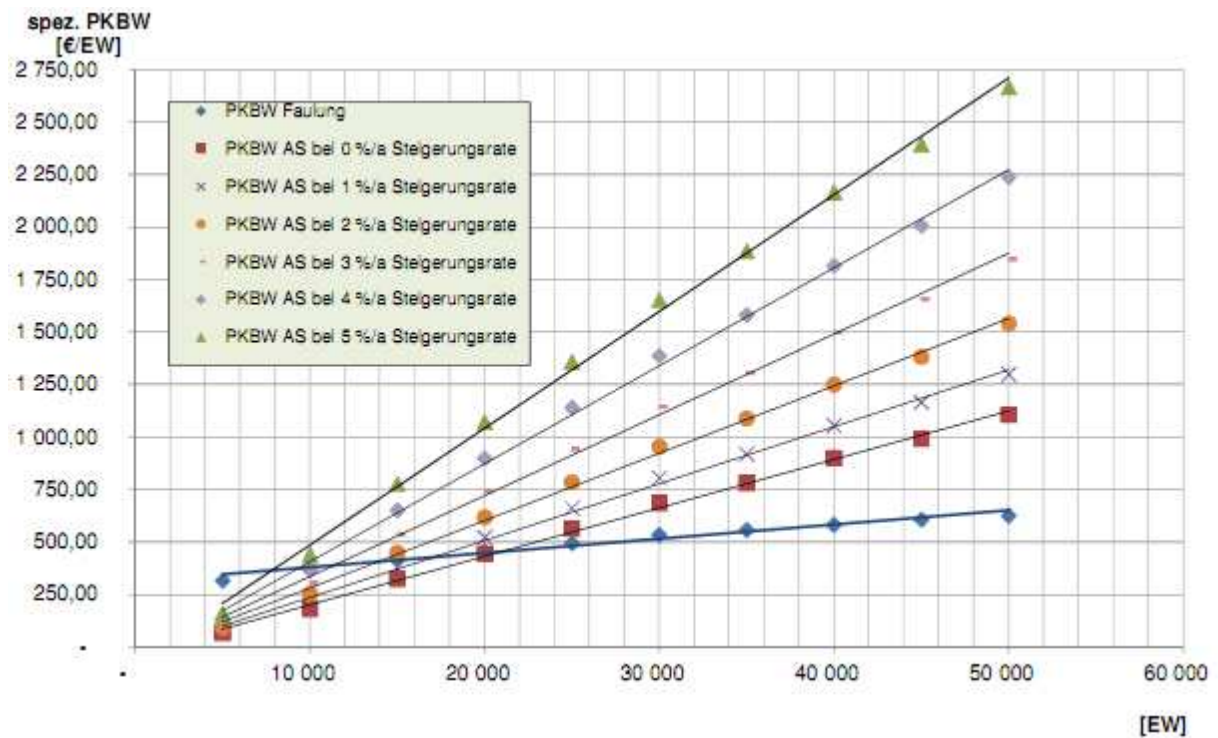


Bild 4.3: Vergleich der Projektkostenbarwerte von Schlammfäulung und aerober Stabilisierung bei steigenden Betriebskosten (Stromkosten) und einem festen Zinssatz von  $i = 4,0\%$  (Gretschel et al., 2010)

### Auswirkungen auf den Gasertrag

Die anaerobe Stabilisierung ist, im Gegensatz zur aeroben Stabilisierung, grundsätzlich dazu geeignet, das Energiepotenzial im Abwasser für die Abwasserbehandlung nutzbar zu machen. Durch die Verkürzung des Schlammalters wird ein geringerer Anteil der im Abwasser enthaltenen Organik aerob veratmet und kann unter anaeroben Bedingungen im Faulbehälter zu einem energiereichen Produkt (Faulgas) umgewandelt werden. Hierzu zeigen die nachfolgenden Bilder vergleichend eine Energiebilanz der beiden Verfahrensansätze.

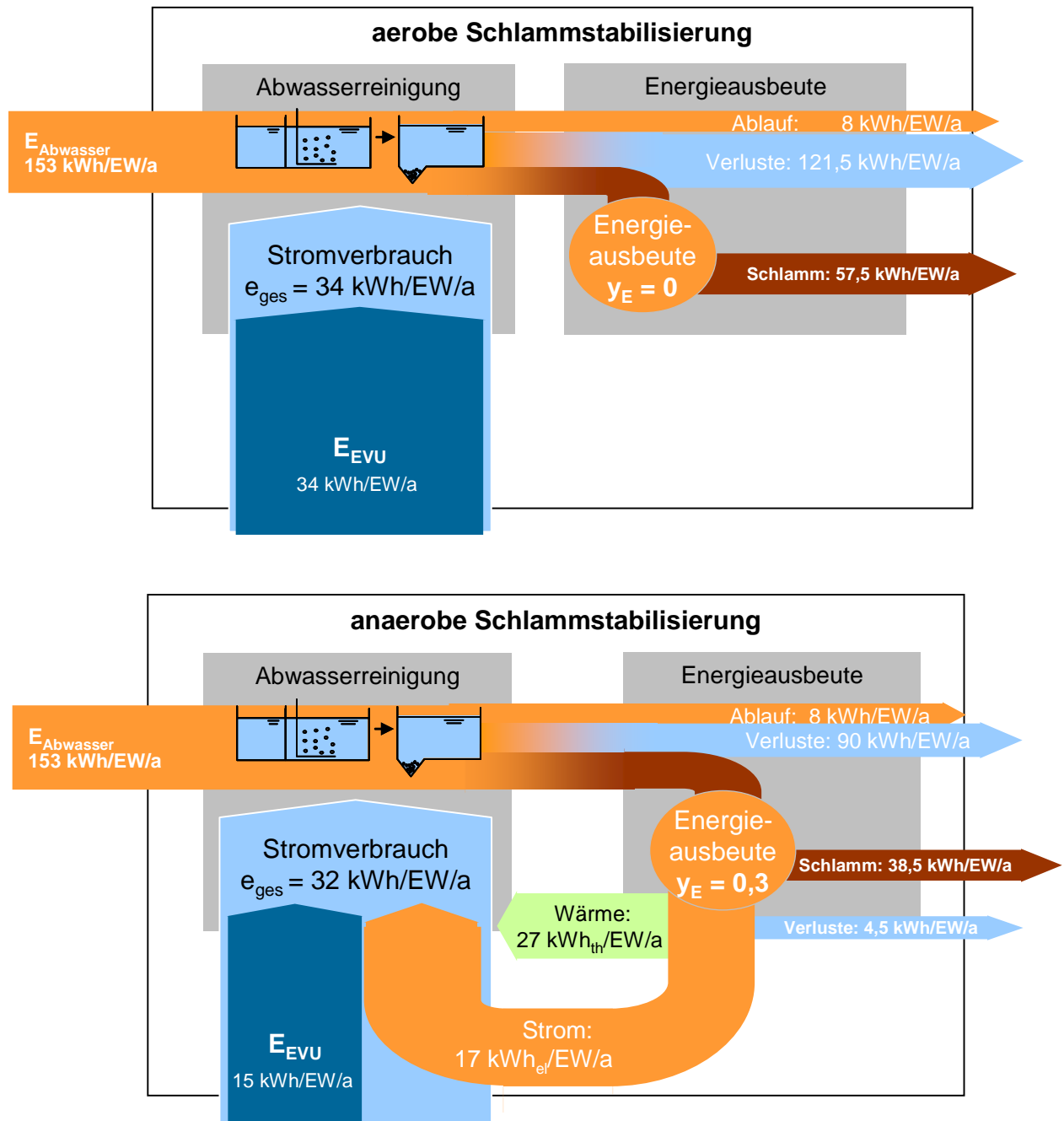


Bild 4.4: Vergleich der Energiebilanz einer aeroben und einer anaeroben Schlammstabilisierung

## 4.2 Steigerung der Faulgaserzeugung durch Beeinflussung des Schlammmanfalls

Die organische Schlammfracht der bei der Abwasserreinigung anfallenden Schlämme ergibt sich dabei aus dem Schlammvolumen, dem Feststoffanteil und dem Organikanteil gemäß nachfolgender Formel:

$$\dot{m}_{oTR,zu} = Q_{Schl} \cdot TR_{Schl} \cdot GV_{Schl}$$

mit:

$\dot{m}_{oTR,zu}$	= organische Fracht im Zulauf zur Faulung	[kg oTR <sub>Schl</sub> /d]
$Q_{Schl}$	= Schlammvolumen im Zulauf zur Faulung	[m <sup>3</sup> /d]
$TR_{Schl}$	= Feststoffgehalt im Zulauf zur Faulung	[kg/m <sup>3</sup> ]
$GV_{Schl}$	= Glühverlust (Organikanteil) im Zulauf zur Faulung	[%]

Das zufließende Rohwasser hat über Temperatur, pH-Wert oder den Gehalt an Tensiden und Emulgatoren bereits erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften der Schlämme. Im Wesentlichen bestimmen jedoch das Abwasserreinigungsverfahren und die eingesetzten Verfahrenstechniken den Schlammmanfall. Über die Größe der Vorklärung, das Schlammalter und die Bewirtschaftung bzw. Behandlung von Rückbelastungen können die Schlammmenge und die Schlammqualität dabei beeinflusst werden. Diese Ansatzpunkte sind in Bild 4.5 dargestellt und werden nachfolgend näher erläutert.

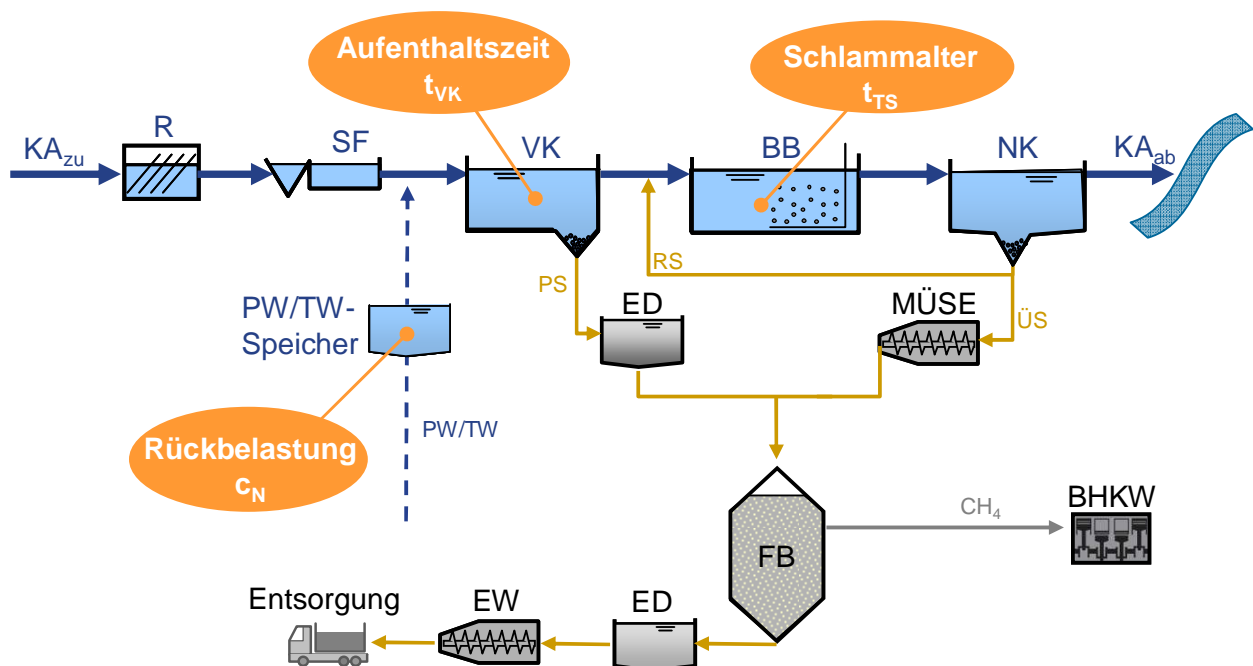


Bild 4.5: Untersuchte Einflussfaktoren der Abwasserreinigung auf den Schlammmanfall

### 4.2.1 Vergrößern der Vorklärung

#### Beschreibung

In der Vorklärung werden ungelöste partikuläre Stoffe (AFS) sedimentiert und anschließend als Primärschlamm (PS) der Schlammbehandlung zugeführt. Die Abscheideleistung der Vorklärung bestimmt dabei die Menge des anfallenden Primärschlammes. Die sedimentierten Stoffe sind in der Regel biologisch gut abbaubar. Proportional zur Abscheideleistung der Vorklärung steigt daher die Menge an abbaubaren organischen Stoffen in der Schlammfäulung und somit die Faulgaserzeugung. Für einen optimierten Gasertrag ist somit grundsätzlich eine gute Abscheideleistung in der Vorklärung zu empfehlen. Mit der erhöhten Entnahme abfiltrierbarer Stoffe und damit auch partikulärer organischer Substanz verändert sich allerdings das C/N-Verhältnis im Zulauf der Belebung. Dies ist im Hinblick auf die geforderte Stickstoffelimination zu beachten.

Der Abscheidegrad der Vorklärung hängt im Wesentlichen von der Aufenthaltszeit  $t_{VK}$  des Abwassers in der Vorklärung ab. Die Aufenthaltszeit des Rohabwassers wird dabei auf den maximalen Trockenwetterzufluss  $Q_{t,2hmax}$  bezogen. Maßgebend für die Aufenthaltszeit des zufließenden Rohabwassers in der Vorklärung ist damit das Volumen  $V_{VK}$ .

$$t_{VK} = \frac{V_{VK}}{Q_t}$$

mit:	$t_{VK}$	=	Durchflusszeit des Abwassers in der Vorklärung	[h]
	$V_{VK}$	=	Nutzvolumen des Vorklärbeckens	[m <sup>3</sup> ]
	$Q_t$	=	Trockenwetterzufluss	[m <sup>3</sup> /h]

#### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Die Vorklärbecken werden anhand der Aufenthaltszeit je nach Anforderung unterschiedlich bemessen. Bei Tropf- oder Tauchkörperverfahren zur nachfolgenden Abwasserreinigung ist eine weitgehende Abtrennung der Feststoffe erwünscht. Die Aufenthaltszeit sollte in diesem Fall nicht weniger als 1,5 - 2,5 h betragen. Bei Belebungsverfahren mit vorgeschalteter Denitrifikation benötigt allerdings die Denitrifikation ausreichend organische Verbindungen, daher wird in der Regel eine kürzere Durchflusszeit von 0,5 - 1,0 h angesetzt.

Typische Werte für die Abscheideleistung in Abhängigkeit der Aufenthaltszeit sind im Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 (2000) und dem Merkblatt ATV-DVWK-M 368 (2003) genannt. Diese Werte sind allerdings empirisch ermittelt und beruhen auf den Ergebnissen verschiedener Versuchsreihen, die in Kennlinien für die Entnahmeleistung zusammengefasst wurden. Der Zusammenhang zwischen Aufenthaltszeit (Absetzzeit) und Anteil der

abgesetzten Stoffe (Schlammanfall) wird allgemein anhand der Absetzkurven nach Sierp (ATV, 1996) beschrieben (Bild 4.6).

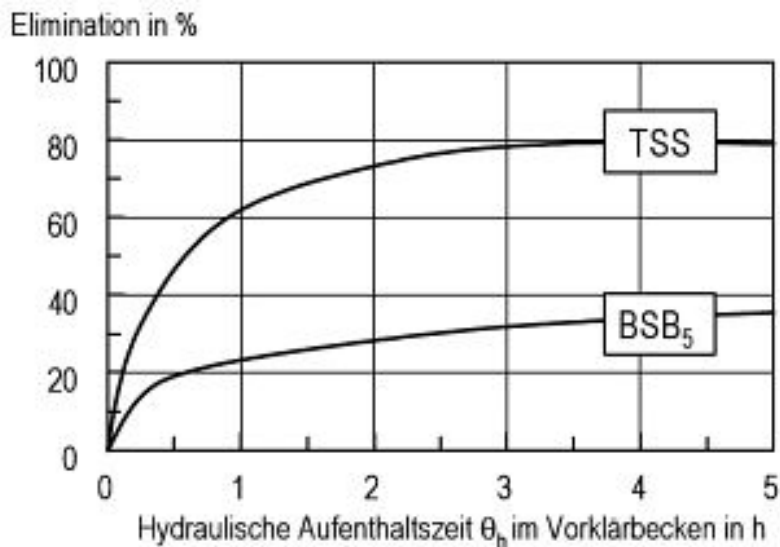


Bild 4.6: Abhängigkeit der Absetzleistung von der Absetzzeit nach Sierp (Imhoff, 1999)

Basierend auf den Absetzkurven nennt das Merkblatt ATV-DVWK-M 368 beispielhaft Eliminationsraten für die Parameter CSB und BSB in Höhe von 17 bis 33 %. Bezogen auf die Feststoffe liegt die Eliminationsrate bei 43 bis 57 % (Bild 4.7).

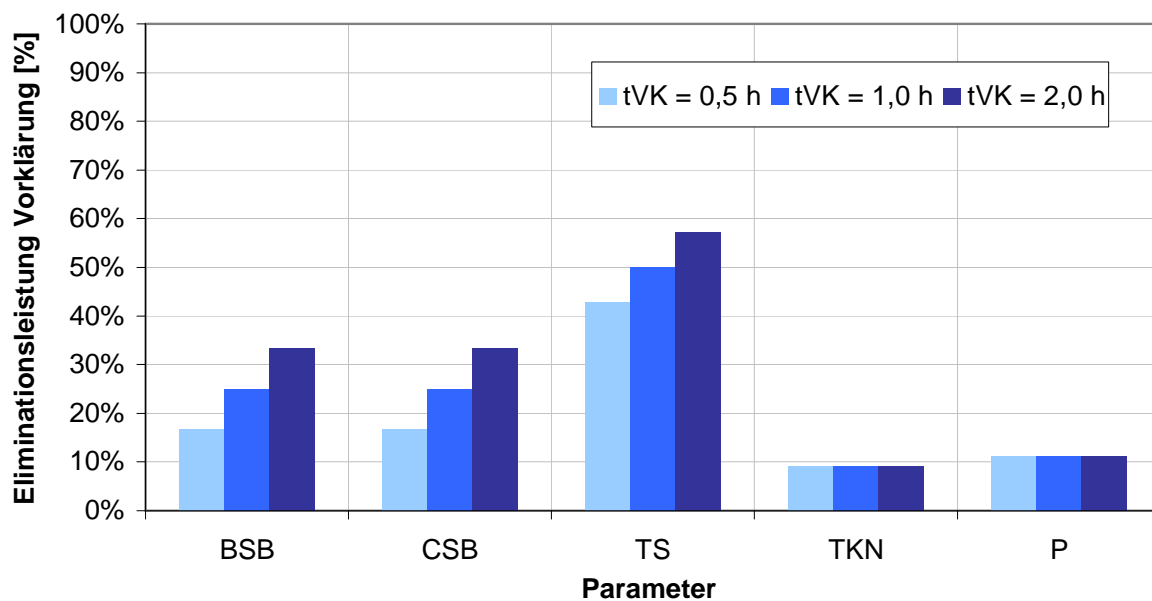


Bild 4.7: Eliminationsleistung der Vorklärung gemäß DWA-M-368



### Auswirkungen auf den Gasertrag

Die Auswirkungen unterschiedlicher Vorklärzeiten auf den Gasertrag können anhand der zuvor dargestellten Abscheideleistungen ermittelt werden. So werden von den Feststoffen im Zulauf zur Kläranlage (70 g TS/E/d) bei einer Vorklärdauer von 0,5 Stunden gemäß Bild 4.7 ca. 42 % entnommen, d.h. rund 30 g TS/E/d werden als Primärschlamm abgezogen. Bei einer Aufenthaltszeit von 2,0 Stunden steigt die Entnahmeleistung auf 57 %, womit im Primärschlamm 40 g TS/E/d gebunden sind.

Die oTR-Fracht im Primärschlamm kann in Verbindung mit den Abscheideleistungen und einem mittleren Organikanteil von 70% für verschiedene Aufenthaltszeiten ermittelt werden. Darauf aufbauend ergibt sich unter Ansatz eines üblichen CSB/oTR-Verhältnisses des Primärschlammes von 1,8 eine CSB-Fracht in Abhängigkeit der Vorklärzeit von 38 bis 50 g CSB/(E\*d). Bei einem CSB-Abbau des Primärschlammes von 55 % und einem Methanertrag von 350 l CH<sub>4</sub>/kg CSB (vgl. Kapitel 2.1) ergibt sich hieraus eine Faulgasausbeute (65 % Methan) in Höhe von 11,2 bis 14,6 l<sub>N</sub>/(E\*d).

Der Gasertrag aus dem Überschussschlamm ergibt sich entsprechend aus der Schlammproduktion, die gemäß Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 bei einer Temperatur von 15°C zwischen 30,2 und 56,2 g/E/d liegt, und einem CSB/oTR-Verhältnis des erzeugten Schlammes von 1,45 g CSB/g oTR (ATV-DVWK, 2000). Bei einem CSB-Abbau des Überschussschlammes in der Faulung von 35 % ergibt sich in Abhängigkeit der Vorklärdauer eine Faulgasausbeute von 11,1 bis 6,0 l<sub>N</sub>/(E\*d).

Der Einfluss der Vorklärdauer auf den Gasertrag, der sich aus den Gaserträgen von Primär- und Überschussschlamm zusammensetzt, ist in Bild 4.8 dargestellt.

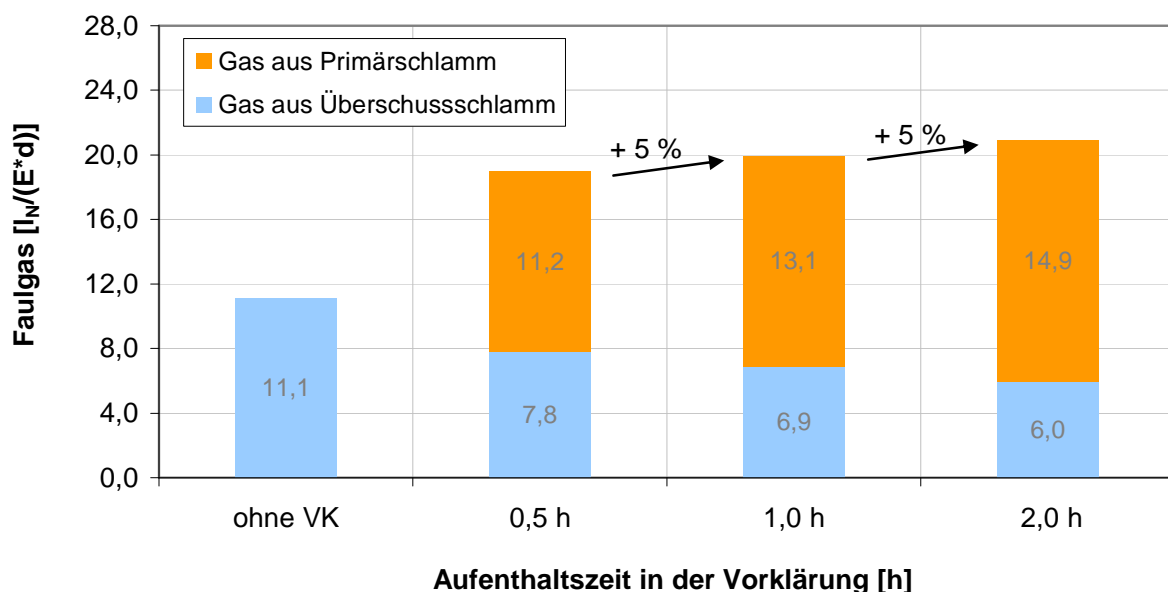


Bild 4.8: Einfluss der Vorklärung auf die Faulgasproduktion ( $t_{TS}=15$  d,  $T=15^{\circ}\text{C}$ )

## 4.2.2 Chemisch unterstützte Vorklärung (Vorfällung)

### Beschreibung

Durch die Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln in die Vorklärung (Vorfällung) wird neben der Phosphorelimination auch die Abscheideleistung in Bezug auf partikuläre organische Abwasserinhaltsstoffe verbessert. Eine Vorfällung ist aus diesem Grund mit einem erhöhten Primärschlammanfall verbunden und kann somit dazu dienen, den Energiehaushalt der Kläranlage zu beeinflussen.

Die negativen Auswirkungen der Vorfällung auf die nachfolgende Schlammbehandlung und die biologische Abwasserreinigung müssen allerdings beachtet werden. So entstehen bei der Fällung stark wasserhaltige Metallhydroxide, die neben dem erhöhten Schlammanfall als Trockenmasse auch das Schlammvolumen steigern und damit die zu behandelnde Schlammmenge überproportional erhöhen. Verglichen mit dem Primärschlamm ohne Chemikaliengabe erweist sich der Fällungsschlamm aus diesem Grund auch als deutlich schlechter entwässerbar. In der Folge entsteht bei Anlagen mit Vorfällung mangels beschwerender Stoffe im Zulauf zum Belebungsbecken zudem ein leichter Belebtschlamm mit verlangsamten Absetz- und Eindickeigenschaften (Eawag, 2008).

Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass trotz der Vorfällung genügend Phosphor in die biologische Stufe gelangt, um das Biomassewachstum nicht zu limitieren und das C/N-Verhältnis weiterhin für das Ziel der Stickstoffelimination ausreichen muss. Gemäß DWA Arbeitsblatt 202 (DWA, 2011) sollte eine Phosphorkonzentration von 0,7 bis 1,0 mg/l je 100 mg BSB<sub>5</sub>/l im Zulauf zur biologischen Stufe nicht unterschritten werden.

### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Bei der Vorfällung wird das Flockungsmittel in den Zulauf zum belüfteten Sandfang oder direkt in das Vorklärbecken dosiert. In der Literatur wird eine um 30 – 50 % erhöhte Elimination der organischen Fracht in der Vorklärung angegeben, die zu einer um 30 -40 % erhöhten Primärschlammmenge führt (Eawag, 2008).

Weitere Quellen geben erreichbare Eliminationsraten in Höhe von bis zu 83 % bezogen auf die Feststoffe an. Die Einflüsse der Vorfällung auf die Abscheideleistung der Vorklärung im Vergleich zu den konventionellen Abscheideleistungen gemäß ATV-Arbeitsblatt A 131 können zusammengefasst Tabelle 4.1 entnommen werden.

Tabelle 4.1: Prozentuale Abscheideleistung in der Vorklärung in Abhängigkeit der Vorklärdauer bzw. einer Vorfällung

Parameter	Wirkungsgrad Vorklärung nach A131		Wirkungsgrad Vorfällung gemäß Literatur	
	$t_{VK} = 0,75 \text{ h}$	$t_{VK} = 1,75 \text{ h}$	Ghyoot W, Verstraete W. (1997)	Kristensen et al (1992)
BSB	25%	33%	-	62%
CSB	25%	33%	50%	60%
TS	50%	64%	64%	83%
TKN	9%	9%	22%	17%
P	11%	11%	43%	76%

Der Einsatz von Flockungsmitteln hat bereits bei sehr niedrigen Dosierungen einen deutlichen Effekt auf die Entnahmeleistung. Bild 4.9 zeigt hierzu die Abnahme der CSB-Konzentration bei verschiedenen Dosiermengen.

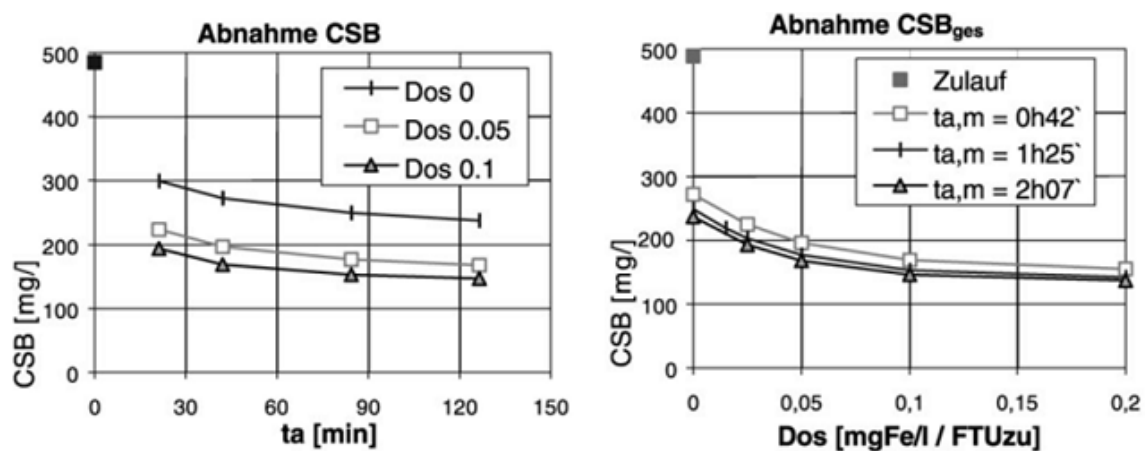


Bild 4.9: Abnahme der CSB-Konzentration bei verschiedenen Flockungsmitteldosierungen bzw. bei verschiedenen Durchflusszeiten (Wolter &amp; Hahn, 2001)

#### Auswirkungen auf den Gasertrag

Im Mittel kann durch chemische Unterstützung der Vorklärung mittels Fällmitteldosierung eine Feststoffentnahme in Höhe von 74 % erreicht werden. Im Vergleich zu einer konventionellen Sedimentation bei 1,0 h Aufenthaltszeit entspricht dies einer Verbesserung der Abscheideleistung um 32,4 %. Bezogen auf die Sedimentation bei einer Vorklärdauer von 2,0 h beträgt die Verbesserung 13,5 %.

Mit zusätzlicher Entnahme der Feststoffe erhöht sich zugleich die Menge an organischer Substanz im Primärschlamm und damit wiederum die anfallende Faulgasmenge. Der Einfluss einer Vorfällung auf den Gasertrag, der sich aus den Gaserträgen von Primär- und Überschussschlamm zusammensetzt, ist in Bild 4.10 dargestellt.

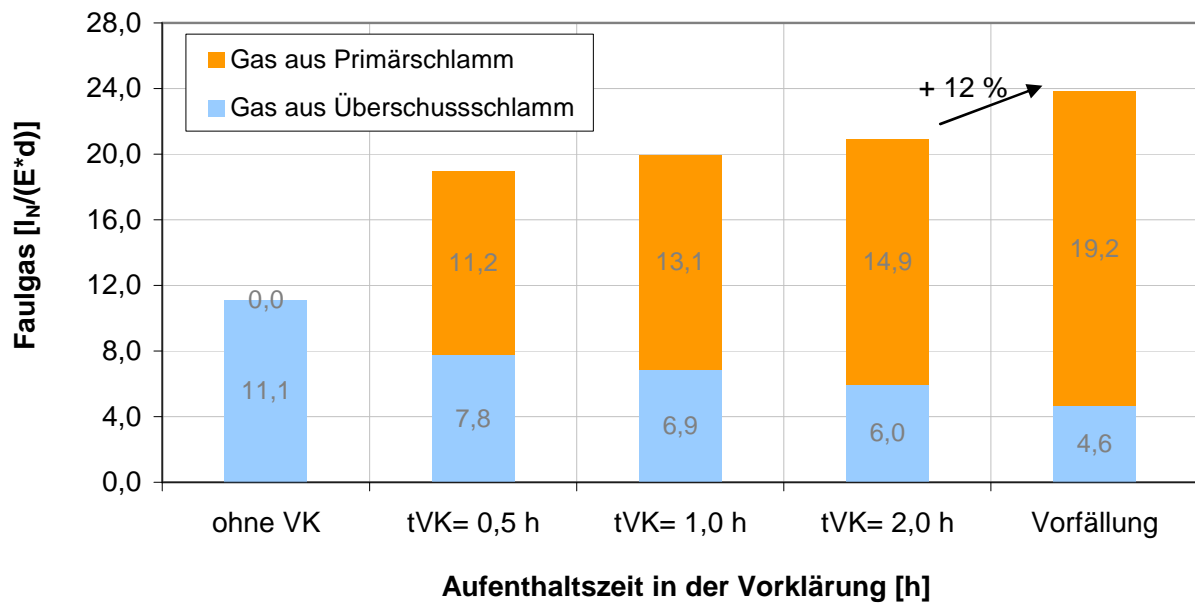


Bild 4.10: Rechnerisch erreichbarer Gasertrag bei Vorfällung im Vergleich zu den Erträgen bei einfacher Sedimentation mit verschiedenen Aufenthaltszeiten

### 4.2.3 Reduzierung des Schlammalters

#### Beschreibung

Der Anteil an aktiver Biomasse im Überschussschlamm ist maßgeblich vom Schlammalter der biologischen Stufe abhängig. Je höher das Schlammalter, desto mehr Biomasse wird durch endogene Veratmung bereits im Belebungsbecken abgebaut bzw. mineralisiert. Das Schlammalter ( $t_{TS}$ ) entspricht dabei der mittleren Schlammaufenthaltszeit im Belebungsbecken. Es hängt von der Größe der Belebungsbecken ( $V_{BB}$ ), der Belebtschlammkonzentration ( $TS_{BB}$ ) sowie vom Schlammwachstum bzw. der Überschussschlammproduktion ab.

$$t_{TS} = \frac{V_{BB} \cdot TS_{BB}}{\dot{U}S_d}$$

mit:	$V_{BB}$	=	vorhandenes Volumen der biologischen Stufe	[m <sup>3</sup> ]
	$TS_{BB}$	=	Belebtschlammkonzentration	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$\dot{U}S_d$	=	tägliche Überschussschlammproduktion	[kg/d]

Das Schlammalter hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Organik im abgezogenen Überschussschlamm. Bei Anlagen mit sehr niedrigem Schlammalter ( $t_{TS} < 5$  Tage) beträgt der oTR-Gehalt des Überschussschlammes im Mittel rund 75 % (ATV-DVWK, 2003). Bei einem hohen Schlammalter ( $t_{TS} > 15$  Tage) werden die leicht abbaubaren Organikanteile bereits im Belebungsbecken mineralisiert, wodurch der oTR-Gehalt im Überschussschlamm abnimmt (oTR-Gehalt = 70%) und eine weitere Umsetzung in der anaeroben Stufe erschwert wird.

Die anaerobe Abbaubarkeit des Überschussschlammes hängt somit maßgeblich vom Schlammalter der biologischen Stufe ab. Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführte Datenauswertung hat ergeben, dass häufig trotz getrennter anaerober Stabilisierung zu hohe Schlammalter in der Biologie gefahren werden, d.h. das Schlammalter liegt über dem rechnerisch erforderlichen Wert zur Sicherstellung einer ausreichenden Stickstoffelimination (vgl. Tabelle 3.4). Es ist zu berücksichtigen, dass durch ein Herabsetzen des Schlammalters und dem damit verbundenen Anstieg der Überschussschlammmenge zusätzliche Kapazitäten im Überschussschlammumpwerk und in der –eindickung erforderlich werden.

#### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Das erforderliche Schlammalter wird durch das Reinigungsziel, die Abwassertemperatur und die Kläranlagengröße bestimmt. Das Bemessungsschlammalter nach ATV-DVWK-A 131 liegt bei aeroben Stabilisierungsanlagen mit Stickstoffelimination bei mindestens 25 Tagen und bei Anlagen mit Schlammfäulung bei etwa 10 bis 15 Tagen. Es errechnet sich zu:

$$t_{TS,Bem} = SF \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-T)} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{V_D}{V_{BB}}\right)}$$

mit:	$t_{TS,Bem}$	= erforderliches Mindestschlammalter nach A131	[d]
	$SF$	= Sicherheitsfaktor	[-]
	$T$	= Temperatur im Belebungsbecken	[°C]
	$V_D$	= Denitrifikationsvolumen (unbelüftet)	[m <sup>3</sup> ]
	$V_{BB}$	= Nitrifikationsvolumen (belüftet)	[m <sup>3</sup> ]

In Bild 4.11 ist das Bemessungsschlammalter für eine vorgeschaltete Denitrifikation bei einem Verhältnis von  $V_D/V_{BB}=0,5$  in Abhängigkeit der Temperatur und des Sicherheitsfaktors dargestellt. Es zeigt sich, dass im Vergleich zu den für Kläranlagen mit Schlammfäulung in NRW ermittelten mittleren Schlammaltern (vgl. Tabelle 3.4) bei Temperaturen größer 10 °C ein Optimierungspotential besteht. Bei niedrigeren  $V_D/V_{BB}$ -Verhältnissen erhöht sich das Optimierungspotential weiter.

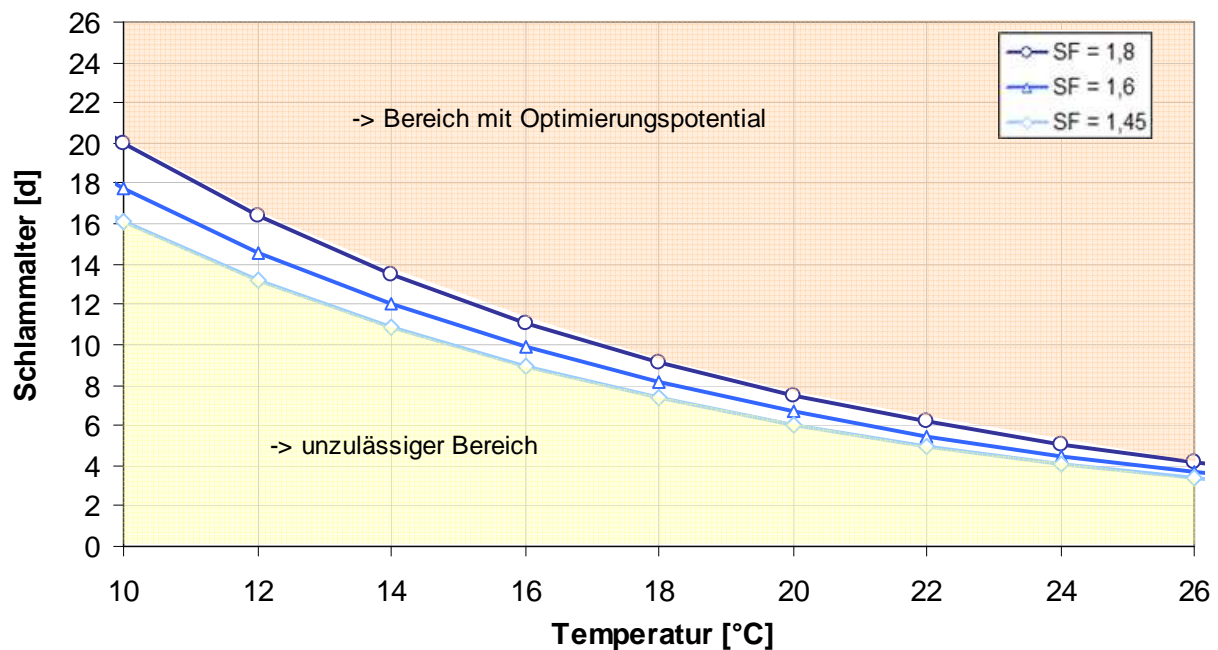


Bild 4.11: Bemessungsschlammalter im Belebungsbecken nach ATV-DVWK-A 131 für eine vorgeschaltete Denitrifikation,  $V_{DN}/V_{BB}=0,5$  und unterschiedliche Schwankungsfaktoren

### Auswirkungen auf den Gasertrag

Aus energetischen Gründen sollte das Schlammalter soweit zulässig (vgl. Bild 4.11) reduziert werden. Die Absenkung führt zu einem Anstieg des oTR-Gehaltes und damit zu einem potentiell energiereicheren Schlamm.

Die Auswirkungen einer Reduzierung des Schlammalters auf den einwohnerspezifischen Gasanfall ist in Bild 4.12 beispielhaft für eine Vorklärdauer von einer Stunde und eine Abwassertemperatur von 15°C dargestellt. Durch die Absenkung des Schlammalters im Belebungsbecken von 15 auf 10 Tage erhöht sich die Faulgasproduktion demnach um etwa 3,5 %.

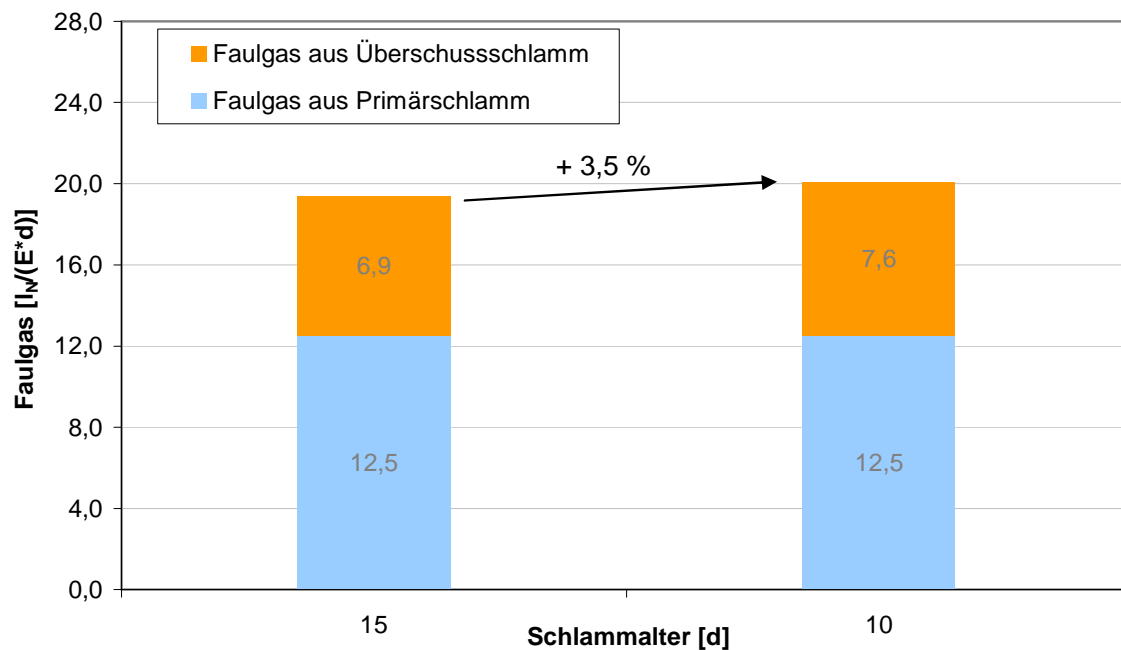


Bild 4.12: Auswirkung des Schlammalters auf den Gasertrag ( $t_{VK}=1h$ ,  $T=15^{\circ}C$ )

#### 4.2.4 Prozesswasserbehandlung / Deammonifikation

##### Beschreibung

Die im Rohschlamm enthaltene organische Substanz wird im Faulbehälter aufgeschlossen und zum Teil in Faulgas überführt. Durch die Hydrolyse von organisch gebundenem Stickstoff steigt hierbei die Ammoniumkonzentration im Schlammwasser an. Über die Prozesswässer der Schlammwässerung gelangt dieser Stickstoff in die biologische Stufe und muss dort nitrifiziert und denitrifiziert werden. Insbesondere bei Kläranlagen mit ungünstigem C/N-Verhältnis im Zulauf zur Belebung oder bei Verbundkläranlagen mit einem hohen Stickstoff-Import aus angelieferten externen Klärschlämmen kann es durch die Rückbelastung zu einem Überschreiten des Denitrifikationspotentials kommen.

##### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Statt eines Einsatzes externer Kohlenstoffträger zur Unterstützung der Denitrifikation in der biologischen Stufe bietet sich eine separate Stickstoffelimination aus den hoch mit Stickstoff belasteten Prozesswässern der Schlammbehandlung an. Hierzu stehen verschiedene verfahrenstechnische Ansätze zur Verfügung, die sich unter energetischen Gesichtspunkten unterscheiden.

	Nitrifikation / Denitrifikation	Nitritation / Denitritation	Deammonifikation
Sauerstoffbedarf [g O <sub>2</sub> / g N]	4.57	3.43	1.94
Kohlenstoffbedarf [g CSB/ g N]	2.86	1.71	0
CO <sub>2</sub> -Emissionen [g CO <sub>2</sub> / g N]	5.76	4.72	3.40
Schlammanfall [g TS/ g N]	1 – 1.2	0.8 – 0.9	< 0.1
Energiebedarf [kWh / kg N]	3.6	2.5	1.5

Bild 4.13: Verfahren und Kennwerte einer Prozesswasserbehandlung (Volcke, 2006; Beier et al., 2008)

Die herkömmliche Stickstoffelimination über Nitrifikation und Denitrifikation verbraucht etwa 3,6 kWh/kg N. Zudem wird noch ein organisches Substrat zur Denitrifikation benötigt. Bei dem Verfahren der partiellen Nitritation mit nachfolgender Deammonifikation (u. a. Jardin und Thöle, 2009) kann der im Schlammwasser enthaltene Stickstoff dagegen kohlenstofffrei und bei deutlich verringertem Energiebedarf eliminiert werden. Der Kohlenstoffbedarf der biologischen Stufe wird bei allen Verfahren um den Anteil der Rückbelastung verringert.



### Auswirkungen auf den Gasertrag

Bei Kläranlagen mit ausreichendem C/N-Verhältnis im Zulauf ermöglicht die Reduzierung der Rückbelastung eine Vergrößerung der heute vielfach nur noch als Grobentschlammung betriebenen Vorklärung mit dem Ziel einer erhöhten Kohlenstoffentnahme und einer Steigerung der Faulgasproduktion. Die Energiebilanz der Kläranlage wird verbessert, da dem geringeren Sauerstoffbedarf der biologischen Stufe eine erheblich gesteigerte Strom-eigenproduktion gegenübersteht (Rosenwinkel et al., 2011).

Um den Effekt einer Prozesswasserbehandlung auf den Gasertrag zu ermitteln, wird nachfolgend der Einfluss des verbesserten C/N-Verhältnis auf eine vorgeschaltete Denitrifikation gemäß ATV-DVWK-A 131 bilanziert. Die erforderliche Denitrifikationskapazität errechnet sich im Zulauf der biologischen Stufe als Verhältnis der zu denitrifizierenden Nitratkonzentration ( $S_{NO_3,D}$ ) zu der verfügbaren BSB<sub>5</sub>-Konzentration ( $C_{BSB_5,ZB}$ ). Die Eingangsdaten der Bilanzierung sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Die Höhe der Stickstoffrückbelastung aus dem Prozesswasser entspricht etwa 15 % der Stickstoffkonzentration im Zulauf. Als Reinigungsleistung der Prozesswasserbehandlung (PWB) wird eine Stickstoffelimination von 90 % angenommen. Des Weiteren wird in Abhängigkeit der Vorklärzeit von einer Verringerung der Kohlenstoffbelastung im Zulauf zur biologischen Stufe von 17 bis 33% ausgegangen. Da gemäß ATV-DVWK-A 131 mit verringerter CSB-Konzentration weniger Stickstoff in die Biomasse eingebaut wird, ergibt sich aus der reduzierten Belastung allerdings auch ein Anstieg der zu denitrifizierenden Stickstoffkonzentration.

Tabelle 4.2: Eingangsdaten zur Bilanzierung einer Prozesswasserbehandlung

		Vorklärdauer			
		ohne VK	0,5 h	1 h	2 h
spez. Abwassermenge	[l/E*d]	250			
$B_{d,BSB_5,VKab}$	[g/(E*d)]	60	50	45	40
$B_{d,CSB,VKab}$	[g/(E*d)]	120	100	90	80
$B_{d,TS,VKab}$	[g/(E*d)]	70	40	35	25
$B_{d,TKN,VKab}$	[g/(E*d)]	11	10	10	10
$B_{d,TKN,Prozesswasser}$	[g/(E*d)]	1,65	1,65	1,65	1,65
$C_{BSB_5,BBzu}$	[mg/l]	240	200	180	160
$C_{CSB,BBzu}$	[mg/l]	480	400	360	320
$C_{TS,BBzu}$	[mg/l]	280	160	140	100
$C_{TKN,BBzu}$ (ohne PWB)	[mg/l]	51	46	46	46
$C_{TKN,BBzu}$ (mit PWB)	[mg/l]	45	41	41	41

Aus der Berechnung nach ATV-DVWK-A 131 unter Ansatz von Standardwerten für die Ablaufkonzentrationen ergibt sich in Abhängigkeit der Vorklärzeit eine errechnete Denitrifikationskapazität ( $S_{\text{NO}_3,\text{D}}/C_{\text{BSS},\text{ZB}}$ ) in Höhe von 0,12 bis 0,2 ohne Prozesswasserbehandlung und 0,09 bis 0,16 mit Prozesswasserbehandlung. Anhand der Denitrifikationskapazität können Richtwerte für die Bemessung der Denitrifikation bei Trockenwetter und Temperaturen von 10 bis 12°C abgeleitet werden. So entspricht ein N/C-Verhältnis von 0,15 einem Denitrifikationsanteil von 50% ( $V_{\text{D}}/V_{\text{BB}} = 0,5$ ). Dieses Verhältnis wird ohne Prozesswasserbehandlung bereits bei einer Aufenthaltszeit in der Vorklärung von 0,5 Stunden überschritten. Demnach ist schon für Anlagen mit Faulung und vorgeschalteter Denitrifikation, die einen Standardzulauf nach A 131 aufweisen, rechnerisch nur eine Grobentschlammung möglich (Tabelle 4.3). Die Integrierung einer Prozesswasserbehandlung ermöglicht dagegen 1,0 bis 2,0 Stunden Aufenthaltszeit in der Vorklärung, womit der Gasertrag von etwa 19,0 l/(E\*d) auf 20,0 bzw. 21,0 l/(E\*d) ansteigt (siehe Bild 4.14).

Tabelle 4.3: Einfluss einer Prozesswasserbehandlung auf die Denitrifikationskapazität bei verschiedenen Vorklärzeiten (vorgeschaltete Denitrifikation)

	ohne PWB		mit PWB	
	$S_{\text{NO}_3,\text{D}}/C_{\text{BSS}}$	$V_{\text{D}}/V_{\text{BB}}$	$S_{\text{NO}_3,\text{D}}/C_{\text{BSS}}$	$V_{\text{D}}/V_{\text{BB}}$
ohne VK	0,12	0,25	0,09	0,2 <sup>1)</sup>
0,5 h	0,13	0,3	0,10	0,2 <sup>1)</sup>
1,0 h	<b>0,15</b>	<b>0,5</b>	0,12	0,25
2,0 h	0,17	nicht zulässig	<b>0,14</b>	<b>0,4</b>

<sup>1)</sup>Denitrifikationsanteil mit mindestens 20 % angesetzt

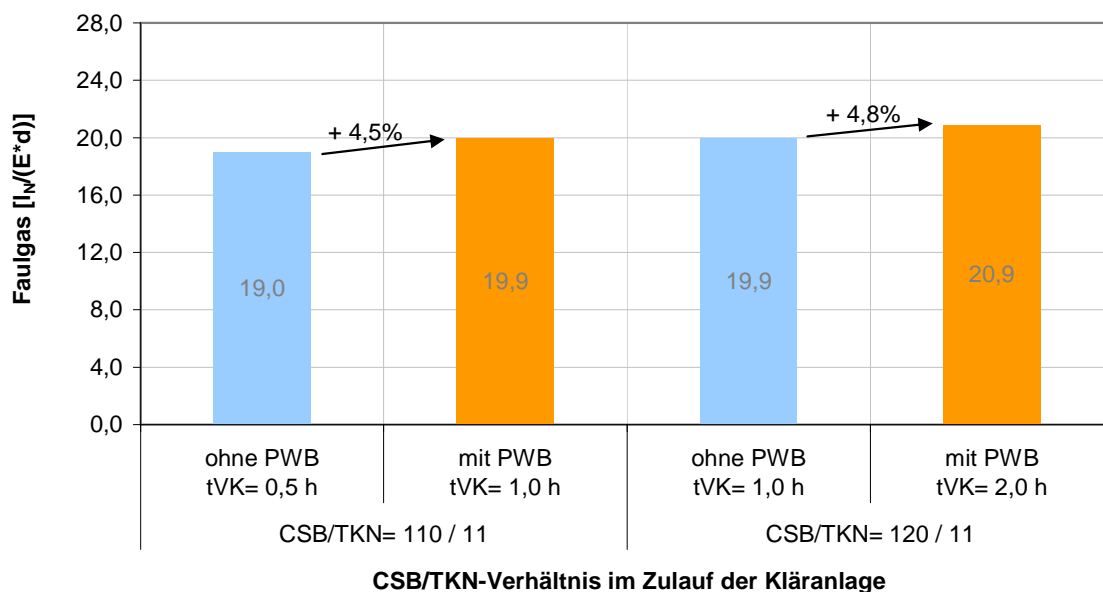


Bild 4.14: Einfluss einer Prozesswasserbehandlung auf die rechnerisch zulässige Vorklärdauer und den resultierenden Gasertrag in Abhängigkeit des C/N-Verhältnis im Zulauf zur Kläranlage

### 4.3 Steigerung der Gasausbeute durch Schlammvorbehandlung

Die Ausbeute an Primärenergie kann durch eine verbesserte Voreindickung und einen Aufschluss der Schlammflocken über extern zugeführte Energie beeinflusst werden. Eine verbesserte Eindickung führt zu einer Volumenreduktion, wodurch Faulraum gespart bzw. die Faulzeit verlängert wird. Der Aufschluss der Schlammflocken (Desintegration) verbessert dagegen die Kinetik des Faulprozesses.

Bei der Umsetzung der Ansätze ist zwischen den Schlammströmen Primär-, Überschuss- oder Misch- bzw. Rohschlamm zu unterscheiden. Die verschiedenen Ansatzpunkte zur Steigerung der Gasausbeute bei der Schlammvorbehandlung sind in Bild 4.15 zusammenfassend dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert.

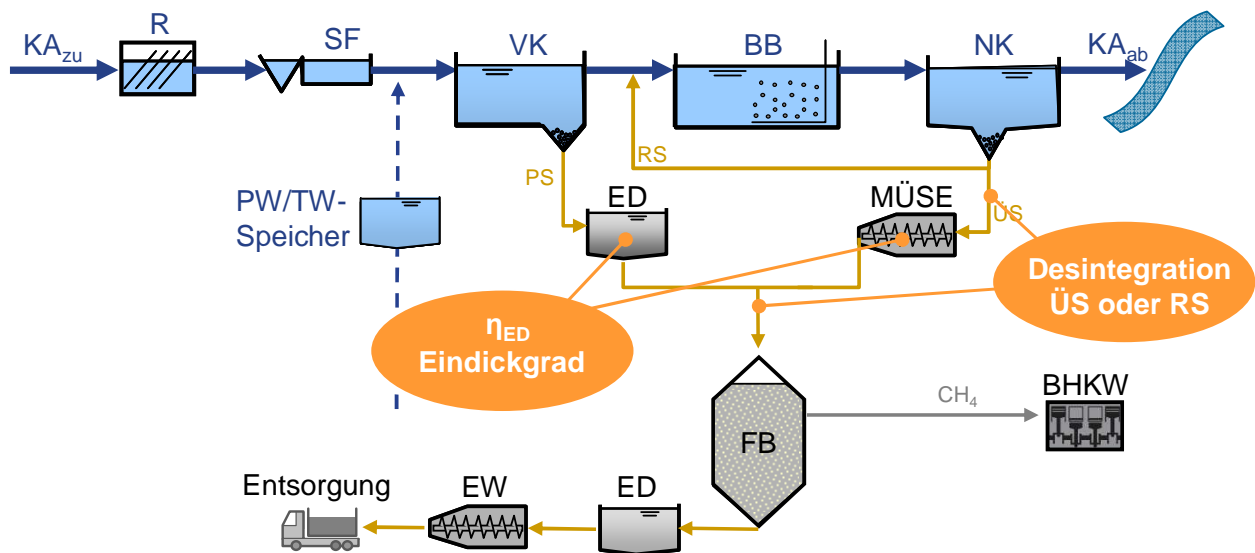


Bild 4.15: Einflussfaktoren bei der Schlammbehandlung auf die Gasausbeute

### 4.3.1 Verbesserter Wirkungsgrad der Voreindickung

#### Beschreibung

Ein hoher Wirkungsgrad der statischen oder maschinellen Voreindickung des Klärschlammes verbessert die Energieausbeute der Schlammbehandlung über die folgenden zwei Faktoren:

- Das Schlammvolumen kann durch eine gute Voreindickung deutlich reduziert werden, wodurch weniger Schlamm aufgeheizt werden muss und somit mehr Faulgas zur Stromerzeugung eingesetzt werden kann.
- Bei gleichem Faulraumvolumen bewirkt eine reduzierte Schlammmenge eine entsprechend verlängerte Verweildauer der aufzuschließenden Feststoffe im Faulraum. Hierdurch ist ein höherer Gasertrag möglich.

In Bild 4.16 ist der Einfluss des Wirkungsgrades der Eindickung auf das Schlammvolumen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Erhöhung des Feststoffgehalts des eingedickten Schlammes von 1,0 %TR auf 2,0 %TR das Schlammvolumen bereits um 50 % reduziert. Ein weiterer Anstieg von 2,0 %TR auf 3,0 %TR bewirkt eine Reduzierung des Volumens um rund 34%. Der relative Einfluss der Eindickung sinkt demnach mit steigendem Eindickgrad ab. Dennoch bewirkt auch eine weitere Erhöhung der Feststoffkonzentration des Rohschlammes von üblicherweise erreichten Werten auf bis zu 5 %TR noch immer eine deutliche Volumenreduktion.

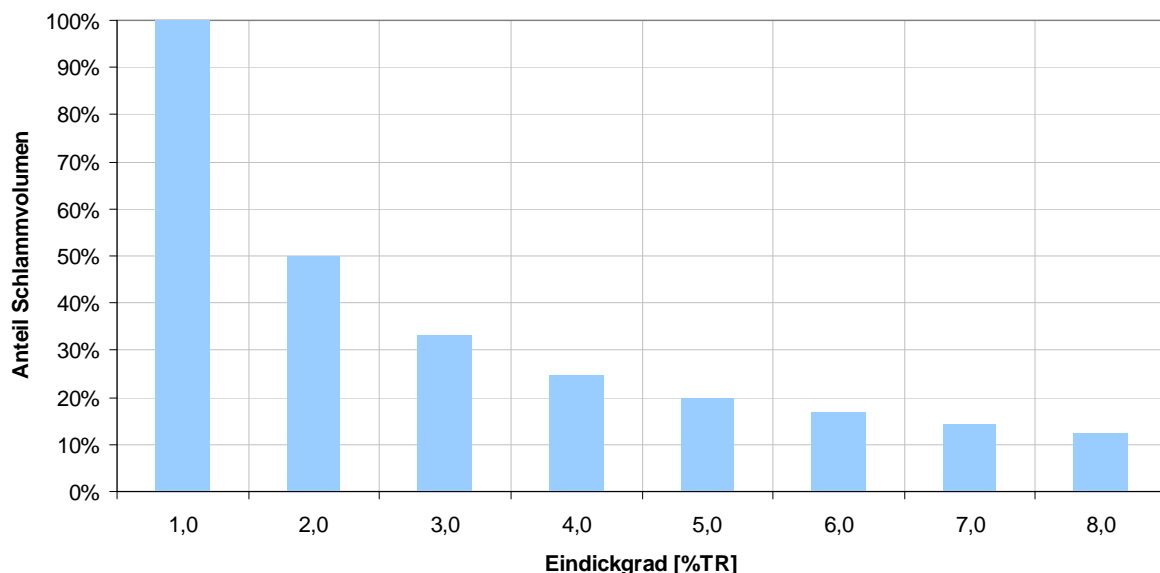


Bild 4.16: Schlammvolumen in Abhängigkeit des Feststoffgehaltes bei gleich bleibender Trockenmasse

### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Bei der Eindickung ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen statischer Eindickung, Flotationsverfahren und maschineller Eindickung (MÜSE). Der maßgebende Faktor zur Beurteilung des Wirkungsgrades dieser Verfahren ist jeweils der Austrags-Feststoffgehalt (%TR). Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist zudem ein Vergleich der benötigten Energie und der erforderlichen Dosiermenge an Flockungshilfsmitteln erforderlich. Entsprechende Kennwerte hierzu können dem DWA Merkblatt M-381 entnommen werden und sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst (ATV-DVWK, 2003).

Es zeigt sich, dass auch bei rein statischer Eindickung grundsätzlich Feststoffgehalte bis zu 10 %TR möglich sind. Allerdings muss aus verfahrenstechnischer Sicht berücksichtigt werden, dass das Pumpen des Rohschlammes sowie das Durchmischen und Heizen der Faulbehälter mit steigendem TR-Gehalt erschwert wird, da die Viskosität des Schlammes überproportional mit dem Feststoffgehalt steigt. In der Praxis sollte die Rohschlammkonzentration daher nicht auf über 8 %TR erhöht werden (Roediger, 1997).

Allgemein lässt sich der Überschussschlamm schlechter eindicken, so dass für Feststoffgehalte über 4 %TR maschinelle Verfahren mit Flockungsmittelzugabe erforderlich werden. Der notwendige Energieeinsatz steigt hierdurch um den Faktor 10 von unter 0,1 kWh/m<sup>3</sup> für die statische Eindickung auf rund 1,0 kWh/m<sup>3</sup> für die MÜSE. Diese zusätzlichen Kosten sind dabei einem erhöhten Gasertrag durch verlängerte Aufenthaltszeit in der Faulung gegenüberzustellen.

Tabelle 4.4: Austrags-Feststoffgehalt [%TR], FHM-Verbrauch und Energieverbrauch verschiedener Eindick-Systeme (ATV-DVWK, 2003)

		Statische Eindickung		Stand-eindicker	Flotation Druck entspannung gsflotation	Maschinelle Eindickung		
		Durchlauf eindicker				Band-/Trommel- Schnecken- /Scheibeneindicker/ Eindickungs-Pumpe	Zentrifuge	
		ohne FHM	mit FHM	ohne FHM	mit FHM			
Primärschlamm	[% TR]	5 - 10	-	5 - 10	-	-	-	-
Mischschlamm	[% TR]	4 - 6	5 - 8	4 - 8	-	-	-	-
ÜS-Schlamm	[% TR]	2 - 3	3 - 4	2 - 3	3 - 5	0,5-3	0,5-3	6,0 - 8,0
spez. FHM- Verbrauch	[kg WS/Mg TS]	0	0,5 - 3	0	0	0,5-3	0	1,0 - 1,5
spez. Energieverbrauch	[kWh/m <sup>3</sup> ]	< 0,1	< 0,1	-	0,6 - 1,2	< 0,2	0,5-3	0,6 - 1,0
spez. Energieverbrauch	[kWh/MgTS]	< 20	< 20	-	100 - 140	< 30	180 - 220	100 - 140

### Auswirkungen auf den Gasertrag

Die Auswirkungen der Schlammverdickung auf den Gasertrag ergeben sich aus dem reduzierten Schlammvolumen. Bei verringertem Volumenstrom zum Faulbehälter steigt die erreichbare Faulzeit. Ein negativer Einfluss des Feststoffgehaltes auf den Verlauf der Schlammfäulung kann bis zu einem Wert von etwa 8 - 10% ausgeschlossen werden (Bischofsberger et al., 2005). Bei höheren Konzentrationen können sich die dann ebenfalls erhöhten Konzentrationen an Ammonium bzw. an freiem Ammoniak allerdings hemmend auf den anaeroben Abbau auswirken.

Der Einfluss auf den Gasertrag wird nachfolgend über die Mittelwerte der Schlamm-Kennwerte im Zulauf zur Faulstufe errechnet, welche über die Betreiberabfrage (Kapitel 3) ermittelt wurden:

- spezifischer Rohschlammanfall: 80 g/EW/d (vgl. Bild 3.8)
- Mittlerer TR-Gehalt Rohschlamm: 4,0 kg/m<sup>3</sup> (vgl. Bild 3.10)
- Spezifischer Schlammanfall: 2,0 l/EW/d

Unter Ansatz eines vorhandenen Faulvolumens von rund 40 l/EW ergibt sich aus den Kennwerten eine Aufenthaltszeit in der Fäulung von 20 Tagen. Unter Verwendung der theoretischen Gaserzeugungskurven in Abhängigkeit der Faulzeit (vgl. Bild 3.20) entspricht dies einer Gasausbeute von 438 m<sup>3</sup><sub>Faulgas</sub>/kg oTR<sub>zu</sub>. Dieser Wert wird als Referenz angesetzt und der Einfluss einer Variation des Eindickgrads von 1 bis 8 %TR auf die Faulzeit und auf den zu erwartenden Gasertrag berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.5 aufgeführt und in Bild 4.17 dargestellt.

Tabelle 4.5: Auswirkung des Feststoffgehaltes auf die Faulzeit und Gasertrag (Annahme: vorhandenes Faulraumvolumen 40 l/EW)

spez. Klärschlammanfall	Eindickgrad	Schlammvolumen	Aufenthaltszeit Faulbehälter	y <sub>Gas</sub> (t <sub>R</sub> )	%-Anstieg-Gasertrag
g/E/d	[%TR]	[l/E/d]	[d]	[m <sup>3</sup> /kg]	
80	1,0	8,0	5	250	57,1%
80	2,0	4,0	10	375	85,7%
80	3,0	2,7	15	417	95,2%
<b>80</b>	<b>4,0</b>	<b>2,0</b>	<b>20</b>	<b>438</b>	<b>100,0%</b>
80	5,0	1,6	25	450	102,9%
80	6,0	1,3	30	458	104,8%
80	7,0	1,1	35	464	106,1%
80	8,0	1,0	40	469	107,1%

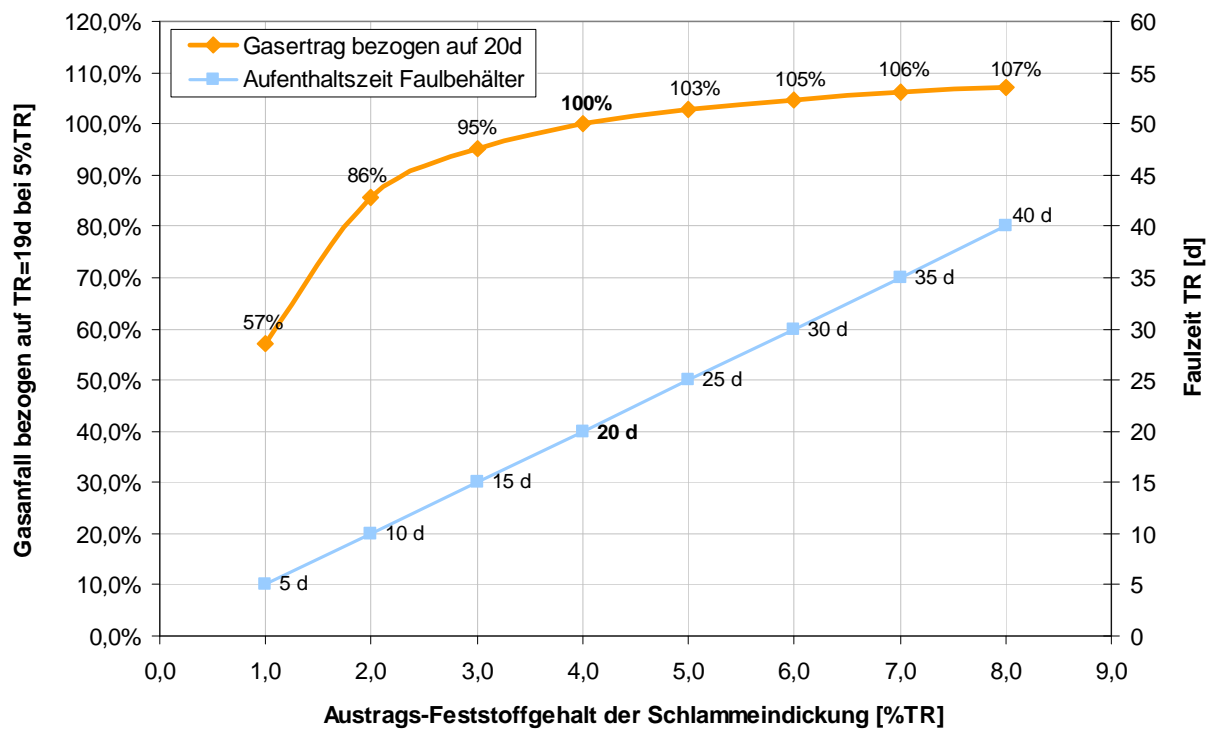


Bild 4.17: Gasanfall und Faulzeit in Abhängigkeit der Schlammeindickung. (Annahmen: 100% Gasanfall bei 20 Tagen Aufenthaltszeit, Feststoffgehalt 4% TR, Faulraumvolumen 40 l/EW)

Es zeigt sich, dass in einem üblichen Eindickbereich zwischen 3 und 5 % TR die erreichbare Gasproduktion um etwa 8 % variiert. Neben einer hieraus resultierenden gesteigerten Stromeigenproduktion sind auch die positiven Einflüsse auf den Energiebedarf der Rohschlammerwärmung, die Laufzeit von Entwässerungsaggregaten und die zu entsorgende Schlammmasse zu beachten.

### 4.3.2 Verfahren zur Desintegration

#### Beschreibung

Bei der Schlammfäulung ist die Hydrolyse der organischen Substanz der limitierende Faktor für den erreichbaren Stabilisierungsgrad. Über biochemische Prozesse werden bei der Schlammfäulung ungelöste organische Polymere unter Katalyse durch Enzyme in ihre niedermolekularen Monomere zerlegt (Zellaufschluss). Durch die Vorschaltung einer sogenannten Desintegration lässt sich die Hydrolyse beschleunigen, indem die enzymatische Zerstörung durch extern eingebrachte Energie unterstützt wird. Auf diese Weise lassen sich Abbaugeschwindigkeit und Abbaugrad der Schlammfäulung beeinflussen.

Durch die Desintegration wird sowohl die zu entsorgende Klärschlammmenge reduziert als auch die Faulgasproduktion gesteigert. Der stärkere Zellaufschluss ist allerdings mit einer erhöhten Rückbelastung der biologischen Stufe mit Stickstoff und inertem CSB verbunden. Der Energieverbrauch der Kläranlage wird durch die zur Desintegration eingesetzten Aggregate erhöht. Die Desintegration erfordert daher eine detaillierte Energiebilanz der Gesamtanlage, um Vorteile in der Produktion an Primärenergie bestätigen zu können (Müller et al., 2009). Aufgrund der erforderlichen Investition für die Desintegrationsanlage und des zusätzlichen Betriebspunktes wird das Verfahren in der Regel erst bei Faulungsanlagen ab etwa 50.000 EW wirtschaftlich einsetzbar.

#### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Die Desintegration wird zweckmäßigerweise am Überschussschlamm durchgeführt, da dieser zu einem hohen Anteil aus Mikroorganismen besteht. Die Behandlung von Primärschlamm zeigt dagegen nahezu keine Verbesserung des Abbauverhaltens (Schmelz & Müller, 2004). Die Desintegration kann dabei mittels mechanischer oder thermischer Energie erfolgen. Daneben sind auch chemische und biologische Verfahren möglich. Eine Übersicht über die eingesetzten Verfahren liefert Bild 4.18. Die Verfahrensgruppen werden nachfolgend zusammenfassend dargestellt und grundlegend bewertet.

- **Mechanische Desintegration**

Durch mechanische Energie (Druck-, Translations- oder Rotationsenergie) werden die Zellen über Scherkräfte zerkleinert. Der Aufschlussgrad der Zellstruktur hängt dabei insbesondere von der eingesetzten Energie und der Schlammbeschaffenheit ab. Die einsetzbaren Verfahrenstechniken unterteilen sich in Mühlen, Homogenisatoren, Pressen und Zentrifugen mit Lysiereinrichtung. Der notwendige Energieeintrag für den Betrieb liegt zwischen 0,5 bis 20 kWh<sub>e</sub>/m<sup>3</sup> bzw. 0,01 bis 0,4 kWh/kg TR (DWA-



AK-1.6, 2009). Im praktischen Betrieb hat sich hauptsächlich die Ultraschallbehandlung bewährt und wird derzeit am häufigsten eingesetzt (Eawag, 2010). Hierbei werden über akustische Wellen mit hohen Frequenzen Kavitationsblasen erzeugt, deren Implosion über einen Druckimpuls zum Aufschluss der Zellen führt.

- **Thermische Desintegration**

Die Verfahren zur thermischen Desintegration unterteilen sich in zwei Temperaturbereiche. Zum einen in die rein thermische Behandlung bei Temperaturen von 140 bis 160 °C, zum anderen in die chemisch unterstützte niederthermische Desintegration bei 60 bis 80 °C. Grundsätzlich erfolgt allein durch die Temperaturerhöhung eine Hydrolyse des behandelten Schlammes. Die Hochtemperaturverfahren werden dabei als Thermo-Druck-Hydrolyse bezeichnet, da der entstehende Überdruck von ca. 5-6 bar abrupt abgebaut wird, um neben der Temperatureinwirkung auch Scherkräfte zum Zellaufschluss zu nutzen. Thermisch-Chemische Verfahren werden dagegen drucklos betrieben, allerdings erfolgt hierbei die Zugabe einer Lauge, die den Zellaufschluss ebenfalls verbessert.

- **Chemische Desintegration**

Bei der chemischen Desintegration ist zu unterscheiden zwischen chemischer Oxidation und chemischer Hydrolyse. Die chemische Oxidation beruht auf dem Einsatz von starken Oxidationsmitteln wie Ozon ( $O_3$ ), bei deren Zugabe es durch eine Elektronenabgabe an das Oxidationsmittel zur Bildung von Radikalen kommt und somit Moleküle aufgespalten werden. Ozon muss jedoch unter hohem Energieaufwand vor Ort produziert werden (12 bis 18 kWh/kg  $O_3$ ). Des Weiteren kommt es zu einem erhöhten Sauerstoffbedarf der Belebung. Die chemische Hydrolyse funktioniert dagegen durch die Zugabe von geringen Mengen an starken Säuren oder Laugen, welche den Aufschlussgrad schnell erhöhen, indem die Hydrolysegeschwindigkeit verbessert wird.

- **Biochemische Desintegration**

Zu den biochemischen Verfahren gehört zum einen die Zugabe von biologischen Hilfsstoffen (Enzympräparate, Pflanzenextrakte, Vitaminzusätze und zum anderen die Autolyse. Bei letzterer werden mikrobiologisch im System Enzyme produziert, beispielsweise bei der Primärschlammhydrolyse (Quelle ATV/DVWK, 2003 AK 3.1.6).

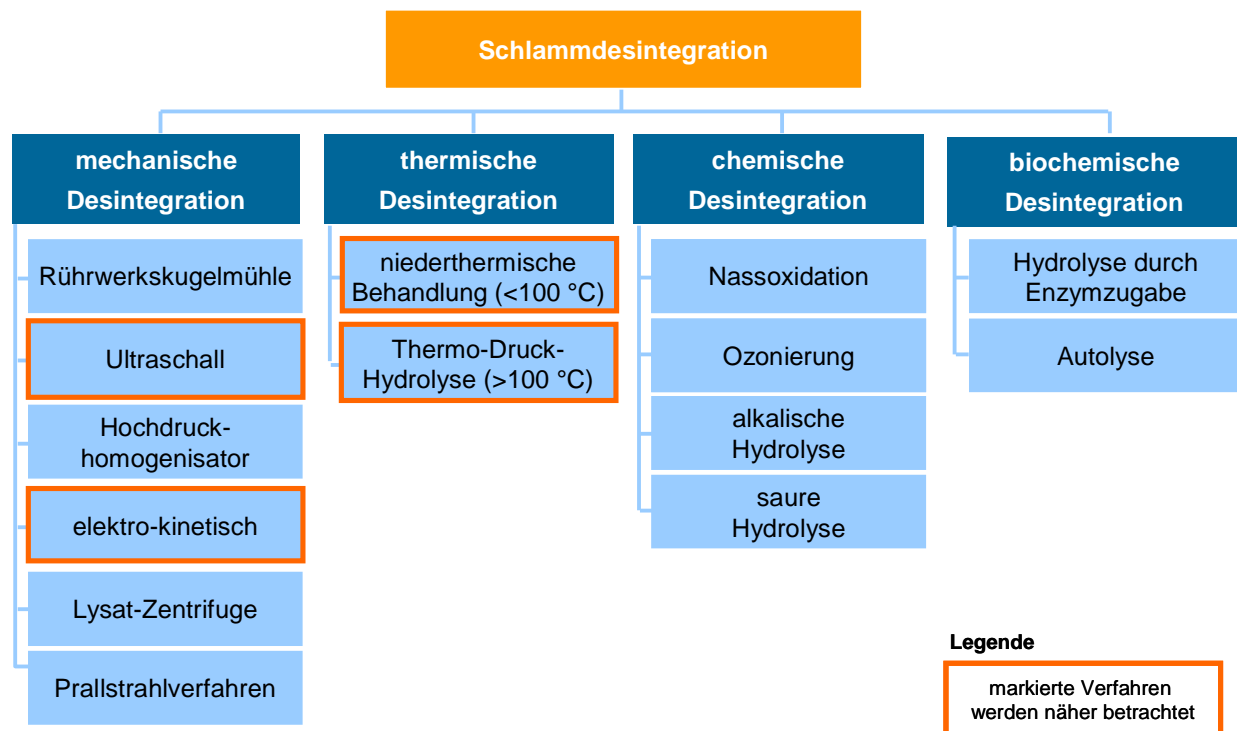


Bild 4.18: Verfahren der Schlamm-Desintegration (nach Müller et al., 2001 und 2003)

Betriebserfahrungen im Labor- Pilot- und großtechnischem Maßstab haben ergeben, dass insbesondere mechanische und thermische Verfahren und dabei vor allem die in Bild 4.18 markierten Verfahren für eine Desintegration auf kommunalen Kläranlagen geeignet sind. Für diese sind die Auswirkungen auf den Gasertrag sowie die wichtigsten Kennzahlen nachfolgend beschrieben.

Bei allen Desintegrationsverfahren ist zu berücksichtigen, dass es zu negativen Auswirkungen auf den Faulschlamm kommen kann. So kann sich das Entwässerungsverhalten verschlechtern und der Verbrauch an Flockungshilfsmitteln ansteigen. Darüber hinaus führt die vermehrte Löslichkeit organischer Substanzen zu einer vermehrten Rückbelastung.

### Auswirkungen auf den Gasertrag

Die erreichbare Wirkung einer Desintegration lässt sich infolge der zahlreichen Einflussfaktoren (Schlammalter, Schlammqualität, Fauldauer, Abbaugrad ohne Desintegration etc.) nur bedingt abschätzen bzw. beziffern. Zu den Einflüssen auf den Gasertrag gibt es daher zum Teil widersprüchliche Aussagen in der Literatur. Bei verschiedenen Anlagen konnte durch den Einsatz die Klärgasproduktion um bis zu 30 % gesteigert werden, bei anderen Anlagen wiederum konnte keinerlei Verbesserung festgestellt werden (Müller et al., 2008).

Tabelle 4.6: Literaturlauswertung der Leistungsfähigkeit verschiedener Desintegrationsverfahren

Parameter zur Bewertung	Einheit	Verfahrensart der Schlammdeintegration			
		Ultraschall	elektro-kinetisch	Thermo-Druck-Hydrolyse (TDH)	niederthermische Behandlung
Hersteller/Verfahren (Beispiele)	[-]	Fa. Ultrawaves (CH <sub>4</sub> -Booster) Fa. VTA (GSD-Verfahren)	Fa. Vogelsang Fa. Ensola Fa. Süd Chemie (Bio-Crack®)	Cambi-Verfahren	Pondus-Verfahren
Aufschlussgrad A <sub>CSB</sub>	[%]	5-8% <sup>3</sup> 1-10% <sup>4</sup>	k.A.	40-50% <sup>0</sup>	50-60% <sup>7</sup>
Abbaugrad oTR	[%]	60% <sup>3</sup> 54% <sup>4</sup>	k.A.	55% <sup>0</sup>	k.A.
Abbaugrad oTR	[%]	+5% <sup>1</sup> +9,9% <sup>2</sup>	+8-22% <sup>1</sup>	k.A.	k.A.
Faulschlammvolumen	[m <sup>3</sup> /a]	-25% <sup>1</sup>	-15% <sup>5</sup> -22% <sup>6</sup>	-29% <sup>0</sup>	k.A.
Faulgasproduktion	[l <sub>N</sub> /kg oTR <sub>zu</sub> ]	+11-24% <sup>1</sup>	+15% <sup>6</sup> +20% <sup>7</sup> +30% <sup>5</sup>	+22% <sup>0</sup> +25% <sup>1</sup>	+30% <sup>7</sup>
Rückbelastung NH <sub>4</sub>	[kg/d]	+4,7 % <sup>4</sup>	k.A.	+44% <sup>0</sup> +15% <sup>1</sup>	k.A.
Rückbelastung CSB	[kg/d]	k.A.	k.A.	+1 % <sup>0</sup> +10% <sup>1</sup>	k.A.
Stromverbrauch spezifisch	[kWh/m <sup>3</sup> ]	9,4 <sup>4</sup> 9-16 <sup>1</sup> 5-15 <sup>2</sup>	10 W/h <sup>7</sup> 30 W/h <sup>5</sup>	k.A.	1,7 <sup>7</sup>
Stromverbrauch spezifisch	[kWh/kg TR]	0,04 <sup>3</sup> 0,25 <sup>4</sup>	k.A.	k.A.	k.A.

0: Bormann et al. (2009)

1: Horn et al. (2009)

2: Nickel (2005)

3: Wolff et al. (2009)

4: Schmelz &amp; Müller (2004)

5: Fa. Süd-Chemie, (2013)

6: Fa. Ensola (2013)

7: Fa. Pondus (2013)

Die Bewertung der Desintegrationsverfahren erfordert eine Kosten/Nutzen-Analyse in Bezug auf die aufzubringende Energie und den zusätzlichen Gasertrag bzw. die daraus resultierende Eigenerzeugung. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit kommen nur diejenigen Verfahren in Frage, bei denen der Energieaufwand für die Desintegration geringer ist als die zu erwartende Steigerung der Eigenerzeugung durch einen verbesserten Gasertrag.

#### 4.4 Steigerung der Gasausbeute bei der Schlammfäulung

Der Faulbehälter bildet den Hauptbestandteil der Schlammbehandlung. Unter anaeroben Prozessbedingungen werden die energiereichen organischen Substanzen durch Mikroorganismen abgebaut und über Zwischenprodukte wie Säuren und Alkohole zu Faulgas umgewandelt.

Die Gasausbeute ergibt sich hierbei zum einen durch verfahrenstechnische Randbedingungen (Faulbehältergröße, Durchmischungssystem, und die gewählte Verfahrensart) und zum anderen durch milieubedingte Einflüsse (Temperatur, Pufferkapazität, Sauerstoffgehalt, Nährstoffe, organische und anorganische Hemmstoffe).

Eine Optimierung der Faulgasausbeute kann insbesondere durch betriebliche Maßnahmen erreicht werden. Hierzu gehören die gleichmäßige Beschickung des Faulbehälters, das Vermeiden von Temperaturschwankungen und eine gleichmäßige Durchmischung des Faulraums. Des Weiteren hat bereits die Dimensionierung (ausreichende Faulzeit) und das gewählte Verfahren (einstufig, zweistufig) einen erheblichen Einfluss auf den Gasertrag.

Einige betriebliche Maßnahmen werden im Weiteren genauer untersucht und der Einfluss auf den Gasertrag bilanziert. Die untersuchten Ansätze sind in Bild 4.19 zusammenfassend dargestellt.

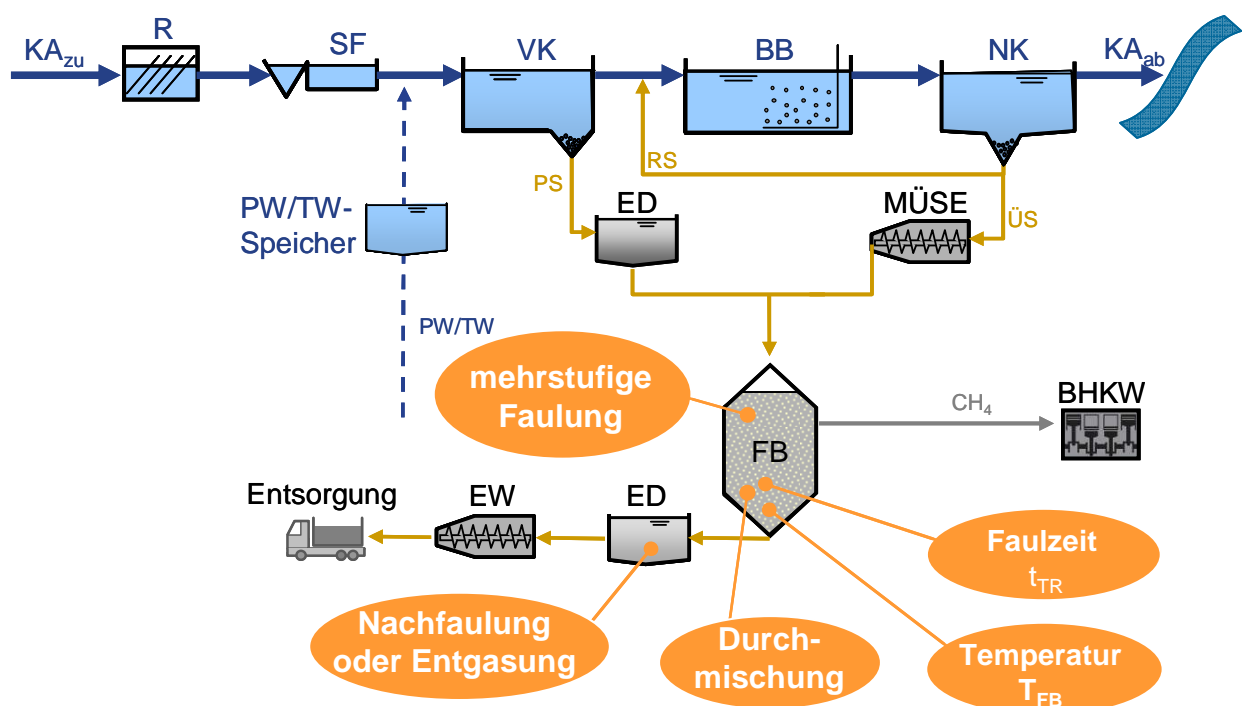
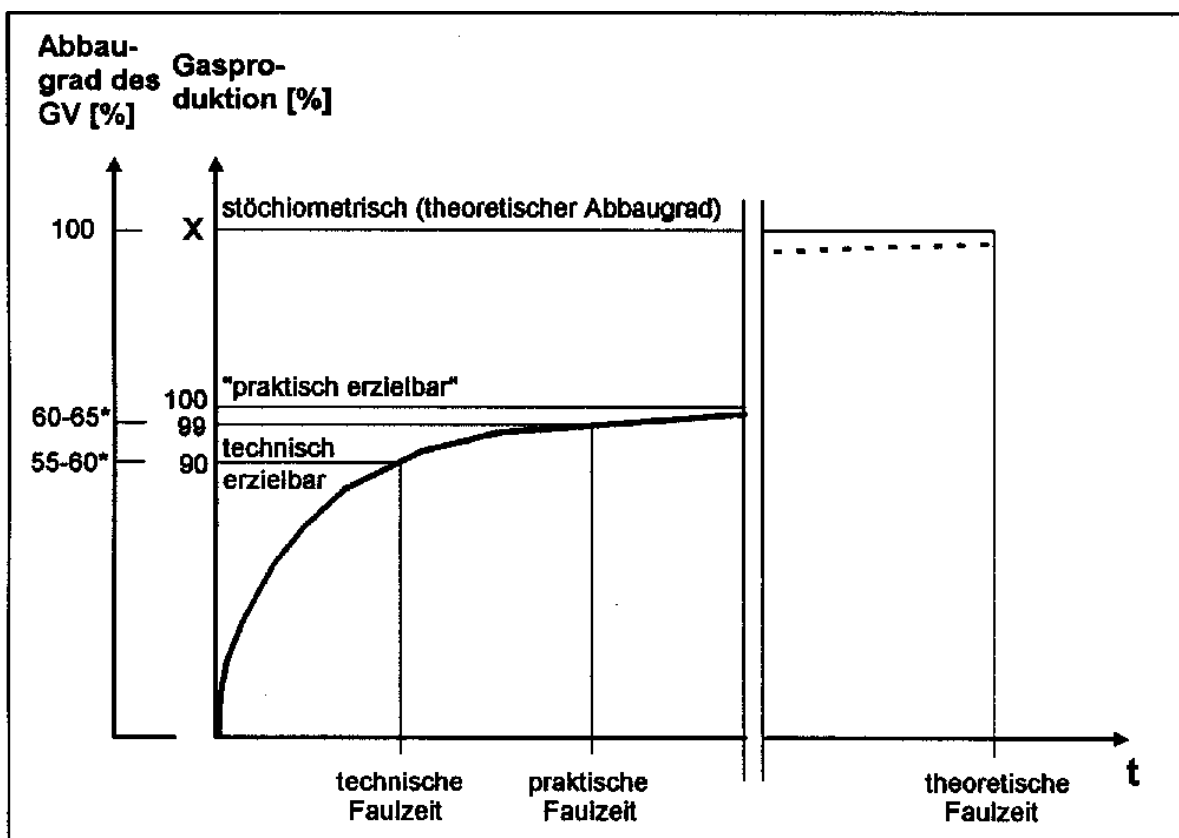


Bild 4.19: Ansatzpunkte zur Steigerung der Gasausbeute bei der Schlammbehandlung

#### 4.4.1 Grundlagen und Einflüsse des Faulprozesses

Die Faulgasproduktion ist grundsätzlich als Funktion der Faulzeit anzusehen. Der anaerobe Abbau verläuft mit der Zeit asymptotisch einem Maximalwert entgegen, welcher als Faulgrenze bezeichnet wird. Der entsprechende Verlauf der Faulgasproduktion ist qualitativ in Bild 4.20 dargestellt. Es ist zu differenzieren zwischen der stöchiometrisch bestimmten maximalen Faulgasproduktion, die bei einem vollständigen Organikabbau nach einer theoretischen Faulzeit erreicht wird, und der praktischen Faulzeit, die praktisch realisierbar ist, bei der jedoch nicht der maximal mögliche Gasertrag erreicht wird. Die technische Faulzeit orientiert sich wiederum an betrieblichen Randbedingungen, wie dem spezifischen Schlammanfall bei gegebenem Reaktorvolumen.



\* Abbaugrade abhängig von biologischer Verfügbarkeit und Milieu- bzw. Prozeßbedingungen

Bild 4.20: Gasproduktion und Abbaugrad in Abhängigkeit der Faulzeit (Grüning et al., 1997)

Der Faulbehälter ist als verfahrenstechnisches System ein Auswaschreaktor ohne Schlammrückführung (Chemostat). In einem voll durchmischten Faulbehälter entspricht die Faulzeit daher der Schlammverweilzeit und wird somit direkt von der hydraulischen Beschickung bestimmt. Die Faulzeit muss grundsätzlich so groß sein, dass sich die beteiligten Mikroorganismen schneller vermehren als sie mit dem Schlamm ausgeschwemmt werden. Hydrolysierende und versäuernde Bakterien vermehren sich dabei schneller als

Methanbakterien. Die effektive Faulzeit muss daher mindestens 2,5 Tage betragen (Roediger, 1997). Um Belastungsspitzen ausreichend abpuffern zu können, wird bei der mesophilen Faulung eine Aufenthaltszeit von 20 Tagen empfohlen (ATV-DVWK, 2003).

Der asymptotische Verlauf der Faulgasproduktion kann nach einem Modellansatz von Rückauf et al. (1988) berechnet werden.

$$y_G = y_{G,\max} * \left(1 - \frac{t_{FB,\min}}{t_{FB}}\right)$$

mit:  $y_G$  = erreichbare Gasausbeute [l<sub>N</sub>/kg oTR<sub>zu</sub>]  
 $y_{G,\max}$  = maximale Gasausbeute [l<sub>N</sub>/kg oTR<sub>zu</sub>]  
 $t_{FB}$  = Aufenthaltszeit im Faulbehälter [d]

Das Ergebnis ist in Bild 4.21 dargestellt. Die maximale Gasausbeute wurde hierbei mit 500 l/kg angenommen. Es zeigt sich, dass bei einer Faulzeit von 20 Tagen eine Faulgasausbeute von rund 450 l/kg oTR<sub>zu</sub> praktisch erreichbar ist.

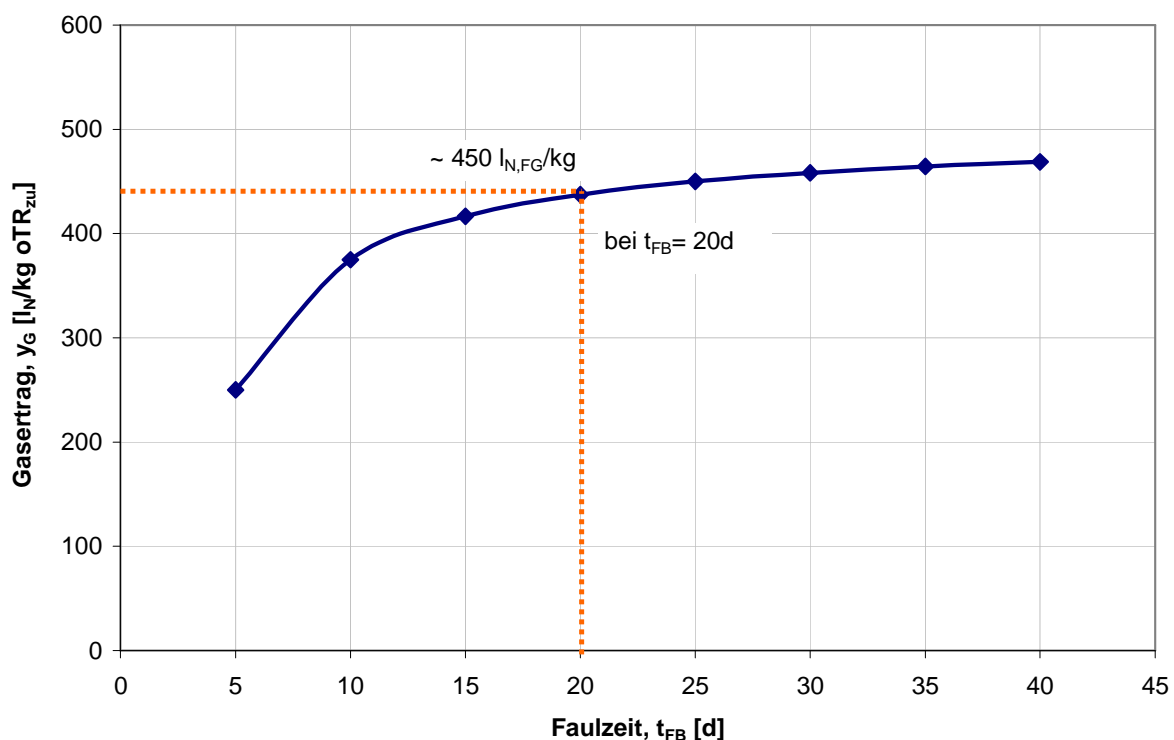


Bild 4.21: Gasausbeute in Abhängigkeit der Faulzeit bezogen auf oTR<sub>zu</sub>

#### 4.4.2 Vollständige Nutzung des Faulraums

##### Beschreibung

Um eine optimale Faulgasproduktion zu gewährleisten, sollte das gesamte Faulraumvolumen zur Verfügung stehen und vollständig durchmischt werden. Eine ausreichende Durchmischung des Faulraums garantiert den Austausch zwischen aktiver Biomasse und zugeführtem Rohschlamm und wirkt außerdem einer Schwimmdeckenbildung entgegen. Bei unzureichender Umwälzung des Reaktorvolumens führen Ablagerungen von mineralischen Bestandteilen des Faulschlammes zu sogenannten Totzonen und damit zu einer Verkürzung der potentiellen Aufenthaltszeit. Kurzschlussströme können die theoretische Aufenthaltszeit nochmals reduzieren. Ablagerungen durch unzureichende Umwälzung führen des Weiteren zu Kosten durch Schäden an den Rührwerken, Verstopfungen in den Rohrleitungen oder zu Störungen der Temperaturmessungen. Der gesamte Faulbehälterinhalt ist daher mindestens einmal täglich voll zu durchmischen (Roediger, 1996). Dabei darf die Rührintensität jedoch nicht so hoch sein, dass es durch zu starke Turbulenzen und Scherkräfte zu einer Beeinträchtigung der Bakterientätigkeit kommt (Kunz, 1989).

Die Durchmischung des Faulraums hat zusammenfassend folgende Aufgaben:

- Vergleichmäßigung der Temperaturverteilung
- Unterstützung der Entgasung
- Verhindern bzw. Zerstören von Schwimmdecken
- Aufwirbelung von Sedimenten zur Vermeidung von Totzonen durch Ablagerungen
- Homogenisierung von Störstoffen

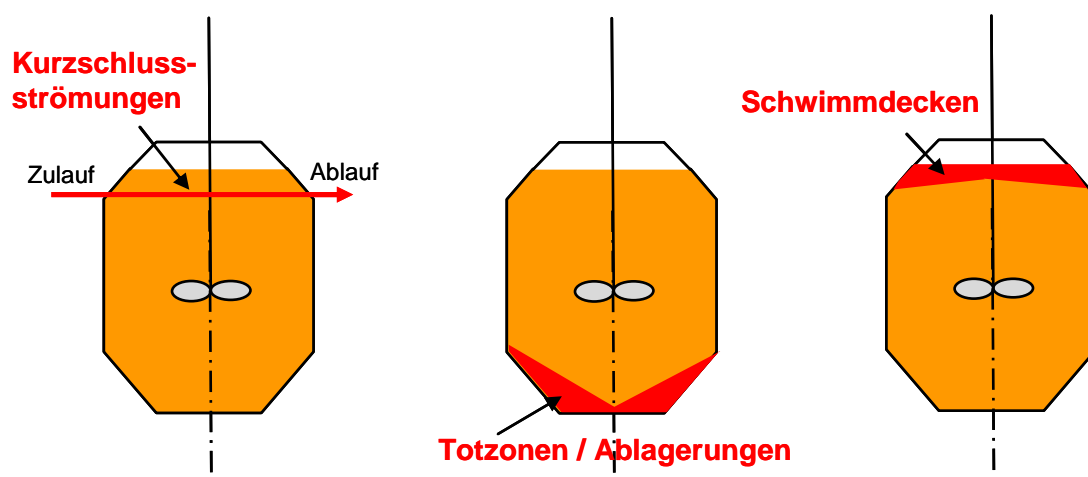


Bild 4.22: Auswirkungen einer unzureichenden Durchmischung des Faulraums (qualitative Darstellung)

### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Für die Umwälzung des Faulraums kommen unterschiedliche Verfahren in Frage (außenliegende Pumpen, Schraubenschaufler bzw. Faulschlammischer, Rührwerksaggregate und Gaseinpressungssysteme). Zur Bemessung der genannten Verfahren existieren allerdings keine einheitlichen Bemessungshinweise. In der Praxis basiert die Bemessung der Umwälzeinrichtung daher lediglich auf Erfahrungswerten (Bischofsberger et al, 2005). Diese werden ergänzt durch Richtwerte für den Leistungsbedarf der Umwälzung in Abhängigkeit des Behältervolumens. Gemäß Energiehandbuch-NRW (MURL NRW, 1999) wird je nach Umwälzungssystem ein Energieeintrag von 4 - 7 W/m<sup>3</sup> benötigt. Als Maßnahme zur energetischen Optimierung wird vielfach ein Intervallbetrieb der Umwälzaggregate gewählt. Bei zu langen Intervallen ohne Umwälzung oder bei einer allgemein unzureichenden Umwälzung kann der Feststoffgehalt durch Sedimentation im unteren Bereich des Faulraumes ansteigen. Bei Entnahme des Faulschlammes aus dem unteren Bereichs verringert sich in diesem Fall der Feststoffgehalt im Faulbehälter. Je geringer der Feststoffgehalt ist, desto geringer ist auch die Konzentration der beteiligten Mikroorganismen und damit deren Leistung. So kann trotz langer Faulzeit eine Überlastung eintreten, die mit einer geringeren Faulgasausbeute verbunden ist.

Um eine Beeinträchtigung der Gasausbeute infolge einer unzureichenden Umwälzung des Faulraumvolumens zu vermeiden, sollten zunächst die Symptome frühzeitig erkannt werden:

- **Anzeichen, die auf eine unzureichende Umwälzung schließen lassen:**
  - Hoher Organikanteil im ausgefaulten Schlamm
  - Unplausible Temperaturwerte, hohe Temperaturunterschiede bei Beschickung
  - Erhöhte Stromaufnahme der Rührwerke
  - Schwimmdeckenbildung
  
- **Maßnahmen zur genauen Untersuchung/Bilanzierung des Einflusses**
  - Tracer-Versuche
  - Inspektionen durch Berufstaucher
  - Temperaturmessungen in unterschiedlichen Höhen
  - Sondierungen

Messungen mit einer Tracersubstanz (z.B. Lithium oder Bromid) bieten dabei die umfangreichsten Ergebnisse. Mit dieser Methode können Aussagen zu Ablagerungen und Kurzschlussströmungen getroffen werden, indem die Tracerkonzentrationen im Ablauf des Reaktors zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen werden. Desweiteren kann auch die erreichte Reaktormischzeit ( $t_m$ ) ermittelt werden, also die Zeit, die das Umwälzsystem benötigt, um eine gleichmäßige Verteilung zu erreichen (Ebner, 2013 und Faulstich, 2005).



### Auswirkungen auf den Gasertrag

Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss von Schwimmdecken in der Praxis eine untergeordnete Rolle spielt, da diese bei Auftreten mit entsprechenden Gegenmaßnahmen auf verschiedene Weise verhindert werden können. Auch im Falle der Kurzschlussströmungen ist nur bei konsequentem Intervallbetrieb des Durchmischungssystems von einem nennenswerten Einfluss auszugehen.

Die Ablagerungen im Faulraum jedoch können bis zu 40 % des verfügbaren Reaktorvolumens ausmachen (Heumer, 2011). Der Einfluss von Ablagerungen auf den Gasertrag ist qualitativ in Bild 4.23 dargestellt. Als Referenz wird eine Gasproduktion bei 20 d Aufenthaltszeit angesetzt und diese über den prozentualen Anteil der Totzonen rechnerisch reduziert. Es zeigt sich, dass der Gasertrag bei gleich bleibendem Schlamminput bei einer Reduzierung des Faulraums durch Totzonen um bis zu 10 % absinken kann.

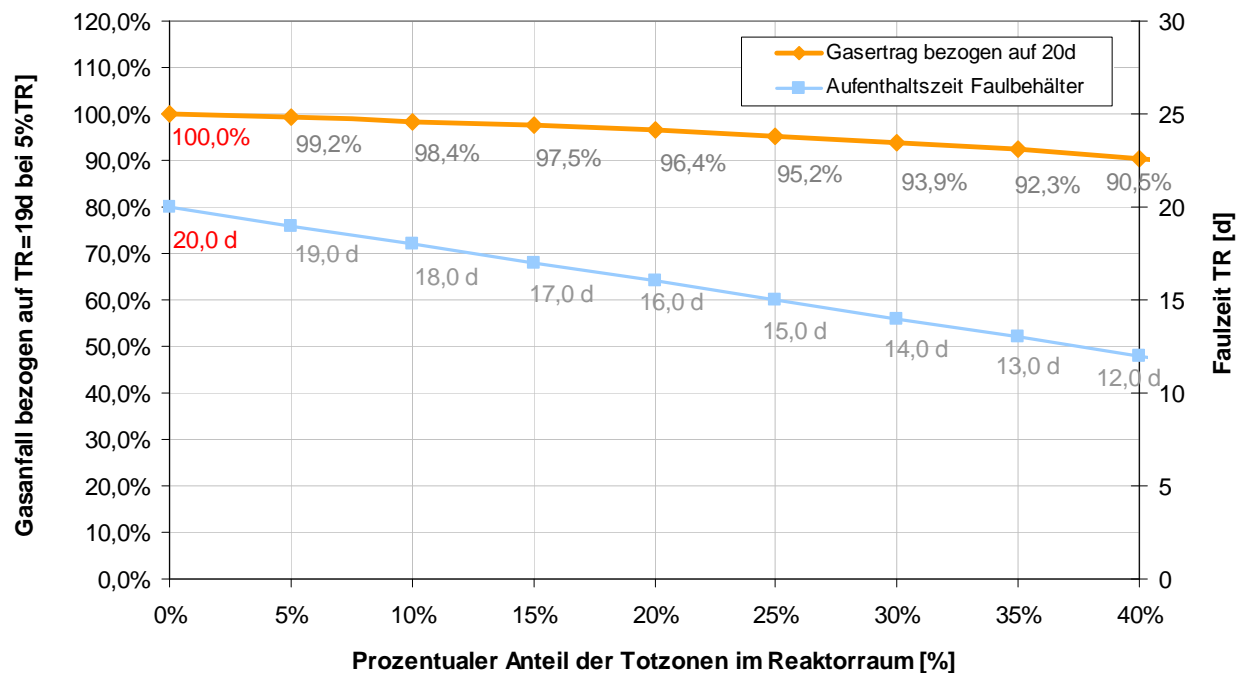


Bild 4.23: Einfluss durch Totzonen infolge Ablagerungen im Faulraum auf den Gasertrag

### 4.4.3 Mehrstufige Faulung / Hochlastfaulung

#### Beschreibung

Die Faulstufe kommunaler Kläranlagen ist üblicherweise einstufig ausgeführt, wobei allerdings häufig mehrere Behälter parallel betrieben werden, um das benötigte Gesamtvolumen bereitzustellen. Alternativ ist allerdings auch eine mehrstufige bzw. serielle Schaltung mehrerer Faulbehälter möglich. Hierdurch ergeben sich gemäß Bischofsberger et al. (2005) folgende Vorteile:

- Reaktionskinetische Vorteile durch höhere Substratkonzentration vorderer Stufe
- keine oder weniger unbehandelte Kurzschlussströmungen
- höhere Betriebssicherheit

#### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Zur Umsetzung einer mehrstufigen Faulung gibt es unterschiedliche Ansätze. Zum einen den kaskadierten Betrieb von mehreren Reaktoren mit jeweils gleicher Aufenthaltszeit (Bild 4.24, Kategorie 2) und zum anderen eine zweistufige Betriebsweise mit vorgeschalteter Hochlaststufe (Bild 4.24, Kategorie 3). Als weitere Variante ist auch eine zweistufige Hochlastfaulung möglich. Untervarianten mit wechselnden Temperaturbedingungen oder einer vorgeschalteten aeroben Behandlung werden im Weiteren nicht behandelt.

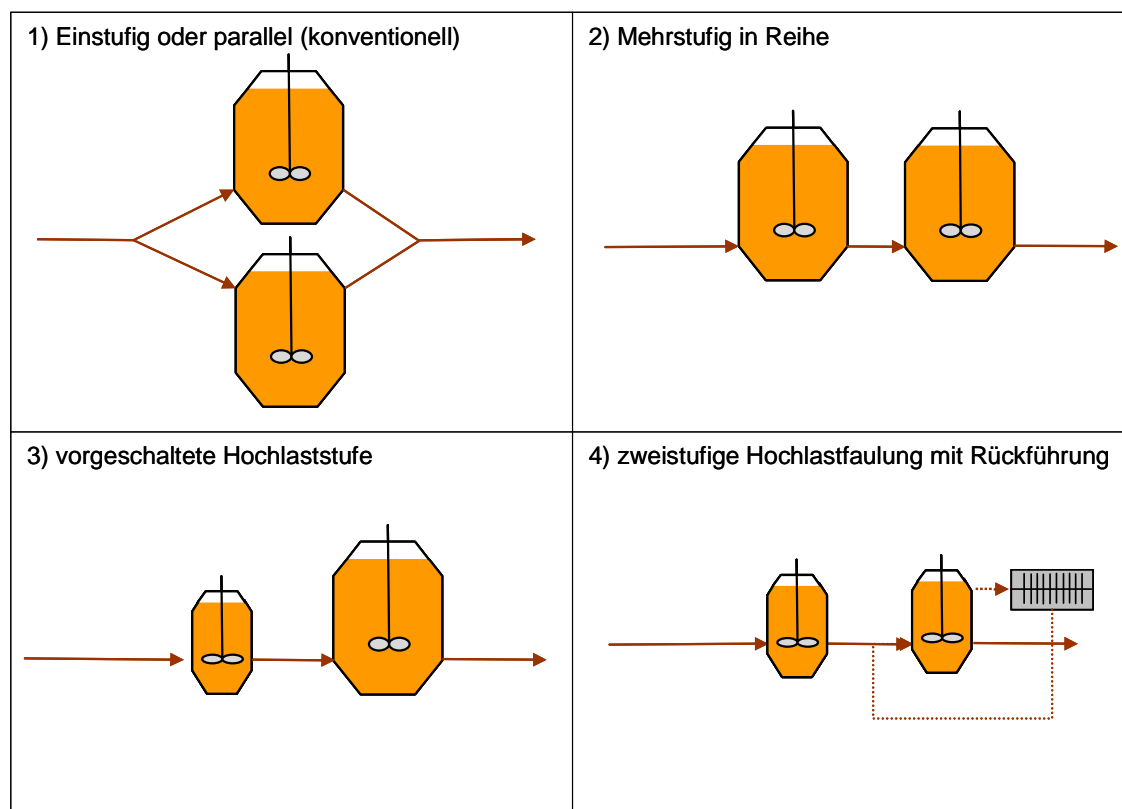


Bild 4.24: Verfahrensvarianten einer einstufigen und mehrstufigen Faulung

Bei zweistufigem Betrieb dient die erste hochbelastete anaerobe Stufe vorwiegend zur Hydrolyse und Versäuerung des Substrates. Die nächsten beiden Phasen des Faulprozesses verlaufen anschließend in der zweiten Stufe bei einer längeren Aufenthaltszeit, da hierbei längere Generationszeiten der Bakterien notwendig sind. Das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik IGB hat ein solches zweistufiges Verfahren mit Hochlaststufe entwickelt, das in Heidelberg großtechnisch erprobt wurde (Bild 4.25).



Bild 4.25: Faulung mit nachträglich integrierter Hochlaststufe (Kempfer-Regel et al., 2003)

Ein erweiterter ebenfalls vom IGB entwickelter Ansatz sieht eine Entkoppelung von Schlammalter der Faulung und hydraulischer Faulzeit vor (IGB, 2008). Hierzu wird analog zum konventionellen Belebtschlammverfahren die Fest- von der Flüssigphase getrennt. Die abgetrennten Feststoffe können erneut dem Rohschlammzulauf zugeführt werden und lassen sich auf diesem Weg stärker aufschließen. Zudem ist auf diese Weise eine höhere volumenspezifische Belastung des Faulraums möglich, da ein großer Teil des Ammoniums über die Flüssigphase abgezogen wird, welches sich ansonsten hemmend auswirken könnte. Die Feststoffabscheidung kann z.B. über eine Mikrofiltration erfolgen (Bild 4.26).

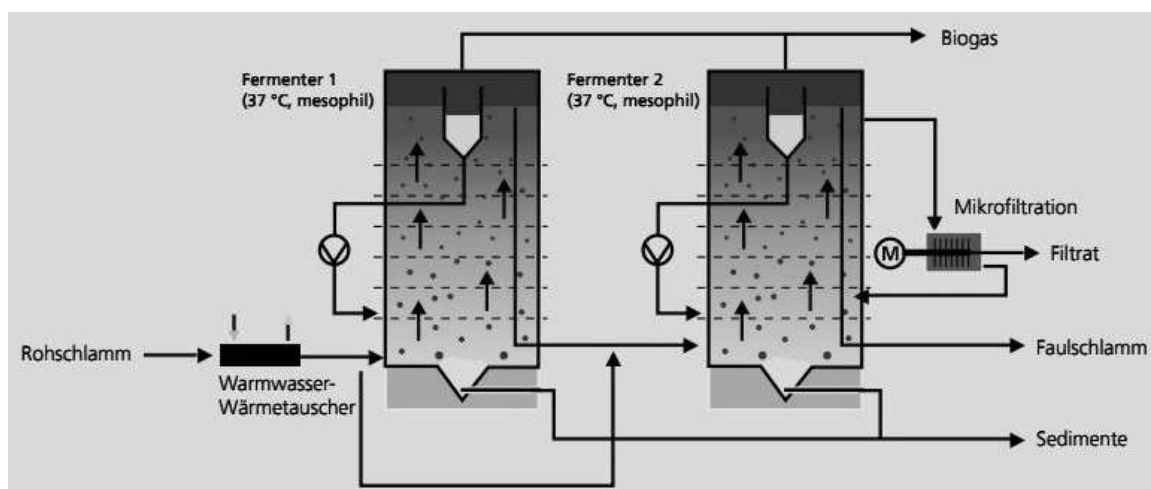


Bild 4.26: Schema einer zweistufigen Hochlastfaulung mit Mikrofiltration (IGB, 2008)

Bei zweistufiger Faulung ergeben sich betriebliche Vorteile durch die Pufferwirkung der ersten Stufe, die die nachgeschaltete Stufe vor Störungen wie beispielsweise Schwankungen der Schlammzusammensetzung oder Änderungen des pH-Wertes schützt. Außerdem kann selbst bei Ausfall der vorgeschalteten Stufe noch immer in gewissem Umfang ein Faulprozess und eine Stabilisierung des Schlammes erreicht werden.

Es ist zu beachten, dass aufgrund des Systems des Auswaschreaktors bei einer Verschaltung mehrerer vorhandener Faulbehälter in Reihe die hydraulische Verweilzeit im Einzelreaktor verkürzt wird und jeder Reaktor für sich eine ausreichende Faulzeit aufweisen muss.

### Auswirkungen auf den Gasertrag

Die Kaskadenschaltung mehrerer Faulbehälter hat einen Einfluss auf den erreichbaren technischen Abbaugrad, welcher definiert ist als Verhältnis des tatsächlichen Abbaus zu demjenigen der praktischen Faulzeit (vgl. dazu Bild 4.20).

Einstufig betriebene Faulbehälter mit einer Faulzeit von 20 Tagen haben nach Roediger et al. (1990) einen technischen Abbaugrad von ca. 83 %, wohingegen bei zwei hintereinandergeschalteten Faulbehältern mit jeweils 10 Tagen Faulzeit der technische Abbaugrad auf ca. 92 % gesteigert werden kann (Bild 4.27).

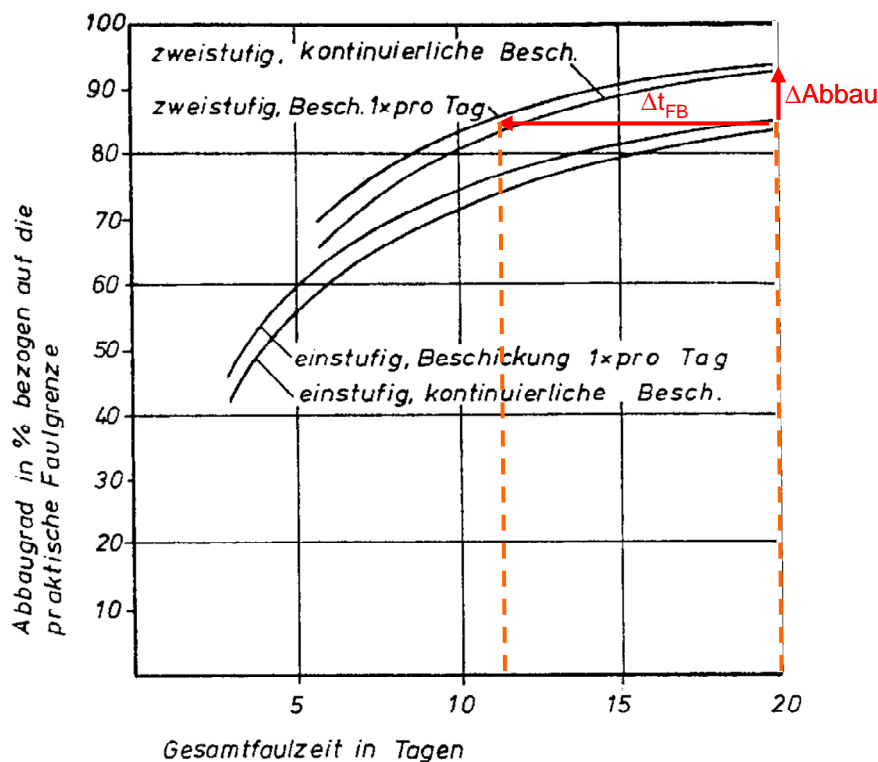


Bild 4.27: Vergleich einstufiger und zweistufiger Faulung (Roediger et al., 1990)

---

Überträgt man den in Bild 4.27 dargestellten Zusammenhang auf die erforderliche Faulzeit und nimmt einen unveränderten Methangehalt des Faulgases an, ergibt sich folgendes:

- für den gleichen Gasertrag kann im Vergleich zu einem einstufigen Faulbehälter mit 20 d Verweilzeit bei zweistufiger Fahrweise die Gesamtfaulzeit auf ca. 12 d und damit das Gesamtvolumen der Faulung um 40 % verringert werden.
- bei gleichbleibendem Faulvolumen kann der Gasertrag bei zweistufiger Fahrweise um ca. 11 % im Vergleich zum einstufigen Faulbehälter mit 20 d Verweilzeit gesteigert werden.

Großtechnische Versuche belegen diesen Zusammenhang. So wurde durch eine zweistufige Faulung mit Hochlaststufe die Faulgasausbeute um bis zu 17 % gesteigert (IGB, 2008).

#### 4.4.4 Adaptive Temperaturanpassung der Faulung

##### Beschreibung

Die Faulgaserzeugung ist generell stark temperaturabhängig. Die Stoffwechseltätigkeit der beteiligten Mikroorganismen nimmt mit ansteigender Temperatur zu, wodurch auch die Abbaurate der verfügbaren Stoffe ansteigt. Innerhalb eines bestimmten Temperaturbereiches ergeben sich für verschiedene Mikroorganismen allerdings unterschiedliche optimale spezifische Temperaturwerte. Für den Gesamtprozess der Schlammfaulung hat sich herausgestellt, dass im Wesentlichen zwei Temperaturbereiche entscheidend sind:

- der mesophile Bereich von 30 bis 40°C
- und der thermophile Bereich von 50 bis 55°C

In der Vergangenheit wurde für den Bereich zwischen den beiden Temperaturoptima ein Einbruch der Gasproduktion angenommen. Neue Erkenntnisse zeigen jedoch, dass der Prozess des anaeroben Abbaus im praktischen Betrieb relativ unempfindlich ist, so dass auch bei Erhöhung der Prozesstemperatur in den Zwischenbereich von ca. 40°C keine Störungen der Faulgasproduktion auftreten (ATV-DVWK, 2003 und Rossol et al., 2005).

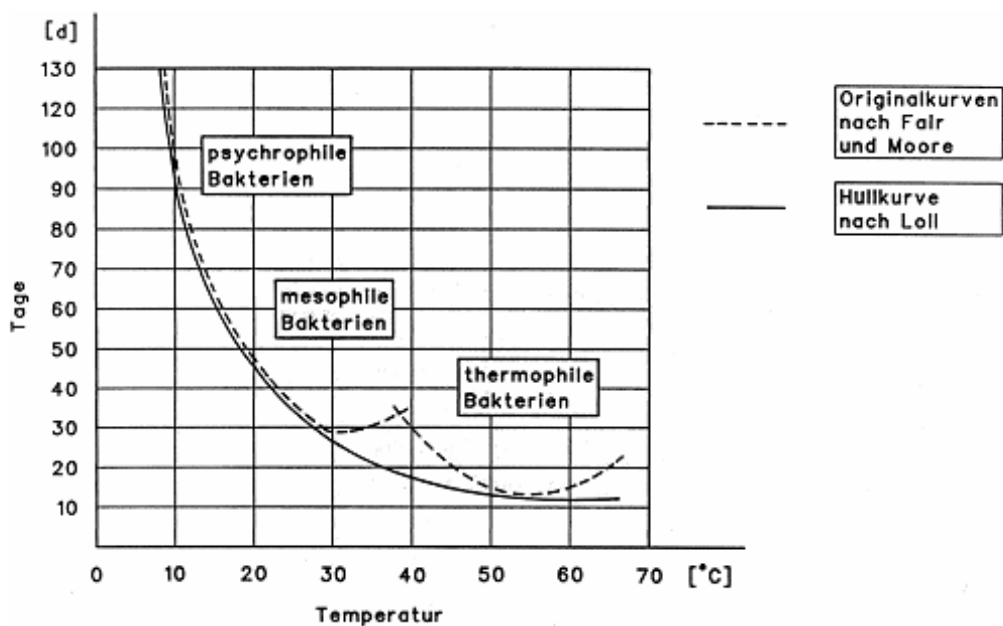


Bild 4.28: Abhängigkeit der Faulzeit zur Erreichung der technischen Faulgrenze von der Temperatur (ATV-DVWK, 2003)

Überschüsse der Wärmeproduktion der KWK-Aggregate in den Sommermonaten, die ansonsten über die Notkühlung abgeleitet werden müssten, könnten stattdessen dazu genutzt werden, die Temperatur im Faulraum schrittweise zu erhöhen und somit die Gaserzeugung zu optimieren.

### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Der Betrieb einer Schlammfäulung mit erhöhten Temperaturen, bis in den thermophilen Bereich, wird in Deutschland bisher nur selten großtechnisch umgesetzt. Erfahrungen aus Bayern zeigen, dass ein Anstieg der Prozesstemperatur auf 40-42°C, allein durch Überschusswärme in den Sommermonaten, möglich ist und einen positiven Einfluss auf die Faulgasproduktion hat (Rossol et al., 2005).

Auch in Baden-Württemberg gibt es entsprechende Erfahrungen. So wurde beispielsweise auf der Kläranlage Fischingen (Bild 4.29) eine entsprechende Temperaturanpassung vorgenommen und die Faulraumtemperatur im Sommer auf bis zu 52°C erhöht (Bailer, 2011).



Bild 4.29: Kläranlage Fischingen (Quelle Bailer, 2009)

Die technische Umsetzung einer Temperaturanpassung ist von der verfügbaren Wärmeenergie und dem Bedarf an Wärme abhängig. Nur wenn bei normalen Prozessbedingungen ein Überschuss an Wärme vorhanden ist, kann dieser genutzt werden, um die Temperatur im Faulbehälter adaptiv anzupassen.

### Auswirkungen auf den Gasertrag

Eine erhöhte Temperatur im Faulraum beeinflusst insbesondere die Abbaugeschwindigkeit und damit die relative Faulzeit die zum Abbau der zugeführten Organik zur Verfügung steht. Die technische Faulgrenze wird bei erhöhten Temperaturen somit schneller erreicht (vgl. Bild 4.28).

Aus diesem Zusammenhang lässt sich ein vereinfachter Ansatz zur Beurteilung der zusätzlichen Gasproduktion auf Basis der Faulzeit ableiten. In Bild 4.30 ist die Entwicklung des Gasertrags qualitativ dargestellt. Anhand des Basiswertes einer Gasproduktion bei 20 d Aufenthaltszeit und 37°C Faulraumtemperatur wird die zusätzliche Gasproduktion infolge der verlängerten Faulzeit durch schnellere Umsatzraten dargestellt.

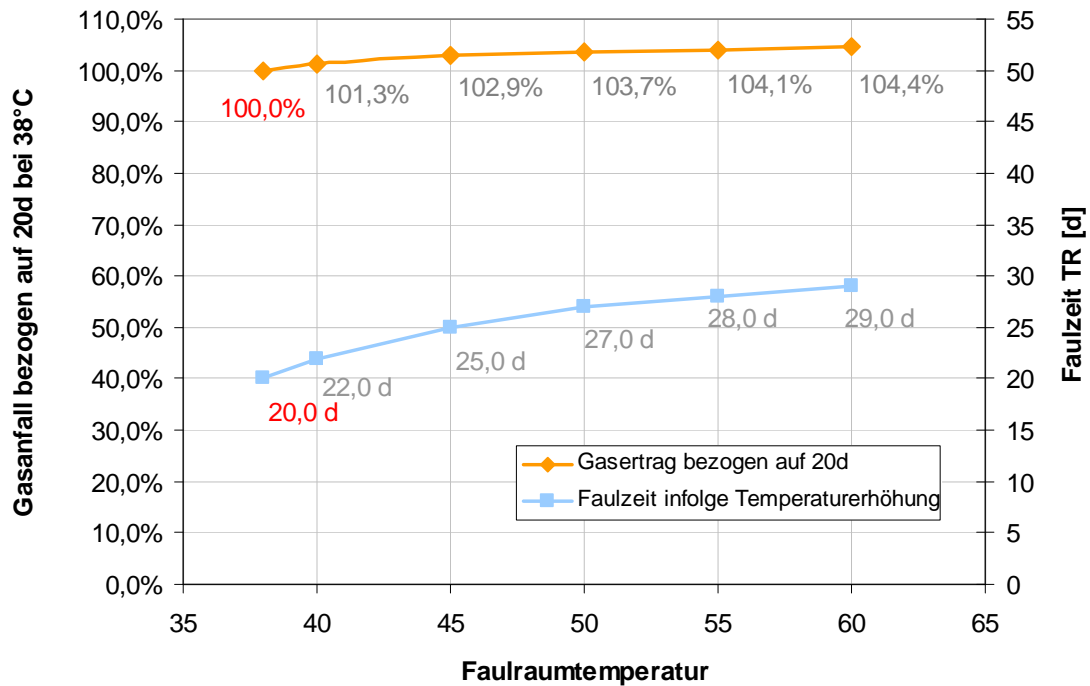


Bild 4.30: Entwicklung des Gasertrags bei Temperaturerhöhung, bezogen auf die Faulzeit

Es zeigt sich, dass bei einer Erhöhung der Faulraumtemperatur von 37°C auf 42 bis 52°C etwa 3 bis 4% mehr Gas produziert werden kann. Die zuvor beschriebenen Praxisbeispiele bestätigen diesen Ansatz. So geben Rossol et al. (2005) eine zusätzliche Gasproduktion von 4,8 % bei 42°C und Bailer (2009) eine Verbesserung um etwa 4 bis 5% bei etwa 50°C an.

Die Umsetzbarkeit des Ansatzes setzt voraus, dass trotz vollständiger Verstromung des Faulgases ein Wärmeüberschuss bei mesophiler Faulung besteht. Dies wird nachfolgend beispielhaft für eine Kläranlage mit einer Anschlussgröße von 25.000 EW berechnet.

- Anschlussgröße: 25.000 EW
- Klärschlammanfall: 80 g/E/d
- TS Zulauf Faulung: 40 g/l
- GV Zulauf Faulung: 70 %
- Gasanfall: 450 l/kg oTR<sub>zu</sub>
- Methangehalt: 65 %
- BHKW:  $\eta_{th} = 57 \%$



Bei vollständigem Einsatz des Faulgases im BHKW ergibt sich die Wärmeproduktion über dessen thermischen Wirkungsgrad. Bei einer zugeführten oTR-Fracht in Höhe von 1.400 kg oTR/d und der angenommenen Faulgasausbeute von 450 l/kg oTR entstehen 630 Nm<sup>3</sup> Faulgas pro Tag. Mit einem thermischen Wirkungsgrad von 57 % und einem Energiegehalt von 6,5 kWh/m<sup>3</sup><sub>FG</sub> entstehen daraus 2.334 kWh<sub>th</sub>/d bzw. 92,6 Wh<sub>th</sub>/EW/d.

Gemäß Energiehandbuch (MURL NRW, 1999) verteilt sich der Wärmebedarf bei mesophiler Faulung (37 °C) im Mittel wie folgt:

- Schlammaufheizung: 70 %
- Faulbehälteraufheizung (Transmission): 20 %
- Raumwärme (Betriebsgebäude): 10 %

Für die Rohschlammtemperatur werden gemessene Jahresganglinien einer vergleichbaren Anlage verwendet. Die sich ergebende Wärmebilanz bei einer konstanten Faulraumtemperatur von 37°C ist in Bild 4.31 dargestellt.

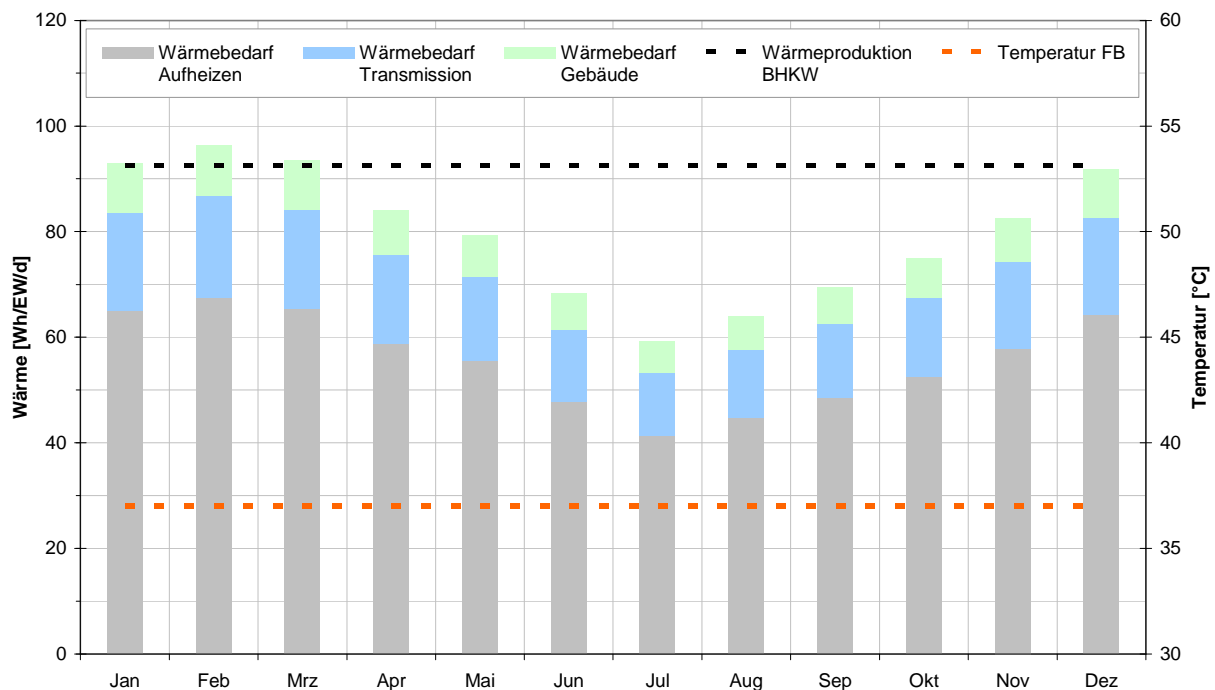


Bild 4.31: Wärmebilanz bei einer konstanten Faulraumtemperatur von 37 °C

Es zeigt sich, dass in den Wintermonaten kein Wärmeüberschuss vorhanden ist, die vorhandene Wärmeproduktion sogar teilweise nicht ganz ausreicht, um den Wärmebedarf zu decken. In den Sommermonaten hingegen übersteigt die Wärmeproduktion den erforderlichen Wärmebedarf deutlich, so dass die überschüssige Wärme über Notkühler abgeführt werden muss.

Anstatt die Faultemperatur über das ganze Jahr konstant zu halten, ist es auch möglich, die gesamte Wärmeproduktion abzüglich der für die Gebäudebeheizung benötigten Wärme dem Faulbehälter zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise verändert sich die Faultemperatur entsprechend. Die für diesen Fall resultierende Wärmebilanz ist in Bild 4.32 dargestellt.

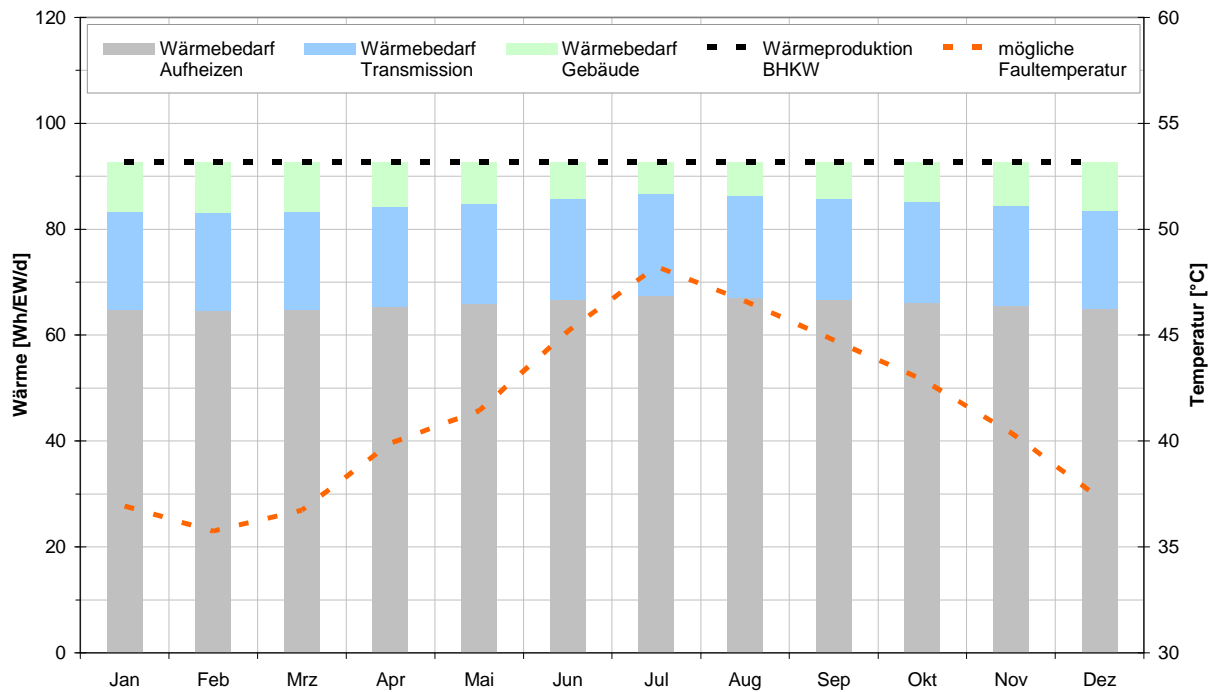


Bild 4.32: Wärmebilanz und resultierende Faultemperatur bei vollständiger Nutzung der Wärmeproduktion

Für die betrachtete Kläranlage kann im Jahresmittel die Faulraumtemperatur um rund 4 °C gesteigert werden, wobei sie maximal 48 °C im Sommer beträgt. Sofern nur vorhandene Überschusswärme zur weiteren Aufheizung des Faulbehälters verwendet wird, fallen keine zusätzlichen Kosten an. Demgegenüber steht der Nutzen aus dem erhöhten Gasanfall und einer eventuell erhöhten KWK-Vergütung auf Grund der vollständigen Nutzung der Prozesswärme.

Bei Umsetzung dieser Maßnahme sollten die Auswirkungen auf den Faulprozess intensiv beobachtet werden und die Faulbehältertemperatur sollte nicht schneller als um 2 °C pro Woche erhöht werden (Rossol et al., 2005).

### 4.4.5 Ausgasung und Nachfaulung

#### Beschreibung

Der aus dem Faulbehälter abgezogene Faulschlamm verfügt über weiteres Restgaspotential. Dieses kann über zwei verschiedene Wege erschlossen werden:

- **Nachfaulung: Zusätzliches Gaspotential durch enthaltene Restorganik**

Der zuvor im Faulbehälter erwärmte Faulschlamm kühlt nur langsam aus, so dass die methanbildenden Bakterien auch im Nacheindicker oder Schlammstapelbehälter zumindest während der Sommermonate aktiv bleiben und die vorhandene Restorganik mit einem oTR-Gehalt von rund 50 bis 60 % weiter abbauen können. Der Schlamm-  
austrag besteht zudem stets zu einem geringen Anteil noch aus Rohschlamm, da Kurzschlussströmungen bei einstufig betriebenen voll durchmischten Faulungsanlagen nicht vollständig vermieden werden können (Roediger, 1997).

- **Ausgasung: Nutzung des im Faulschlamm gebundenen Methangases**

In dem ausgefaulten Schlamm ist ein gewisser Anteil des zuvor gebildeten Methangases in gelöster Form gespeichert. Die Löslichkeit von Methan in Faulschlamm ist dabei nach dem Henryschen Gesetz direkt proportional zum Partialdruck des Methans im erzeugten Klärgas über der Schlammphase (Bild 4.33). Bei einer anschließenden Entspannung unter atmosphärischen Bedingungen wird dieses Methan unkontrolliert freigesetzt (Levy, 2009).

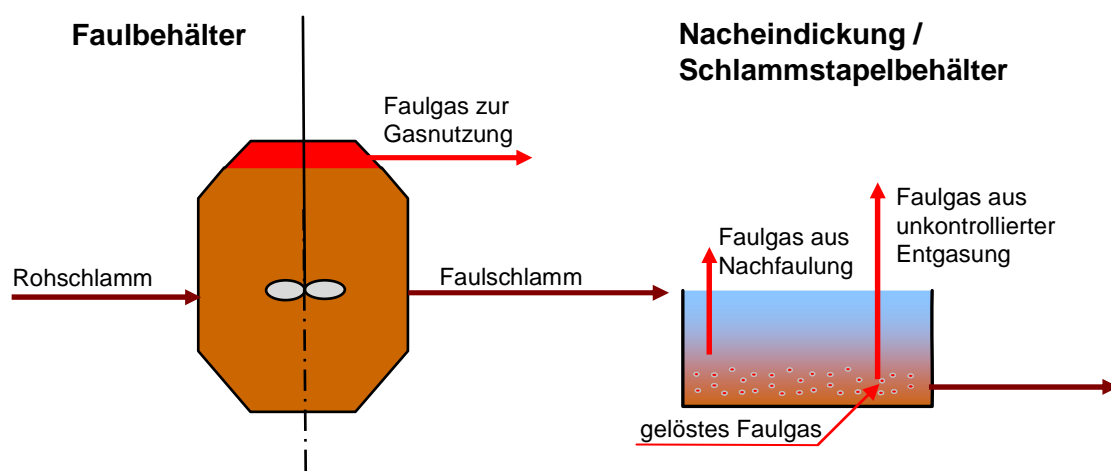


Bild 4.33: Schema zum Restgaspotential aus Faulschlamm bei der Nacheindickung

### Technische Verfahrensmöglichkeiten

Durch eine Umnutzung des Nacheindickers bzw. des Schlammstapelbehälters als geschlossenen Nachfaulraum mit Gasfassung kann das zusätzliche Potential aus der noch enthaltenen Restorganik genutzt werden. Nachträgliche Umrüstungen solcher Behälter wurden bereits durchgeführt (siehe Bild 4.34).



Bild 4.34: Nachrüsten eines Schlammstapelbehälters (AVA, 2012)

(links: Abdeckung mit Gasfassung, rechts: Einbau eines Rührwerks)

Mit einer Vakuumentgasung kann das im Faulschlamm gelöste Methangas entnommen werden. Hierzu wird ein Unterdruck von 0,7 - 0,9 bar angelegt, der das gelöste Gas in die Gasphase überführt. Die erforderliche Energie für die Vakuumanlage beträgt laut Herstellerangaben (Pondus Verfahrenstechnik GmbH) ca. 0,15 - 0,3 kWh/m<sup>3</sup><sub>Faulschlamm</sub> und hat damit einen großen Einfluss auf die Energiebilanz. Die Entgasung soll neben der zusätzlichen Gasentnahme auch die weitere Behandlung des Faulschlammes verbessern, indem das Absetzverhalten und die Entwässerbarkeit positiv beeinflusst werden.

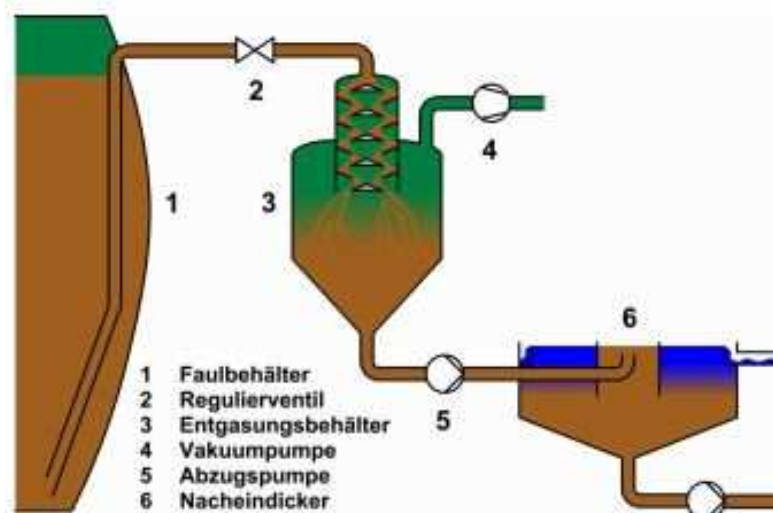


Bild 4.35: Faulschlamm-Vakuumentgasung (Fa. Pondus Verfahrenstechnik GmbH)

### Auswirkungen auf den Gasertrag

Gemäß Angaben der Fa. Pondus enthält der ausgefautete (stabilisierte) Schlamm gelöstes Methan in Höhe von  $250 \text{ l}_N/\text{m}^3_{\text{Faulschlamm}}$ . Bei einem mittleren Faulschlammvolumen in Höhe von  $2,0 \text{ l}/(\text{E} \cdot \text{d})$  entspricht dies einem Methananfall von  $0,5 \text{ l}_N/(\text{E} \cdot \text{d})$ . Bezogen auf den abgeschätzten mittleren Grundertrag von  $20 \text{ l}_N/(\text{E} \cdot \text{d})$  ergibt sich hieraus ein zusätzliches Gaspotential von etwa 2,5 %.

Das zusätzliche Faulgaspotential durch die im Faulschlamm enthaltene Restorganik kann auf Basis von Faulversuchen mit stabilisiertem Schlamm bei einer Nachfaulzeit von ca. 20 d auf etwa  $50\text{-}150 \text{ l}_N/\text{kg oTR}_{\text{Faulschlamm}}$  abgeschätzt werden. Entsprechende Faulversuche sind beispielhaft in Bild 4.36 dargestellt. Bei einem Faulschlammanfall von  $50 \text{ g}/(\text{EW} \cdot \text{d})$  mit einem Glühverlust von etwa 50% oTR ergibt sich damit ein zusätzliches Potential in Höhe von 22,3 bis  $67 \text{ l}_N/\text{kg oTR}$  bzw. umgerechnet 1,3 bis  $3,8 \text{ l}_N/(\text{E} \cdot \text{d})$ . Im Mittel entspricht dies einem zusätzlichen Potential bezogen auf den mittleren Grundertrag in Höhe von ca. 10 %.

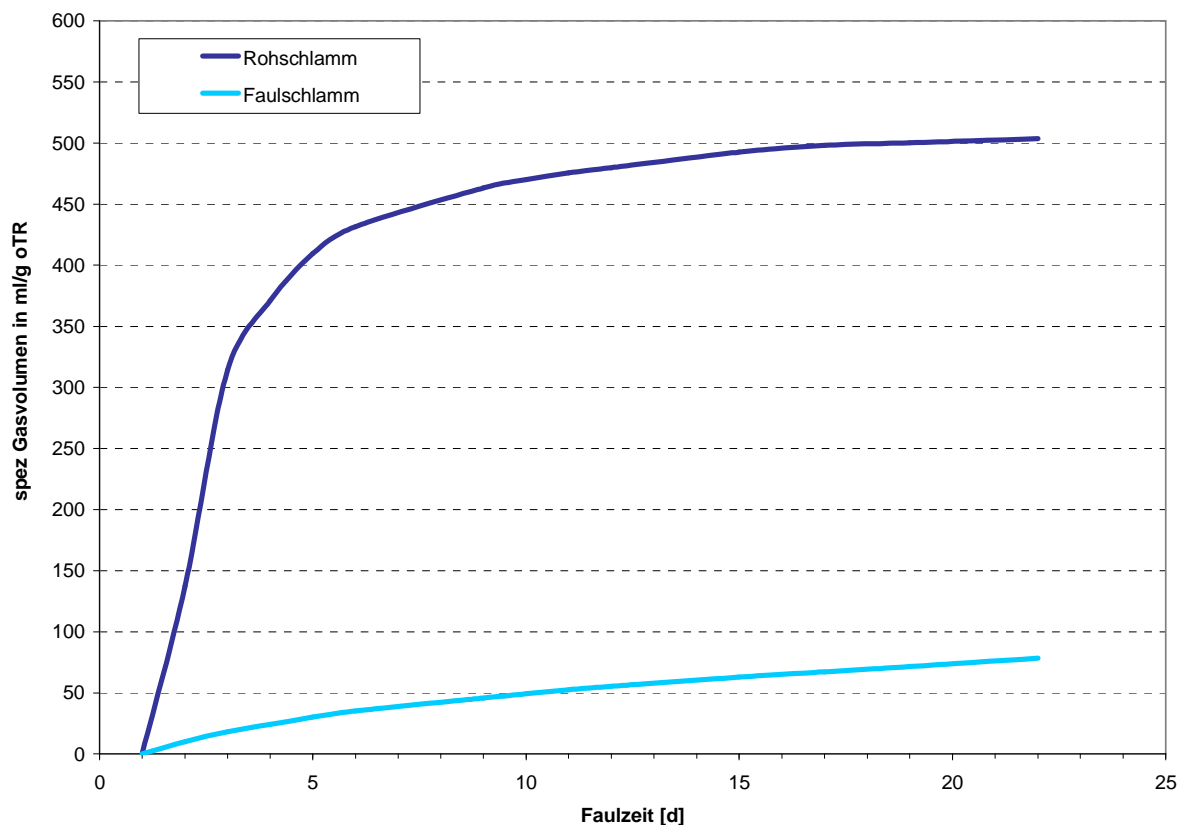


Bild 4.36: Gasproduktion unterschiedlicher stabilisierter Faulschlämme, bezogen auf die zugeführte organische Trockensubstanz (WiW, 2013)

Die Auswirkungen auf den Gasertrag sind in Bild 4.37 getrennt für Entgasung und Nachfaulung bilanziert. Als Ausgangswert wird ein spezifischer Gasanfall von  $20 \text{ l}_N/\text{E}/\text{d}$  angesetzt.

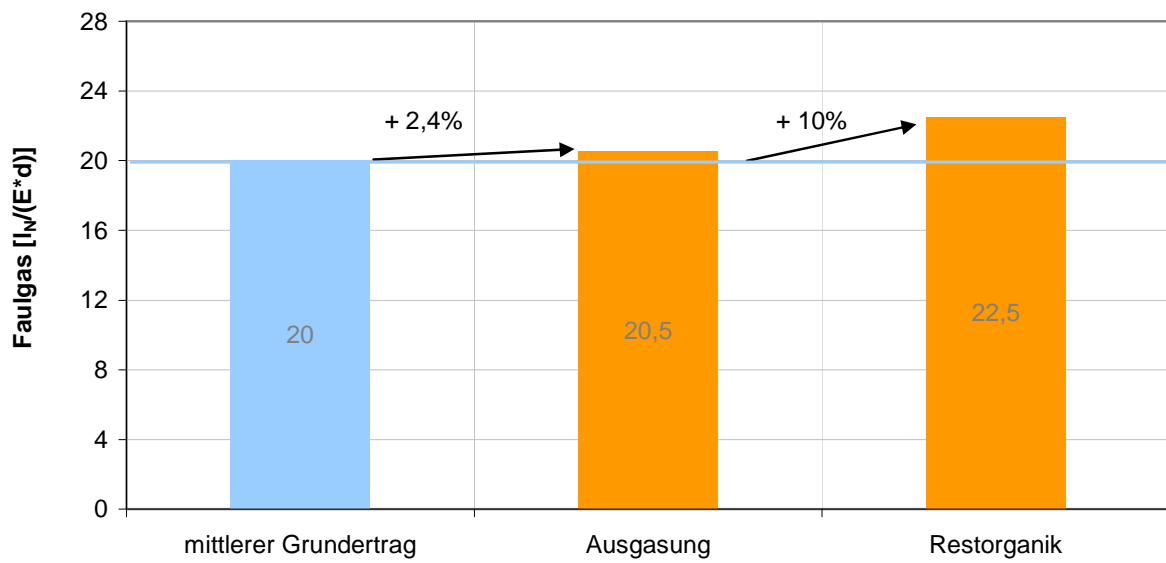


Bild 4.37: Zusätzliches Faulgaspotential durch Ausgasung bzw. Nachfaulung der Restorganik

## 4.5 Zusammenfassung der Verfahrensansätze

Die vorgenannten Maßnahmen zur Optimierung der Gaserzeugung sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst. Zu jedem Ansatz wird der maßgebende Faktor benannt, der zu einer Beeinflussung der Gasproduktion führt. Des Weiteren ist eine inhaltliche Kurzbeschreibung enthalten, welche die Beeinflussung erläutert. Als Referenz für den möglichen zusätzlichen Gasertrag dient jeweils der mittlere Grundertrag in Höhe von  $20 I_N/(EW \cdot d)$ . Auf Grund diverser Randbedingungen, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können oder abweichenden Literaturangaben, wird das Verbesserungspotential in min/mittel/max-Bereiche untergliedert. Für ausführlichere Erläuterungen zu den jeweiligen Verfahrensmöglichkeiten wird auf die entsprechenden Kapitel verwiesen.

Tabelle 4.7: Zusammenfassung der untersuchten Maßnahmen

Kapitel	Name	Auswirkung	Hintergrund	zusätzlicher Gasertrag [%]		
				Min	Mittel	Max
4.2.1	Vorklärzeit erhöhen	mehr energiereicher PS	Erhöhte Abscheideleistung in der Vorklärung durch längere Aufenthaltszeit	+ 5,0%	+ 7,5%	+ 10,0%
4.2.2	Vorfällung	mehr energiereicher PS	Erhöhte Abscheideleistung in der Vorklärung durch chemische Unterstützung (Fällmittel)		+ 12,0%	
4.2.3	Schlammalter reduzieren	mehr Organik im ÜS	Erhöhter Überschussschlammabzug und damit verringerter Biomasseabbau in der Biologie		+ 3,5%	
4.2.4	PW-Behandlung	mehr energiereicher PS	besseres C/N-Verhältnis und damit längere Vorklärzeiten möglich	+ 4,5%	+ 4,8%	+ 5,0%
4.3.1	Eindickung erhöhen	erhöhte Faulzeit	Schlammvolumen im Zulauf zur Faulstufe reduzieren	+ 3,0%	+ 5,0%	+ 7,0%
4.3.2	Desintegration	verbesserter Abbaugrad	Beschleunigte Hydrolyse durch Zellaufschluss	+ 15,0%	+ 22,5%	+ 30,0%
4.4.1	Vollständige Nutzung Faulraum	erhöhte Faulzeit	Vermeidung von Ablagerungen / Kurzschlussströmungen / Schwimmdecken	+ 1,0%	+ 5,3%	+ 9,5%
4.4.2	Mehrstufige Faulung	verbesserter Abbaugrad	Verbesserter Abbau durch höhere Substratkonzentration in vorgeschalteter Stufe		+ 11,0%	
4.4.3	Adaptive Temperatur-anpassung	erhöhte Abbaugeschwindigkeit	schnellere Abbaugeschwindigkeit und damit schnelleres Erreichen der Faulgrenze.		+ 5,0%	
4.4.4	Restgaspotential Faulschlamm	zusätzliches Methan	gezielte Entgasung von gelöstem Methan und Nachfaulung von Restorganik	+ 2,4%	+ 7,4%	+ 12,4%

### Optimierungspotential der Maßnahmen

Die Auswirkungen der untersuchten Optimierungsmöglichkeiten fallen je nach Maßnahme unterschiedlich hoch aus. Um dennoch einen Vergleich zu ermöglichen, sind die ermittelten prozentualen Verbesserungspotentiale in Bild 4.38 zusammengefasst dargestellt.

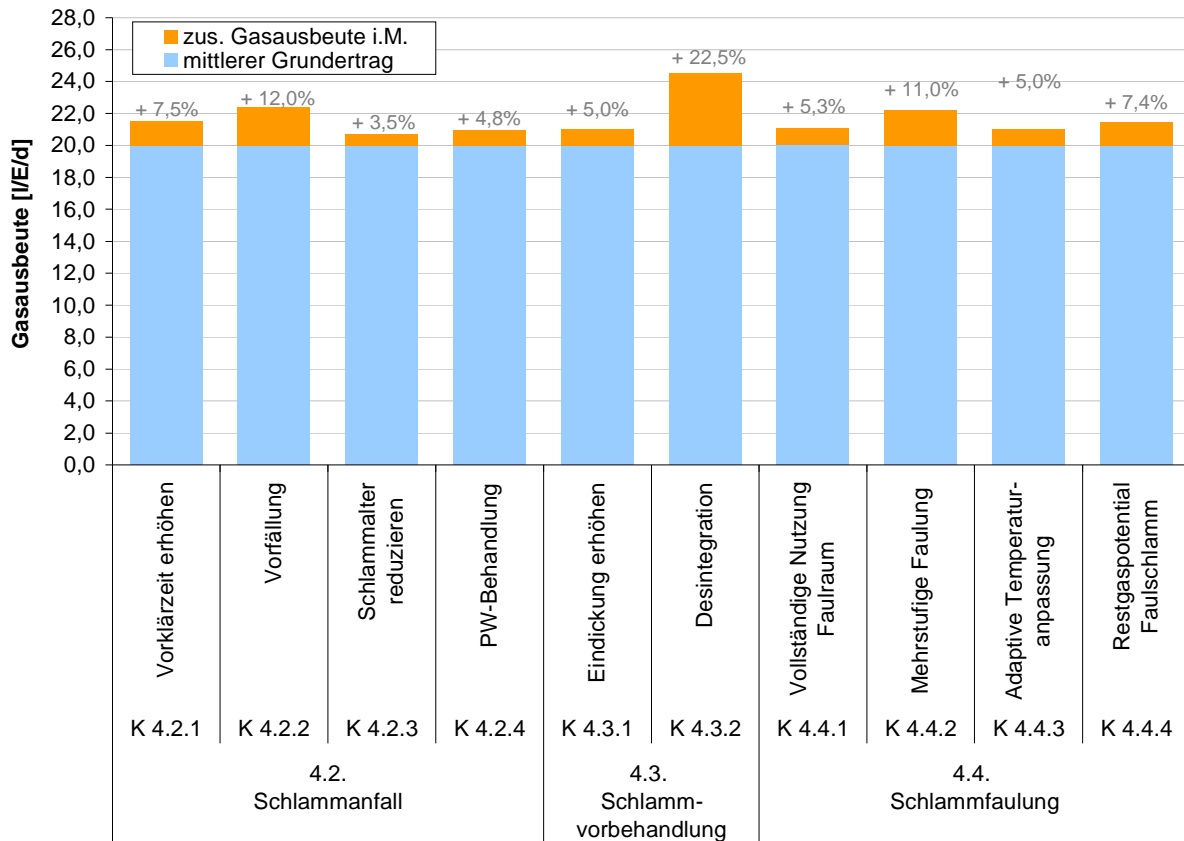


Bild 4.38: Zusammenfassung der Auswirkungen auf den Gasertrag

### Kombinationsmöglichkeiten bzw. Gesamtpotential

Ein kumulatives Gesamtpotential kann aus den Maßnahmen nicht abgeleitet werden, da sich die positiven Effekte der Einzelmaßnahmen nur eingeschränkt addieren lassen. So haben diverse Ansätze gleichermaßen eine Verlängerung der Faulzeit und damit der erreichten Abbauleistung zur Folge. Ist jedoch die praktische Faulgrenze bereits erreicht (vgl. dazu Bild 4.28), wird durch weitere Maßnahmen, die auf eine Verlängerung der Faulzeit abzielen, kein weiterer Mehrertrag generiert. Des Weiteren haben beispielsweise Desintegrationsverfahren eine erhöhte Stickstoffrückbelastung aus dem Prozesswasser zur Folge, weswegen im Hinblick auf die Denitrifikationskapazität der biologischen Stufe ohne eine separate Prozesswasserbehandlung nicht mehr die maximale Aufenthaltszeit in der Vorklärung realisierbar ist. Eine Kombination der Maßnahmen ist daher im Einzelfall zu untersuchen.

Bezüglich des Optimierungspotentials für NRW wird auf das Kapitel 8 verwiesen, wo einzelne Maßnahmen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit untersucht werden.



## 5 Verbesserung der Gasnutzung

Das durch die anaerobe Stabilisierung des Rohschlammes erzeugte Faulgas stellt den größten Teil des Energiedargebotes auf einer Kläranlage dar. Bis in die frühen neunziger Jahre hinein wurde das Faulgas zumeist lediglich zur Beheizung der Faulbehälter und der Betriebsgebäude genutzt. Überschüssiges Faulgas wurde abgefackelt und Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen.

Heute wird das Faulgas in der Regel in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu Strom und Wärme umgewandelt, bei erhöhtem Wärmebedarf temporär auch zur reinen Wärmeerzeugung oder auch zum Betrieb direkt angetriebener Arbeitsmaschinen (Verdichter) genutzt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Weitergabe des Faulgases an Dritte. Das Faulgas kann dazu unmittelbar über eine Faulgasleitung oder als aufbereitetes Bioerdgas über das öffentliche Gasnetz transportiert werden. Aufgrund der hohen und stark degressiven Investitionskosten ist die Aufbereitung allerdings auf große Kläranlagen mit einer Erzeugung von mehreren 100 m<sup>3</sup> Klärgas pro Stunde und damit wenige Einzelfälle beschränkt.

Im vorangegangenen Kapitel wurden prozess- und verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Steigerung der Faulgasausbeute aufgezeigt. Im Mittel ergibt sich je nach Rahmenbedingungen und unter Einhaltung der übrigen abwassertechnischen Prozessparameter eine zusätzliche Faulgasausbeute von etwa 4 - 10 %. Die Auswirkungen der vorgestellten Maßnahmen auf die Faulgasausbeute und weitere wesentliche Betriebsparameter einer Kläranlage können mit dem in Kapitel 7 dargestellten Modellansatz von Betreibern für ihre jeweilige Kläranlage geprüft werden.

Neben einer weitgehenden Erschließung des vorhandenen Faulgaspotenzials ist die effiziente Nutzung des Faulgases entscheidend, um zur Erreichung klimapolitischer Ziele beizutragen und den Eigenversorgungsgrad zu erhöhen. Die praktisch relevanten Nutzungsalternativen und Technologien (Abschnitt 5.1) werden unter den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit und der CO<sub>2</sub>-Emissionen quantitativ verglichen (Abschnitt 5.2).

## 5.1 Anforderungen und verfügbare Gasnutzungstechnologien

Aus den Ergebnissen der Datenerhebung (Kapitel 3) werden die Anforderungen an eine verbesserte Gasnutzung abgeleitet (Abschnitt 5.1.1) und die verfügbaren Nutzungsalternativen und Technologien für die Gasnutzung beschrieben (Abschnitt 5.1.2).

### 5.1.1 Anforderungen an eine verbesserte Gasnutzung

Bezogen auf den Heizwert ( $H_i$ ) wird in Nordrhein-Westfalen mit 76,9 % der weit überwiegende Teil des Faulgases in KWK-Anlagen genutzt. Das verbleibende Faulgas wird überwiegend zu Heizzwecken (16,6 %) verwendet oder in direkt angetriebenen Arbeitsmaschinen genutzt (1,7 %). Mit 4,8 % wird jedoch auch ein erheblicher Teil des Faulgases abgefackelt (vgl. Abschnitt 0). Um die Effizienz der Gasnutzung zu bewerten und Optimierungspotenziale zu identifizieren, werden die einzelnen Nutzungsalternativen genauer betrachtet.

#### Kraft-Wärme-Kopplung

Auf Grundlage der durchgeführten Datenabfrage kann der Anlagenbestand quantitativ bewertet werden. Die in den Fragebögen benannten elektrischen Nennwirkungsgrade ( $\eta_{el,Nenn}$ ) der KWK-Anlagen werden dazu mit Marktanalysen für *Klärgas-BHKW* aus den Jahren 2005 und 2011 verglichen. Diese werden regelmäßig von der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. und dem Energierferat der Stadt Frankfurt am Main durchgeführt und geben einen guten Überblick über Leistungsklassen und Wirkungsgrade zum Erhebungszeitpunkt (ASUE, 2005; ASUE, 2011).

Für den Vergleich wurden diejenigen Datensätze aus der Datenumfrage ausgewählt, bei denen ein BHKW als Gasnutzungsaggregat eingesetzt wird und bei denen Angaben zur elektrischen Nennleistung ( $kW_{el}$ ) sowie zum elektrischen Nennwirkungsgrad ( $\eta_{el,Nenn}$ ) vorhanden sind. Daraus ergeben sich 99 Datensätze.

Der Vergleich der Trendlinien zeigt, dass die mittleren elektrischen Wirkungsgrade des Anlagenbestandes deutlich unterhalb der üblichen Wirkungsgrade aus dem Jahr 2011 und sogar unterhalb derer aus dem Jahr 2005 liegen. Daraus lässt sich ableiten, dass das mittlere Alter des Anlagenbestandes in der Regel mehr als 8 Jahre beträgt. Eine Betrachtung der einzelnen Datenpunkte zeigt auch, dass der elektrische Wirkungsgrad einiger BHKW dem heutigen Stand entspricht. Diese BHKW wurden vermutlich bereits ausgetauscht. Insgesamt ist die Spreizung des elektrischen Wirkungsgrades über den gesamten Anlagenbestand sehr hoch.

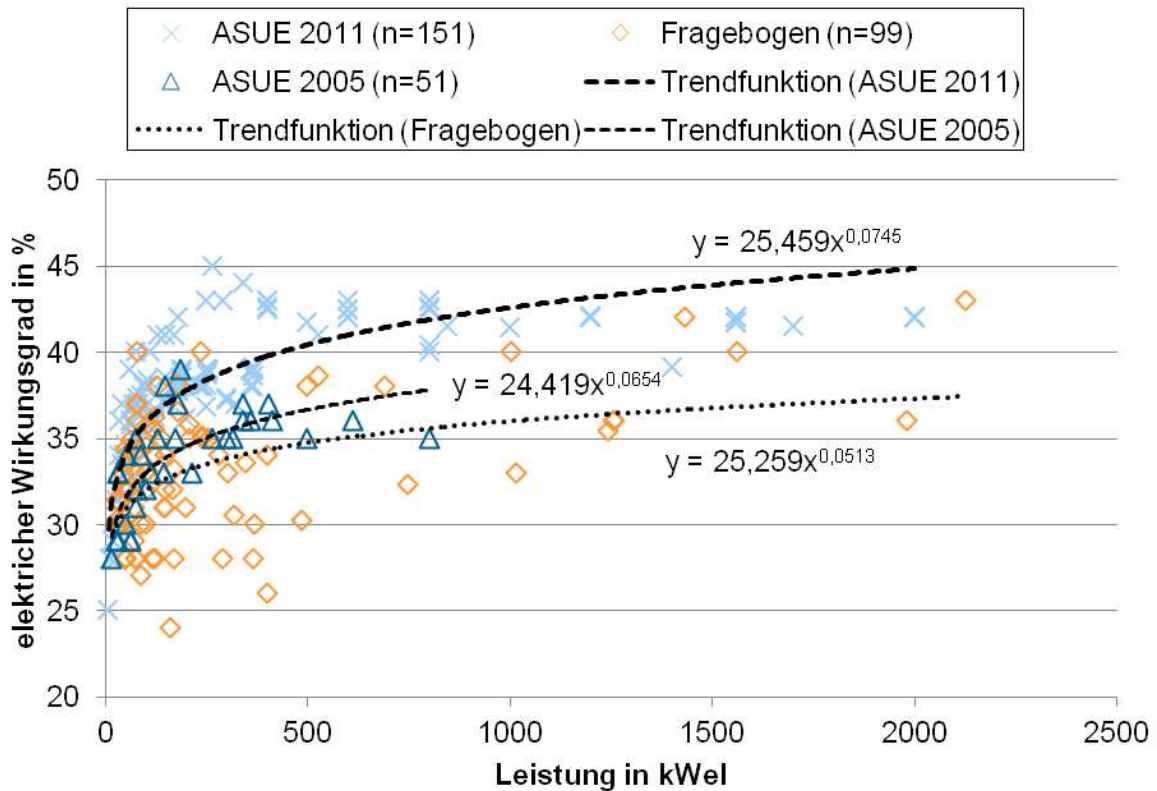


Bild 5.1: Vergleich der elektrischen Nennwirkungsgrade aus der Datenerhebung mit Marktanalysen aus den Jahren 2005 und 2011

Die vergleichsweise geringen elektrischen Wirkungsgrade im Anlagenbestand zeigen deutlich, dass die Nutzung des Faulgases durch moderne BHKW erheblich verbessert werden kann. Das hohe Alter der Anlagen erhöht zudem das Ausfallrisiko. Insbesondere bei fehlender Redundanz muss das „überschüssige“ Faulgas dann ggf. bis zur Ersatzbeschaffung abgefackelt werden. Unter Berücksichtigung der üblichen Nutzungsdauer für BHKW von 10 Jahren (BMF, 2000) und der geringen elektrischen Wirkungsgrade im Anlagenbestand besteht für viele BHKW aktuell ein Ersatzbedarf.

### Reine Wärmeerzeugung

Der Wärmebedarf auf Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung wird wesentlich durch die Beheizung von Faulraum und Betriebsgebäuden bestimmt. Bereits beim Einsatz von KWK-Anlagen kann in der Regel der gesamte Wärmebedarf einer Kläranlage gedeckt werden. Wird das Faulgas hingegen ausschließlich in einer Kesselanlage genutzt, ergeben sich insbesondere in den Sommermonaten erhebliche Wärmeüberschüsse, die ein Abfackeln des Faulgases nötig machen (siehe Abschnitt 3.4.2). Die Gründe für eine reine Wärmeerzeugung mit Kesselanlagen sind vermutlich die höheren spezifischen Kosten von kleinen KWK-Anlagen und die damit verbundene geringe Wirtschaftlichkeit für einen Einsatz

dieser Anlagen. Eine regelmäßige Prüfung der Marktsituation ist hier erforderlich. Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit sind:

- die Bezugspreise für Strom und Wärme (Erdgas/Erdöl/Fernwärme/Andere)
- die Investitions- und Betriebskosten einer passenden KWK-Anlage
- die Netto-Wirkungsgrade der passenden KWK-Anlage
- die Fördersituation (Stromvergütung, KWK-Zuschlag etc.)

### **Direkt angetriebene Arbeitsmaschinen**

Bei direkt angetriebenen Arbeitsmaschinen handelt es sich in der Regel um Verdichter zur Druckluftherzeugung. Maschinen zur Abwasserförderung (Pumpen) o.ä. sind am Markt nicht als Gasmaschine verfügbar. Das Faulgas wird ähnlich wie bei einem BHKW motorisch umgewandelt, anstelle eines Generators wird jedoch ein Verdichter angetrieben. Die hierdurch vermiedenen elektrischen Umwandlungs- und Leitungsverluste sind von Vorteil, wenn die Arbeitsmaschinen konstant und gleichmäßig betrieben werden sowie eine Wärmesenke besteht. Müssen die Arbeitsmaschinen jedoch in ihrer Leistung geregelt werden, besteht der Nachteil, dass dies kaum bzw. nur mit hohen Wirkungsgradverlusten möglich ist.

Die Verluste, die bei der Umwandlung von kinetischer Energie in elektrische Energie entstehen, sind bei modernen KWK-Anlagen demgegenüber relativ gering. Durch die Verwendung von Frequenzumrichtern kann eine Leistungsregelung darüber hinaus in breiten Leistungsbereichen sehr effizient erreicht werden. Wie bei der reinen Wärmeherzeugung sollte daher auch bei direkt angetriebenen Verdichtern regelmäßig geprüft werden, ob die ursprünglich angenommenen Rahmenbedingungen noch zutreffen.

### **Fackelverluste**

Die Gasfackel wird heute in der Regel nur noch als Notfackel genutzt, so dass sich Fackelverluste nur bei unerwarteten oder unvermeidlichen Betriebszuständen ergeben. Mögliche Ursachen für Fackelverluste sind:

- Ausfall oder Wartung von KWK-Anlagen bzw. Heizkesseln
- fehlende Redundanz von Gasnutzungsaggregaten
- stark fluktuierende Gasausbeute (zeitweise Überproduktion)
- nicht vorhandene oder zu klein dimensionierte Gasspeicher
- klein dimensionierte Gasnutzungsaggregate (strukturelle Überproduktion)
- geringer (Wärme-)bedarf der Kläranlage

---

Fackelverluste werden sich nie vollständig vermeiden lassen, können jedoch durch den Betrieb der Anlage (Faulturmbeschickung) oder das Anlagenkonzept (Redundanz, Gasspeicher, Regelung) beeinflusst werden. Eine allgemeine quantitative Bewertung von Fackelverlusten ist kaum möglich.

### **Weitergabe von Faulgas an Dritte**

Die Möglichkeit der Weitergabe des gesamten Faulgases an Dritte, ob als Faulgas oder aufbereitetes Bioerdgas besteht derzeit nur als technische Option und ist nur in besonderen Ausnahmefällen wirtschaftlich umsetzbar. Wird das gesamte Faulgas abgegeben, müssen der Strom- und der Wärmebedarf einer Kläranlage anderweitig gedeckt werden. Dies ist mit hohen Kosten verbunden, die durch die Erlöse aus dem abgegebenen Faulgas unter den heutigen Rahmenbedingungen nicht gedeckt werden können (Kolisch, 2011). Wird die zwangsläufig extern bezogene Energie konventionell erzeugt, verschlechtert sich zudem die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Kläranlage. Eine Abgabe an Dritte kann ggf. erfolgen, wenn das Gas im Rahmen eines übergeordneten energetischen Gesamtkonzepts anderenorts effizienter genutzt werden kann. Dies ist z.B. bei verfügbaren industriellen Wärmeüberschüssen in direkter Nähe der Kläranlage denkbar, die den Wärmebedarf der Kläranlage vollständig abdecken.

### 5.1.2 Gasnutzungstechnologien

Unter Berücksichtigung typischer Faulgasmengen und der sich daraus ergebenden Leistungsklassen stehen zur Nutzung von Faulgas auf Kläranlagen im Wesentlichen drei technologische Varianten zur Verfügung. Diese sind gemäß Bild 5.2 Mikrogasturbinen, Gasmotoren (Blockheizkraftwerke) und Brennstoffzellen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Stromerzeugung ab einer thermischen Leistung von etwa 200 kW<sub>th</sub> mittels ORC-Anlagen zu erhöhen.

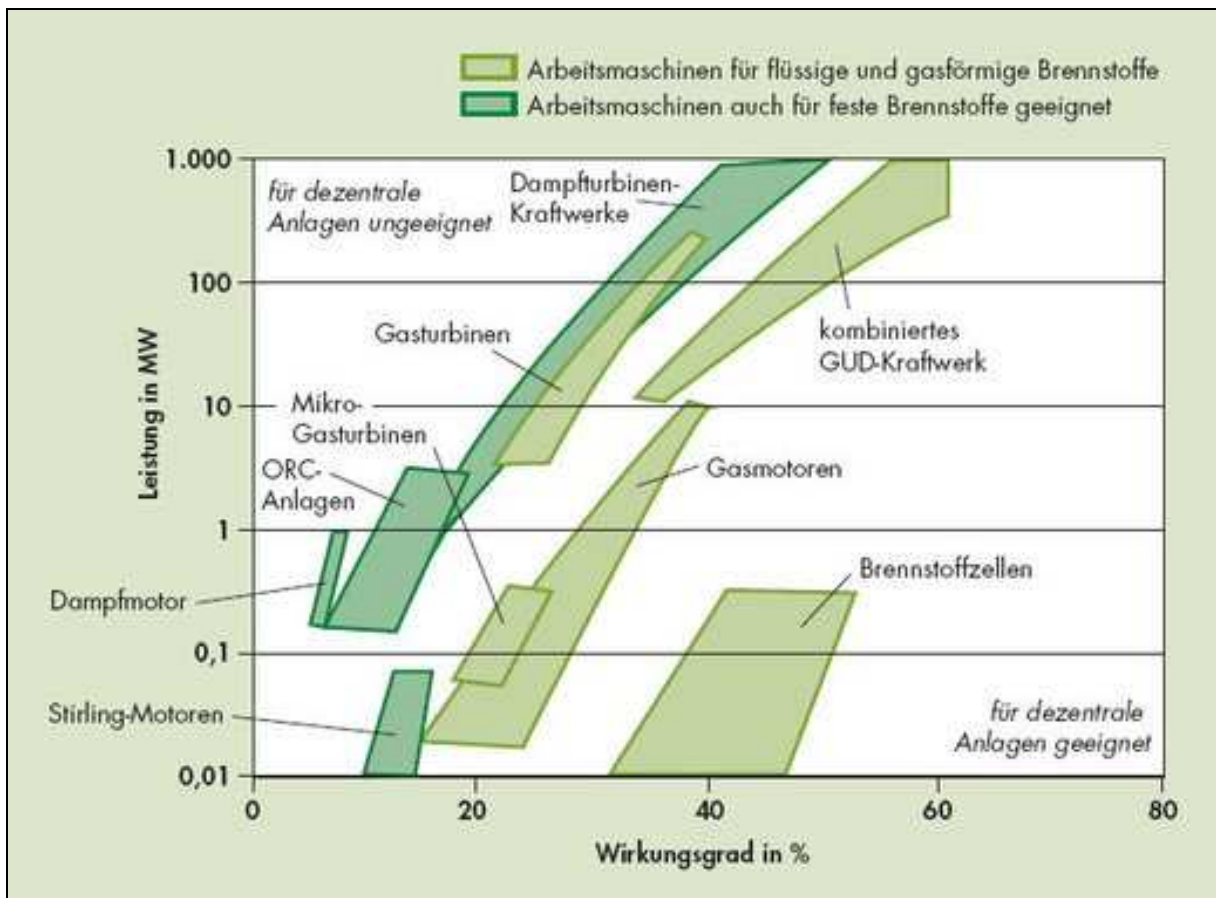


Bild 5.2 Elektrische Wirkungsgrade von Kraftwerken (FIZ, 2010)

## Blockheizkraftwerk

In einem Blockheizkraftwerk wird mittels Verbrennungsprozess sowohl Wärme als auch Strom erzeugt. BHKW-Anlagen bestehen im Wesentlichen aus:

- BHKW-Motor mit selbstregelndem Drehstrom-Synchrongenerator
- Motorkühlwassersystem und Wärmerückgewinnung
- Modul-Steuerschrank, Startanlage, elektrische Warmhalteeinrichtung, Schaltanlage
- Schmierölanlage
- Abgaswege mit Wärmetauscher und -schalldämpfer
- Zu- und Abluftanlage
- Zweikreis-Tischkühler für Not-/Gemischkühlung

Das zur Verbrennung genutzte Faulgas muss für die Umwandlung im BHKW die vom Hersteller angegebenen Parameter einhalten. Parameter, die einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität und die damit erzielbare Energieausbeute haben, sind u.a.:

- Heizwert
- Methanzahl
- Gesamtschwefel
- Summe der organischen Siliziumverbindungen

Während Heizwert und Methanzahl nicht unmittelbar beeinflussbar sind, können der Schwefelgehalt sowie die Siloxane durch entsprechende Reinigungsanlagen (Trocknung, Eisenerzfilter/Wäscher, A-Kohlefilter) reduziert werden. Dem aufbereiteten Faulgas wird gereinigte Verbrennungsluft beigemischt und das Gas-Luft-Gemisch mit einem Abgas-Turbolader verdichtet. Die nachfolgende zweistufige Gemischkühlung sorgt durch eine Temperatursenkung für eine Volumenreduzierung. Sie besteht aus je einem Wärmetauscher (meist im Modul integriert) und einem Tischkühler pro Modul. Das Gas-Luft-Gemisch wird nachfolgend in den Motorraum eingespeist und dort verbrannt. Der Verbrennungsmotor treibt über eine Kupplung den Generator an und erzeugt dadurch elektrische Energie. Die Abwärme des Verbrennungsmotors wird über nachgeschaltete Wärmetauscher (Schmieröl, Kühlwasser, Abgas) in das Wärmenetz der Kläranlage abgegeben. Weiterhin wird nicht erforderliche oder zu viel erzeugte Wärme wie die Gemischkühlung über Tischkühler abgefahren. Nachfolgend ist in einem Verfahrensschema beispielhaft die Integration einer BHKW-Anlage und der erforderlichen Nebenaggregate dargestellt.

Tabelle 5.1: Beispiel für Anforderungen an das eingesetzte Faulgas (MWM, 2011)

Methanzahl	Änderungsgeschwindigkeit	kleiner 10/min.
Heizwert	unterer Heizwert $H_U$	größer $4 \text{ kWh/m}_n^3$
	$\text{CO}_2$ pro $H_U$	kleiner $10 \text{ Vol\%/kWh/m}_n^3$
	Änderungsgeschwindigkeit	kleiner 5 %/min
	Schwefelgehalt	
	Gesamt S	kleiner 2200 mg/10kWh
Schwefelwasserstoffgehalt	$\text{H}_2\text{S}$ -Gehalt	kleiner 0,15 Vol%/10kWh entspricht 1500 ppm/10kWh
	Chlorgehalt	
	Gesamt Cl	kleiner 100 mg/10kWh
Fluorgehalt	Gesamt F	kleiner 50 mg/10kWh
	Chlor und Fluorgehalt	
	Summe Cl und F	kleiner 100 mg/10kWh
Ammoniakgehalt	Gesamt $\text{NH}_3$	kleiner 30 mg/10kWh
	Siliziumverbindungen	
	Gesamt Si-Verbindungen	kleiner 20 mg/10kWh
Staubgehalt	Gesamt	kleiner 10 mg/10kWh
	Korngröße	3 - 10 $\mu\text{m}$
	Öldämpfe	
	größer C5 / kleiner C10	kleiner 3000 mg/10kWh
	größer C10	kleiner 250 mg/10kWh
Feuchte*	relative Feuchte $\varphi$	kleiner 80 %
	* bei tiefster Temperatur des gesamten Gasleitungssystems	



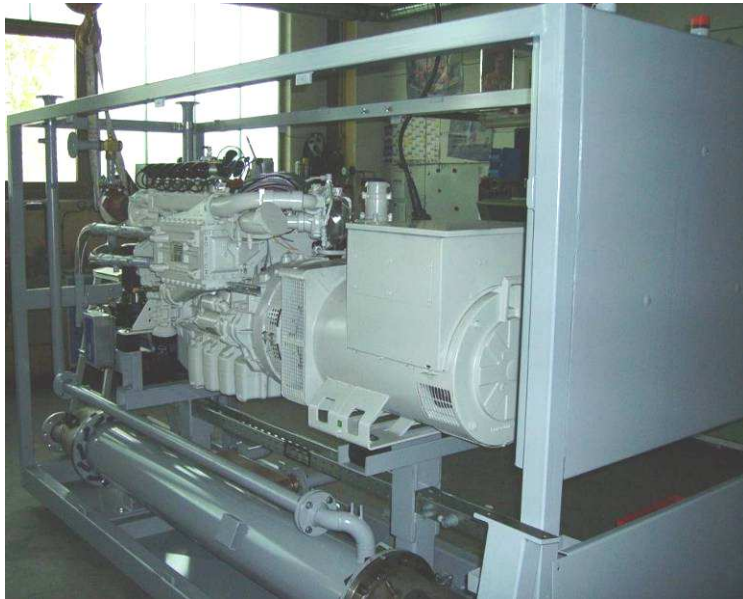


Bild 5.3 100 kW<sub>el</sub>-BHKW-Modul bei Werksabnahme

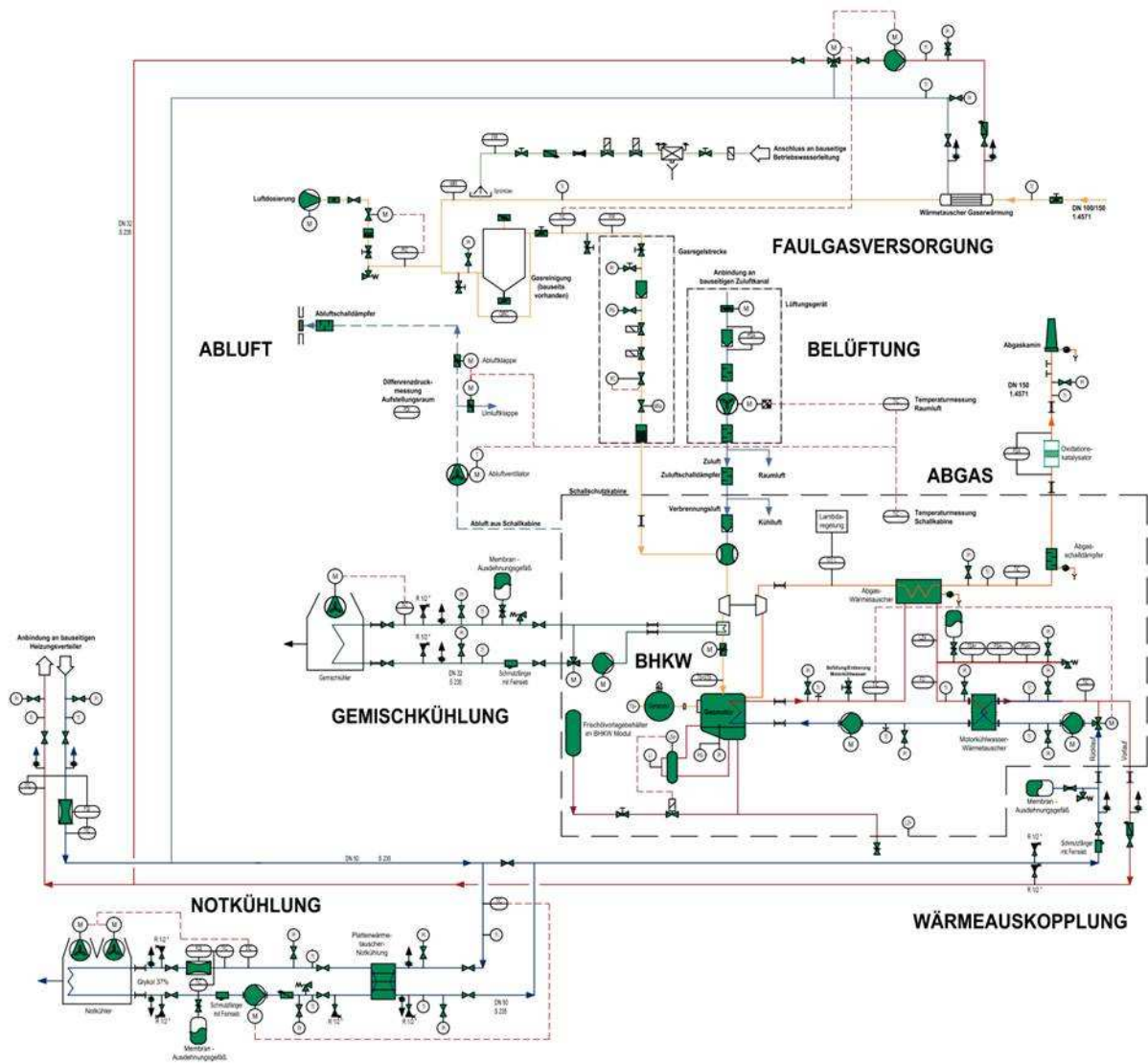


Bild 5.5 R-I-Schema eines BHKW auf einer kommunalen KA in NRW (jbi, 2013)

Für den Abgasstrom des Verbrennungsmotors ist eine Abgasanlage erforderlich, die im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten besteht:

- Abgaswärmetauscher mit Bypassleitung und Abgasklappen
- Abgasschalldämpfer
- Kondensatableitungen
- Wärmedämmungen
- Oxidationskatalysator

Die derzeit gültige TA-Luft 2002, nach der in aller Regel Verbrennungsmotoranlagen auf Klärwerken genehmigt werden, erlaubt einen Formaldehydwert von maximal 60 mg/Nm<sup>3</sup> im Abgas. Jedoch unterliegen diese Anlagen dem Emissionsminimierungsgebot, was bedeutet, dass durch entsprechende Maßnahmen nach dem Stand der Technik (Oxidationskatalysatoren, thermische Nachverbrennung der Abgase) der Formaldehydwert von maximal 60 mg/Nm<sup>3</sup> möglichst weit unterschritten werden sollte.

Weitere Grenzwerte für organische Stoffe existieren nicht mehr. Sofern örtliche (oder betriebsinterne) Vorschriften einen maximalen Formaldehydwert von 40 mg/Nm<sup>3</sup> vorschreiben, ist zwangsläufig die Verwendung von Oxidationskatalysatoren oder einer thermischen Nachverbrennung erforderlich. Darüber hinaus sind Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Kohlenmonoxid (CO) in der TA Luft differenziert geregelt. Entsprechende Grenzwerte sind Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Da Oxidationskatalysatoren bereits bei kleinen Mengen an Katalysatorgiften (z.B. Schwefelwasserstoff) unwirksam werden, ist eine Klärgasreinigung unumgänglich. Hierdurch wird auch einer korrosiven Schädigung des Abgaswärmetauschers durch Schwefelsäure vorgebeugt, welche sich durch die Oxidationsprozesse im Gasmotor (H<sub>2</sub>S - SO<sub>2</sub>) und im Oxidationskatalysator (SO<sub>2</sub> - SO<sub>3</sub>) bei anschließender Taupunktunterschreitung im Abgaswärmetauscher bilden kann.

Tabelle 5.2: NO<sub>x</sub>- und CO-Grenzwerte für Gasmotoren (TA Luft 2002, 2002)

	Grenzwert
<b>NO<sub>x</sub>-Grenzwerte</b>	
Magermotoren	500 mg/m <sup>3</sup>
Sonstige 4-Takt-Motoren	250 mg/m <sup>3</sup>
Zündstrahlmotoren für Bio-/Faulgas (> 3 MW)	500 mg/m <sup>3</sup>
Zündstrahlmotoren für Bio-/Faulgas (< 3 MW)	1.000 mg/m <sup>3</sup>
<b>CO-Grenzwerte</b>	
Erdgas und andere Gase (außer Bio-/Faulgas)	300 mg/m <sup>3</sup>
Fremdzündungsmotoren für Bio-/Faulgas (> 3 MW)	650 mg/m <sup>3</sup>
Fremdzündungsmotoren für Bio-/Faulgas (< 3 MW)	1.000 mg/m <sup>3</sup>
Zündstrahlmotoren für Bio-/Faulgas (> 3 MW)	650 mg/m <sup>3</sup>
Zündstrahlmotoren für Bio-/Faulgas (< 3 MW)	2.000 mg/m <sup>3</sup>

## Mikrogasturbine

Mikrogasturbinen (MGT) arbeiten ebenfalls nach dem Verbrennungsprozess, unterscheiden sich allerdings von den BHKW durch die erreichbaren Wirkungsgrade. Vergleichsweise geringen Wartungskosten, einem hohen thermischen Wirkungsgrad von etwa 55 % und geringeren Emissionswerten durch einfache Anlagentechnik steht ein elektrischer Wirkungsgrad von maximal 33 % entgegen. Unter Berücksichtigung der benötigten Gasreinigung und der vorgeschalteten Gasverdichtung reduziert sich dieser Wert um bis zu 6 %. Allerdings ist derzeit nur ein eingeschränktes Fabrikat- und Modellangebot in den elektrischen Leistungsstufen von 30 kW<sub>el</sub>, 65 kW<sub>el</sub> und 200 kW<sub>el</sub> pro Modul am Markt erhältlich. Einziger Hersteller ist die Firma Capstone, USA, die den Vertrieb über die Fa. VTA, Österreich, herstellt. Die Investitionskosten der Mikrogasturbine liegen nach aktuellen Angeboten um etwa 30 % über denen einer vergleichbaren BHKW-Anlage.



Bild 5.4 2 x 65 kW<sub>el</sub>-Mikrogasturbinen auf der KA Warendorf

Die Verbrennungsluft wird der Turbine über den Generator zugeführt. Nach Kompression der Luft auf 4 bar und Vorwärmung wird sie in der Brennkammer zusammen mit dem Brennstoff verbrannt. Die heißen Verbrennungsgase werden in der Turbine entspannt und treiben so Verdichter und Generator an. Der schnell laufende Permanentmagnet-Generator ist direkt auf die Antriebswelle der Turbine gekoppelt. Zum Start der Turbine dient der Generator als Motor, der die Turbine zunächst auf eine bestimmte Startdrehzahl antreibt. Sodann synchronisiert sich die Maschine mit dem Netz. Im Netzparallelbetrieb übernimmt nach der Zündung der Turbine der Generator die Last. Die Anforderungen an das Brenngas, die Wärmeauskoppelung und die Abluftseite entsprechen denen bei einer BHKW Anlage.

## Brennstoffzellen

Eine Brennstoffzelle (Fuel Cell, FC) wandelt die chemische Reaktionsenergie eines Brennstoffes und eines Oxidationsmittels mit hohem Wirkungsgrad in elektrische Energie mit minimalen Emissionen. Das Grundprinzip: Zwischen zwei Elektroden (Kathode und Anode) befindet sich ein Elektrolyt, das den Ionenaustausch ermöglicht. Die unterschiedlichen Brennstoffzellentypen ergeben sich aus dem verwendeten Elektrolytmaterial, welches die charakteristische Betriebstemperatur je nach Ausführung zwischen 80°- 1.000°C Bild 5.5 bestimmt.

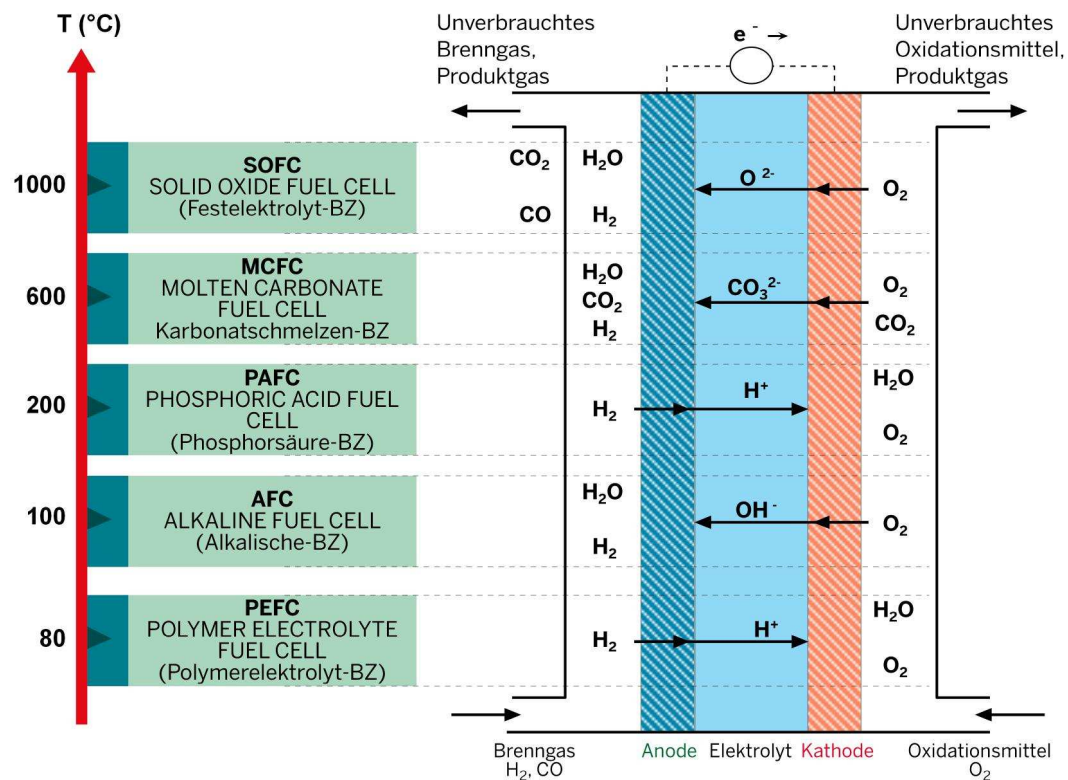


Bild 5.5 Brennstoffzellentypen und deren Funktionsweise (EnergieAgentur.NRW)

Die Betriebstemperatur hat einen weitreichenden Einfluss auf das zu verwendende Material der Elektroden, die Eignung der Brennstoffe sowie die weitere Nutzung der Restwärme und der dazu notwendigen Wassermengen. Diese Faktoren haben also auch eine wirtschaftliche Relevanz auf die Investitionskosten und Amortisationszeit (Blesl et al., 2004). Brennstoffzellen haben einen Gesamtwirkungsgrad von 90 % (davon elektrisch etwa 50 %); es werden keine Schwefeldioxide (SO<sub>2</sub>) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) ausgestoßen und die CO<sub>2</sub>-Emission ist gegenüber konventioneller Technik um 30 % reduziert. Der thermische Wirkungsgrad beträgt jedoch nur etwa 30 %, was deutlich unter dem für Kläranlagen erforderlichen Bedarf liegt.



Bild 5.6 Brennstoffzelle (CFC Solutions, 2005)

Brennstoffzellen benötigen eine hohe Qualität des eingesetzten Brenngases, um die elektrische Leistung optimal zu halten und eine wirtschaftliche Lebensdauer zu erreichen. In Abhängigkeit des Zelltyps bestehen daher unterschiedliche (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Chemische und thermodynamische Grenzwerte für den Einsatz von Brenngasen in verschiedenen Brennstoffzellentypen (Blesl et al., 2004)

Substanz/ Größe	Grenzwerte PAFC	Grenzwerte MCFC	Grenzwerte SOFC
Schwefel	1 ppm	0,1 ppm	1 ppm
Chlor	1 ppm	0,1 ppm	1 ppm
Fluor	k.A.	0,01 ppm	k.A.
Schwermetalle	k.A.	0,1 ppm	k.A.
Staub	k.A.	1µm Partikelgröße	k.A.
(Über)druck	k.A.	Ca. 200 mbar	k.A.
Temperatur	k.A.	> 360°C	k.A.
CO	1%	Brenngas	Brenngas
Hg	k.A.	30-35 ppm	k.A.
N <sub>2</sub>	4%	k. A.	k.A.
NH <sub>3</sub>	0,2 ppm	1 Vol.%	k.A.
CH <sub>3</sub> OH	500 ppm	k. A.	k.A.

Das im Faulgas enthaltene Methan muss zur Verwertung in einer Brennstoffzelle in Wasserstoff überführt werden. Hierzu wird zusätzliche Reaktionsenergie benötigt (Locher, 2012). Daraus ergibt sich, dass für die effiziente Nutzung des Klärgases nur bestimmte Brennstoffzellentypen geeignet sind. Die Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC) sowie Niedertemperaturzellen scheiden für die Nutzung aus (Blesl et al., 2004). Geeignet sind Hochtemperaturbrennstoffzellen wie Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC), Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) und Mitteltemperaturbrennstoffzellen wie Phosphorsäurebrennstoffzelle (PAFC); letztere wurde in einem Pilotprojekt auf der Kläranlage Köln-Rodenkirchen eingesetzt (Saure, 2005). Die Weiterentwicklung der PAFC ist allerdings vom Hersteller aus Kostengründen eingestellt worden (Blesl & Ohl, 2006). Die Alternativen MCFC und SOFC erweisen sich CO- und CO<sub>2</sub>-tolerant, sodass eine Faulgasreinigung nicht notwendig ist. Bei der MCFC stellt das im Faulgas enthaltene CO<sub>2</sub> eine erforderliche Komponente zum Ionenaustausch (Blesl et al., 2004).

Brennstoffzellen unterscheiden sich von BHKW-Anlagen insbesondere durch:

- höheren elektrischen Systemwirkungsgrad 40 - 55 %
- nahezu konstante Wirkungsgrade bei 40- bis 100%-Nennleistung
- bessere Emissionswerte in der Abluft
- höhere Anforderungen an Gasqualität
- leiseren und vibrationsarmen Betrieb
- Möglichkeit eines modularen Aufbaus
- geringen Wartungsaufwand
- höhere sicherheitstechnische Anforderungen (Präsenz von Wasserstoff)

Entscheidend sind jedoch die Investitionskosten, die derzeit noch weit über denen bei konventionellen KWK-Anlagen mit Verbrennungsmaschine liegen. Weiterentwicklungen in der BHKW-Technologie zur Wirkungsgraderhöhung vergrößern zudem den wirtschaftlichen Vorsprung von konventionellen Anlagen (Haber Kern et al., 2006). Die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen für einen Einsatz auf Kläranlagen wird daher vermutlich auch in den nächsten Jahren nicht erreicht werden.

### **OCR-Anlagen**

Einen Ansatz zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz durch eine Nutzung der Verbrennungsabwärme liefert die ORC-Technologie (Keicher et al. , 2007). Die Abkürzung ORC steht für „Organic Rankine Cycle“ und beschreibt einen thermodynamischen Kreisprozess (benannt nach John Macquorn Rankine, 1820 - 1872). Dieser Kreisprozess

beschreibt ein kontinuierliches Verdampfen und Kondensieren eines Arbeitsmediums bei verschiedenen Drücken. Das Arbeitsmedium wird von einer Speisepumpe auf Druck gebracht und anschließend unter Wärmezufuhr verdampft. Der erzeugte Dampf wird einer Turbine zugeführt und dort entspannt. Dabei wird über einen Generator elektrische Leistung erzeugt. Der entspannte Dampf wird einem Kondensator zugeführt und dort kondensiert. Die am Kondensator anfallende Kondensationswärme wird über einen Kühlkreislauf abgeführt oder für Heizzwecke verwendet. Als ORC-Arbeitsmedium im Turbinenkreislauf kommen Kältemittel, Kohlenwasserstoffe oder Silikonöle zum Einsatz. Derzeit stehen am Markt Module ab 200 kW thermischer Leistung zur Verfügung. Diese thermische Leistung muss vom BHKW als Abwärme zur Verfügung gestellt werden.

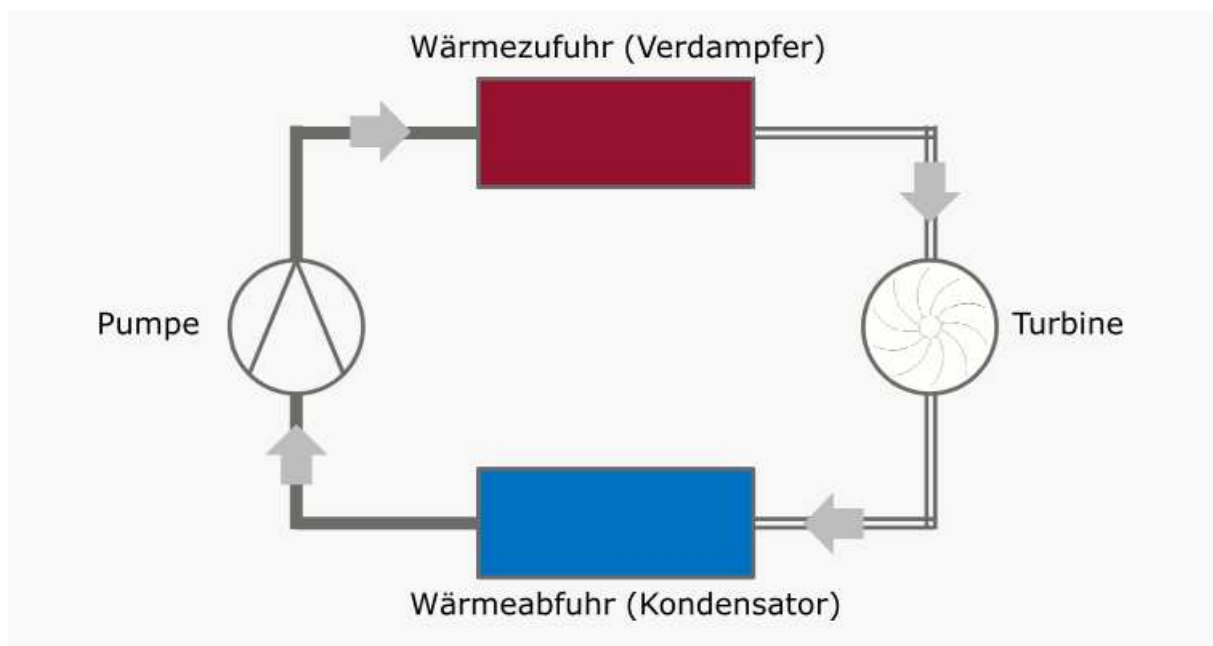


Bild 5.7 Schematische Darstellung eines ORC-Prozesses.

Der Wirkungsgrad ist im Wesentlichen vom Temperaturniveau der zugeführten Wärme ( $Wärme_{Zu}$ ;  $Q_{Zu}$ ) und vom Temperaturniveau der abgeführten Wärme ( $Wärme_{Ab}$ ,  $Q_{Ab}$ ) abhängig. Der Wirkungsgrad steigt, je höher die Temperatur von  $Q_{Zu}$  und je tiefer die Temperatur von  $Q_{Ab}$  ist. Wird nur die Motorabwärme bis zu 95 °C (366 K) für einen ORC-Prozess genutzt, können bis zu 10 % netto Anlagenwirkungsgrad erreicht werden. Wird nur die Abgaswärme genutzt können ORC-Dampftemperaturen oberhalb von 200 °C (473 K) erreicht werden. In diesem Fall sind bis zu 20 % netto Anlagenwirkungsgrad möglich. Die Abgaswärme kann dabei direkt in den ORC-Prozess eingekoppelt werden. Um sowohl Abgaswärme als auch Motorwärme zu nutzen, werden meist beide Wärmepotenziale in einem wasserbetriebenen Zwischenkreislauf zusammengefasst. Die Effizienz liegt damit deutlich unterhalb der konventioneller Turbinen. Die Ursachen hierfür sind die im Verhältnis



deutlich niedrigeren Vorlauftemperaturen von ORC-Anlagen und der hohe Wärmeentzug über den Kondensator (Blesl et al. 2011).

Tabelle 5.4: Abwärmequellen einer BHKW-Anlage zur Nutzung in ORC-Anlagen

Wärmequelle	Vorlauftemperatur	Relativer Anteil	ORC-Prozess
Abgaswärme	400 – 600 °C	37 – 45 %	Hochtemperatur HT-ORC Verdampfung bei 180 – 270 °C
Motorwärme	80 – 95 °C	48 – 62 %	Niedertemperatur NT-ORC Verdampfung bei 65 – 95 °C
Ölkühler			
Gemischkühler 1			
Motorblockkühlung			
Gemischkühler 2	50 – 60 °C	2 – 8%	

### Abschließende Bewertung

Blockheizkraftwerke und Mikrogasturbinen stellen auf Grundlage der technischen Eigenschaften, der Investitions- und Betriebskosten sowie der umfangreichen betrieblichen Erfahrungen etablierte Technologien dar, mit denen Faulgas zuverlässig, wirtschaftlich und effizient in Strom und Wärme umgewandelt werden kann. Bei Mikrogasturbinen bestehen allerdings Einschränkungen hinsichtlich der verfügbaren Leistungsklassen. Diese können nur in geringem Umfang durch den größeren Regelbereich kompensiert werden.

ORC-Anlagen können das Verhältnis von thermischer und elektrischer Leistung über die Nutzung von Motor und Abgaswärme in Richtung einer höheren elektrischen Leistung verschieben. Die Auswirkungen auf die Wärmebedarfsdeckung der Kläranlage sind jedoch im Einzelfall zu prüfen.

Der Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen muss hingegen auch heute noch als nicht praxistauglich bewertet werden. Dem hohen elektrischen Bruttowirkungsgrad, der theoretisch erreichbar ist, steht ein unverhältnismäßig hoher interner Verbrauch für die Faulgaskonditionierung und Belüftung entgegen, der zu einem Nettowirkungsgrad im Bereich aktueller BHKW führt. Hohe Investitionskosten der Pilotanlagen sowie lange Stillstandzeiten und hohe Wartungsaufwendungen führen dazu, dass Brennstoffzellen auf Kläranlagen derzeit nur in besonders geförderten Forschungsvorhaben eingesetzt werden können.

Für die quantitative Bewertung werden daher nur BHKW und Mikrogasturbinen weiter betrachtet.

## 5.2 Quantitative Bewertung der Nutzungsalternativen und Technologien

Im Rahmen der quantitativen Bewertung der Nutzungsalternativen und Technologien wird die wirtschaftliche und klimaspezifische Effizienz der Faulgasnutzung untersucht. Dazu werden moderne BHKW (Repowering-BHKW) und Mikrogasturbinen in einer Modellrechnung nach den Parametern Stromgestehungskosten und faulgasbezogene Einsparungen mit BHKW verglichen, die etwa dem durchschnittlichen Anlagenbestand in Nordrhein-Westfalen entsprechen (Bestands-BHKW). Die Ergebnisse ermöglichen Anlagenbetreibern eine überschlägige Abschätzung, unter welchen Rahmenbedingungen der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung sinnvoll ist und wann die Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches erreicht ist. Sie bilden die Grundlage für entsprechende Potenzialabschätzungen in Kapitel 8.

### 5.2.1 Grundlagen für die weiteren Modellrechnungen

Für die quantitative Auswertung wurden Modellrechnungen in Anlehnung an die Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen durchgeführt (LAWA, 2012). Alle Netto-Kosten und Netto-Erlöse wurden so jeweils periodengerecht zugeordnet und der Barwert der Kosten und Erlöse unter Berücksichtigung des realen Zinssatzes ermittelt. Die Inflation wird entsprechend nur insoweit berücksichtigt, wie Kostenangaben auf das Jahr 2013 umgerechnet werden müssen oder konstante Zahlungen wie der KWK-Zuschlag den Annahmen der KVR-Leitlinien widersprechen. Es werden die folgenden wirtschaftlichen und technischen Grundannahmen getroffen:

Tabelle 5.5: Wirtschaftliche und technische Grundannahmen der Modellrechnung

Wirtschaftliche Grundannahmen	Wert	Einheit
realer Zinssatz	3	%
Nutzungsdauer	10	a
Inflation	3	%
Technische Grundannahmen	Wert	Einheit
Vollbenutzungsstunden	7.000	h
Nutzwärmeanteil	80	%
Heizwert Faulgas	6,5	kWh/Nm <sup>3</sup>
mittlerer Strombezugspreis	0,14	€/kWh
Verschleißbedingter Wirkungsgradverlust*	15	%

\*: Für den Vergleich zum Repowering von BHKW wird ein Wirkungsgradverlust beim Alt-BHKW als Anteil vom Nennwirkungsgrad angenommen, der in der Praxis regelmäßig beobachtet wird.

Die Modellrechnungen wurden für BHKW in fünf Leistungsklassen zwischen 50 kW<sub>el</sub> und 1.200 kW<sub>el</sub> sowie für zwei Mikrogasturbinen in den Leistungsklassen 65 kW<sub>el</sub> und 200 kW<sub>el</sub> durchgeführt. Die elektrischen und thermischen Wirkungsgrade der BHKW wurden aus den BHKW-Kenndaten 2011 (Repowering-BHKW) sowie aus den BHKW-Kenndaten 2005 (Bestands-BHKW) abgeleitet (ASUE, 2011; ASUE, 2005). Die Werte für die Mikrogasturbinen entstammen den Herstellerangaben.

Alle Investitions- und Betriebskosten der untersuchten Gasnutzungsaggregate werden für die Betrachtung vollständig auf die erzeugte Strommenge bezogen. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass die Faulgasnutzung in Heizkesseln mit hohen Wirkungsgraden in der Regel zur vollständigen Substitution von Wärmeenergieträgern und den damit verbundenen Kosten führt. Auch durch die Nutzung von KWK-Anlagen kann der Wärmebedarf einer Kläranlage weitgehend gedeckt werden. Selbst für den Fall, dass durch den Betrieb einer KWK-Anlage eine Deckungslücke bei der Wärmeenergie verbleibt, liegen die spezifischen Bezugspreise für Wärmeenergie nur bei weniger als einem Drittel der Strompreise (DESTATIS 20113). Eine KWK-Anlage wird entsprechend mit dem Ziel betrieben, elektrische Energie auf der Kläranlage zu erzeugen und den Strombezug in gleichem Maße zu verringern. Damit ist bei der Bewertung also die Frage zu beantworten, zu welchen Kosten durch eine KWK-Anlage Strom erzeugt werden kann und ob dies zu Einsparungen gegenüber dem Strombezug führt.

### **Technische Eigenschaften**

Unter Berücksichtigung der Grundannahmen (Tabelle 5.5) wurden aus den Wirkungsgraden weitere Daten für die Modellrechnung abgeleitet. Unmittelbar ergeben sich der Faulgasbedarf sowie die Bruttostrom- und die Bruttowärmeerzeugung. Auf Grundlage von Erfahrungswerten wurde zudem die Leistungsaufnahme der zum Betrieb erforderlichen Nebenaggregate, insbesondere zur Faulgaskonditionierung, berücksichtigt. Nach Abzug des Energiebedarfes der Nebenaggregate ergibt sich die Nettostromerzeugung, woraus sich der elektrische Nettowirkungsgrad ermitteln lässt.

Tabelle 5.6: Technische Eigenschaften und Erzeugungsdaten der betrachteten Gasnutzungsaggregate

<b>Technische Eigenschaften</b>	<b>BHKW</b>			
elektrische Leistung [ $\text{kW}_{\text{el}}$ ]	50	100	200	400
elektrischer Wirkungsgrad [ $\eta_{\text{el}}$ ]	33	37	38	43
thermischer Wirkungsgrad [ $\eta_{\text{th}}$ ]	53	48	47	41
Faulgasbedarf [ $\text{Nm}^3/\text{a}$ ]	163.200	291.100	566.850	1.001.800
<b>Stromerzeugung</b>				
Bruttostromerzeugung [ $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$ ]	350.000	700.000	1.400.000	2.800.000
Leistungsaufnahme der Nebenaggregate [ $\text{kW}$ ]	3,9	6	9,3	14,4
Energiebedarf der Nebenaggregate [ $\text{kWh}/\text{a}$ ]	27.300	42.000	65.100	100.800
Nettostromerzeugung [ $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$ (netto)]	322.700	658.000	1.334.900	2.699.200
elektrischer Nettowirkungsgrad [ $\eta_{\text{el, netto}}$ ]	30,43	34,78	36,23	41,45
<b>Wärmeerzeugung</b>				
Bruttowärmeerzeugung [ $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{a}$ ]	562.200	908.200	1.731.600	2.669.800
Nutzwärme [ $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{a}$ ]	449.760	726.560	1.385.280	2.135.840
<b>Technische Eigenschaften</b>	<b>BHKW</b>	<b>MGT</b>		
elektrische Leistung [ $\text{kW}_{\text{el}}$ ]	1.200	65	200	
elektrischer Wirkungsgrad [ $\eta_{\text{el}}$ ]	41	27	31	
thermischer Wirkungsgrad [ $\eta_{\text{th}}$ ]	43	58	54	
Faulgasbedarf [ $\text{Nm}^3/\text{a}$ ]	3.152.000	259.300	694.800	
<b>Stromerzeugung</b>				
Bruttostromerzeugung [ $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$ ]	8.400.000	455.000	1.400.000	
Leistungsaufnahme der Nebenaggregate [ $\text{kW}$ ]	28,9	5,5	15	
Energiebedarf der Nebenaggregate [ $\text{kWh}/\text{a}$ ]	202.300	38.500	105.000	
Nettostromerzeugung [ $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$ (netto)]	8.197.700	416.500	1.295.000	
elektrischer Nettowirkungsgrad [ $\eta_{\text{el, netto}}$ ]	40,01	24,72	28,68	
<b>Wärmeerzeugung</b>				
Bruttowärmeerzeugung [ $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{a}$ ]	8.809.800	977.600	2.438.800	
Nutzwärme [ $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{a}$ ]	7.047.840	782.080	1.951.040	

### Investitions- und Betriebskosten

Zur Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten wurden wiederum die BHKW-Kenndaten aus den Jahren 2011 und 2005 sowie bei Mikrogasturbinen die Herstellerangaben herangezogen. Aufgrund nicht vorhandener Angaben für Faulgas-BHKW in den BHKW-Kenndaten wurden hier jedoch die Werte für Biogas-BHKW herangezogen. Da Faulgas und Biogas in ihren jeweiligen Eigenschaften sehr ähnlich sind, kann von einer guten Übereinstimmung der Kosten ausgegangen werden.

Für die Ermittlung der Investitionskosten wurde die jeweilige Ausgleichsfunktion (Bild 5.8) zugrunde gelegt und unter Berücksichtigung der Inflation für 3 Jahre (Tabelle 5.5) angepasst. Die so ermittelten Investitionskosten stimmen gut mit den Erfahrungswerten aus einer Vielzahl von Planungsvorhaben überein.

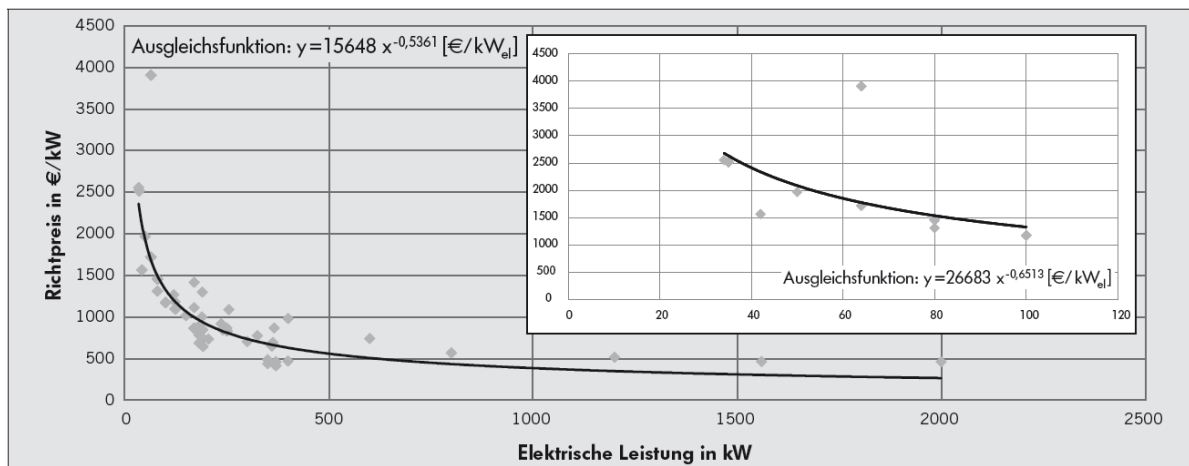


Bild 5.8: Spezifische Richtpreise von Biogas-BHKW (ASUE, 2011)

Die angepassten Richtpreise beinhalten jedoch nur das reine BHKW-Modul ohne Kosten für die Peripherie, Planung und Umsetzung oder unvorhergesehene Mehrkosten. Die Kosten für die peripheren Einrichtungen wurden auf Grundlage von Erfahrungswerten als Anteil der Aggregatkosten definiert. Unter Peripherie werden alle Anlagenteile verstanden, die zum tatsächlichen Betrieb des Aggregates erforderlich sind. Dabei handelt es sich vornehmlich um die Gaskonditionierung, die elektrotechnische Einbindung, die Einbindung in ein Prozessleitsystem sowie die Anbindung an das Wärmenetz. Die Kosten für die Peripherie wurden bei BHKW auf Grundlage von Erfahrungswerten vergleichbarer Projekte nach folgender Kostenfunktion ermittelt:

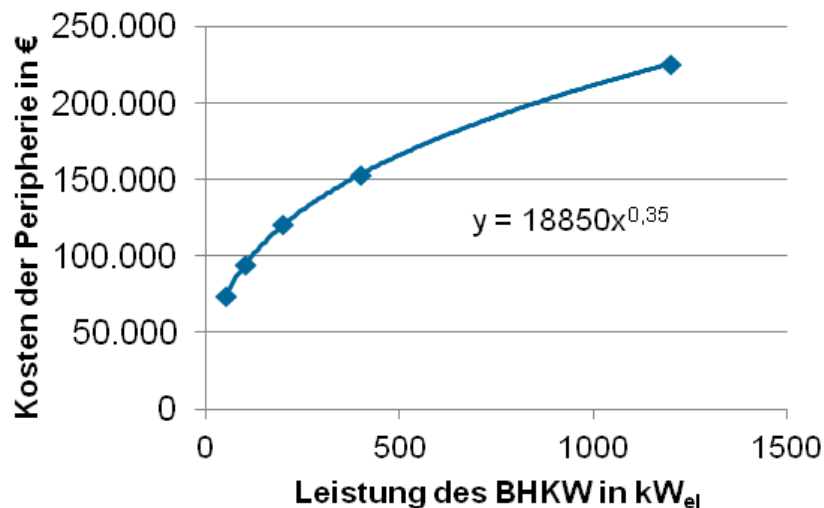


Bild 5.9: Kostenfunktion Peripherie von Faulgas-BHKW

Bei den vorliegenden Richtpreisangeboten für Mikrogasturbinen ist demgegenüber bereits ein Teil der Peripherie in den Aggregatkosten enthalten, so dass hier nur 25 % der Aggregatkosten zusätzlich angesetzt wurden. Für die Planung und Umsetzung wurden bei beiden Aggregatarten einheitlich 15 % der Summe aus Aggregatkosten und Peripherie und jeweils 5 % der Aggregatkosten für Unvorhergesehenes berücksichtigt.

Die Kosten für Instandhaltungsverträge und die Generalüberholung wurde zunächst analog zu den Investitionskosten ermittelt. Ein Vergleich mit Erfahrungswerten zeigt jedoch, dass diese für Faulgas-BHKW um etwa 20 % zu niedrig liegen, so dass die Rechenergebnisse jeweils um 20 % erhöht wurden. Die Werte für Mikrogasturbinen stammen wiederum aus aktuellen Herstellerangaben. Zudem kann abweichend von den BHKW-Kenndaten für Biogas-BHKW davon ausgegangen werden, dass die Instandhaltungsverträge für Faulgas-BHKW keine Grundüberholung beinhalten und diese daher zusätzlich anfällt. Die Instandhaltungsverträge beinhalten „alle Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie die Bereitstellung aller Ersatzteile und Betriebsstoffe (außer Brennstoffen)“ (ASUE, 2011). Bei entsprechendem qualifiziertem Betriebspersonal kann ein Großteil der Instandhaltungsarbeiten auch vom Betreiber selbst erbracht werden. Dieses kann dann in der Regel kostengünstiger erfolgen.

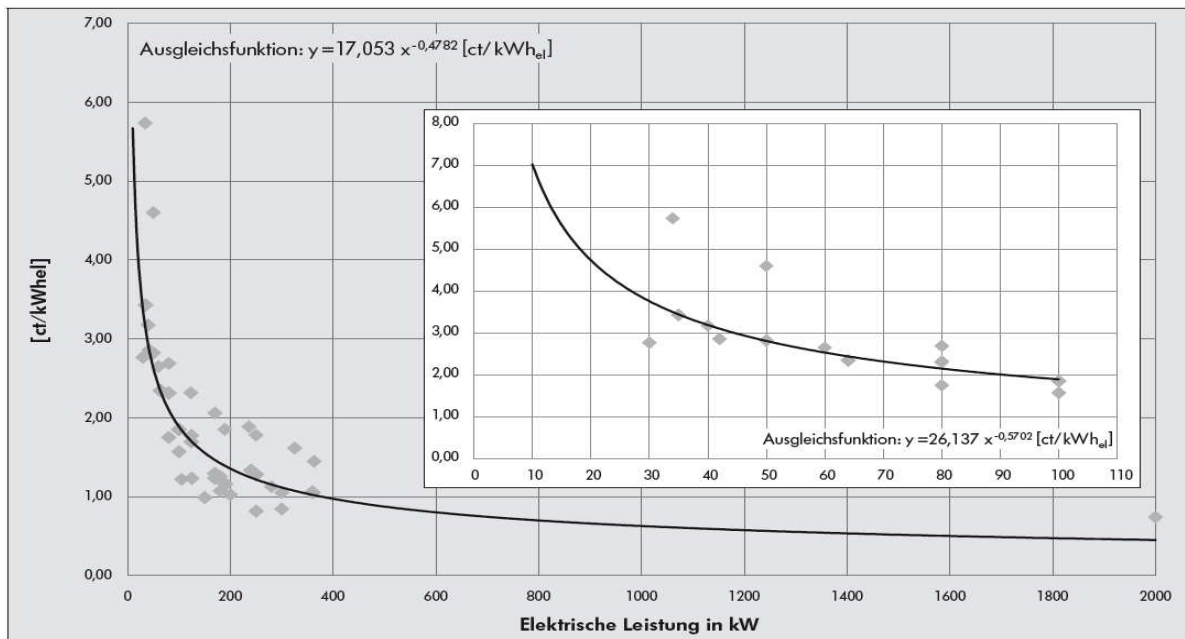


Bild 5.10: Spezifische Richtpreise für Instandhaltungsverträge von Biogas-BHKW (ASUE, 2011)

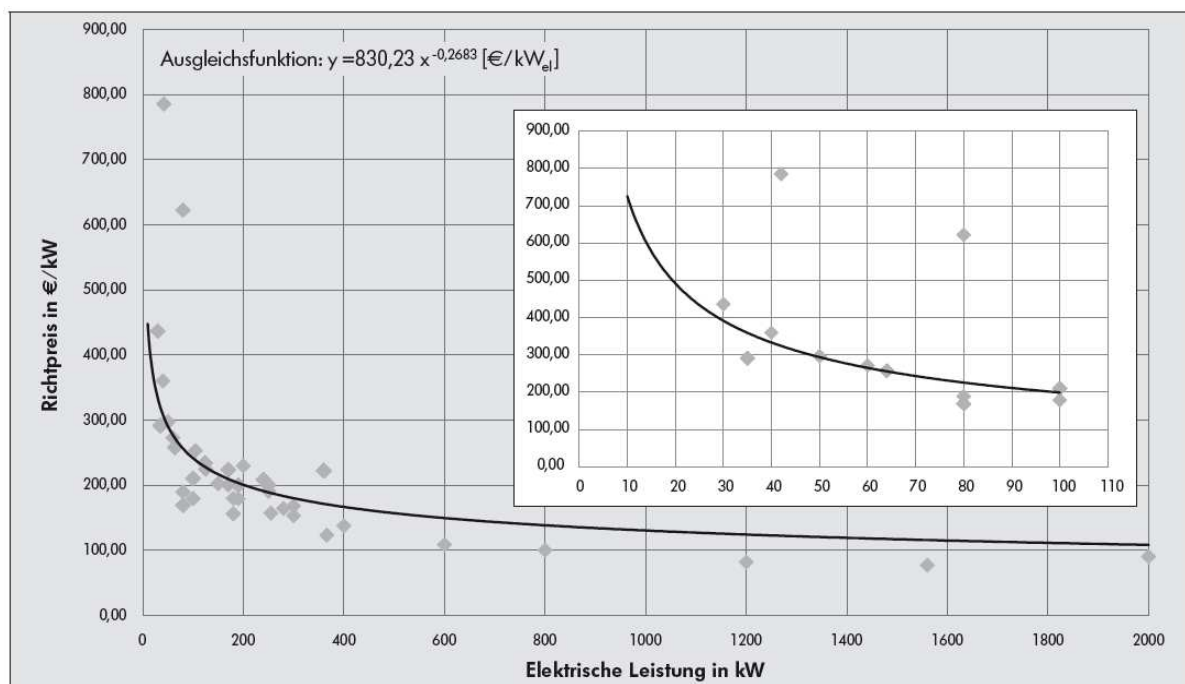


Bild 5.11: Spezifische Richtpreise für die Generalüberholung von Biogas-BHKW (ASUE, 2011)

Aus der dargestellten Berechnungsgrundlage ergibt sich die Kostenschätzung für die betrachteten Aggregate nach Tabelle 5.7. Für die nachfolgenden Berechnungen wird idealisiert davon ausgegangen, dass die KWK-Anlage jeweils nur im Volllastbetrieb genutzt wird. Ein Teillastbetrieb entspricht dabei näherungsweise einer geringeren Zahl an

Vollbenutzungsstunden. Eine Abschätzung der Vollbenutzungsstunden kann durch Division der erzeugten Strommenge durch die Nennleistung des Gasnutzungsaggregates erfolgen. Dies führt zu einer leichten Unschärfe bei der KWK-Vergütung, da im Teillastbetrieb in der Regel ein höherer Nutzwärmeanteil und damit ein höherer KWK-Zuschlag erreicht werden kann. Andererseits verschiebt sich der KWK-Zuschlag ggf. in spätere Perioden, so dass eine weitere Abzinsung erfolgt. Für eine überschlägige Betrachtung kann dieser Fehler jedoch vernachlässigt werden.

Tabelle 5.7: Investitions- und Betriebskosten der Gasnutzungsaggregate

<b>Technische Eigenschaften</b>	<b>BHKW</b>			
Leistung [kWel]	50	100	200	400
<b>Investitionskosten</b>				
Aggregat [€]	114.500	145.500	200.500	276.500
Peripherie [€]	91.600	116.400	160.400	221.200
Planung/Umsetzung [€]	28.625	36.375	50.125	69.125
Unvorhergesehenes [€]	5.725	7.275	10.025	13.825
Summe [€]	240.450	305.550	421.050	580.650
Spezifische Kosten [€/kWel]	4.820	3.060	2.120	1.460
<b>Betriebskosten</b>				
Generalüberholung [€]	19.200	31.800	52.800	87.600
Instandhaltung [€]	11.880	15.840	22.800	32.640

<b>Technische Eigenschaften</b>	<b>BHKW</b>	<b>MGT</b>	
Leistung [kWel]	1200	65	200
<b>Investitionskosten</b>			
Aggregat [€]	460.000	132.000	335.000
Peripherie [€]	225.437	33.000	83.750
Planung/Umsetzung [€]	102.816	24.750	62.813
Unvorhergesehenes [€]	23.000	6.600	16.750
Summe [€]	811.252	196.350	498.313
Spezifische Kosten [€/kWel]	680	3.040	2.500
<b>Betriebskosten</b>			
Generalüberholung [€]	195.000	35.000	85.000
Instandhaltung [€]	57.960	2.500	3.500



### 5.2.2 Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten sind ein Maß für die Kosten, welche durch den Betrieb eines Gasnutzungsaggregates je Kilowattstunde erzeugter elektrischer Energie entstehen. In Anlehnung an KONSTANTIN werden die Stromgestehungskosten hier aus dem Barwert der Kosten, die durch den Betrieb des Gasnutzungsaggregates anfallen, dividiert durch den Barwert der erzeugten Strommenge ermittelt (Konstantin, 2009).

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{el}}{(1+i)^t}}$$

LCOE = Levelized Cost of Electricity (Stromgestehungskosten)

mit:	$I_0$	=	Investitionskosten	[€]
	$A_t$	=	jährliche Gesamtkosten	[€/a]
	$M_{el}$	=	erzeugte Strommenge	[kWh <sub>el</sub> /a]
	$i$	=	realer Zinssatz	[%]
	$n$	=	Nutzungsdauer	[a]
	$t$	=	Nutzungsperiode	(1,2,...,a)

Als realer Zinssatz werden in Anlehnung an die KVR-Leitlinien 3 % gewählt (LAWA, 2012). Die jährlichen Kosten sind der Tabelle 5.7 zu entnehmen. Aufgrund der für die einzelne Kläranlage spezifischen Randbedingungen sowie der unterschiedlichen möglichen Systemabgrenzungen wurden die Gestehungskosten für das Faulgas nicht berücksichtigt. Stattdessen werden im nachfolgenden Abschnitt die faulgasspezifischen Einsparungen in ct/Nm<sup>3</sup> ermittelt. Als Wartungsintervall für die Grundüberholung wird bei allen Aggregaten ein Wert von 40.000 Betriebsstunden angesetzt, sodass die Grundüberholung bei 7.000 Vollbenutzungsstunden (VBh) pro Jahr nach 5,71 Jahren fällig wird. Bei einer diskreten Modellierung auf Jahresbasis erfolgt die Grundüberholung so jeweils im sechsten Jahr. Aufgrund der in der Praxis sehr unterschiedlichen Vollbenutzungsstunden der Gasnutzungsaggregate wurde hier eine Variantenbetrachtung zwischen 1.000 VBh und 8.000 VBh durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 5.12 dargestellt.

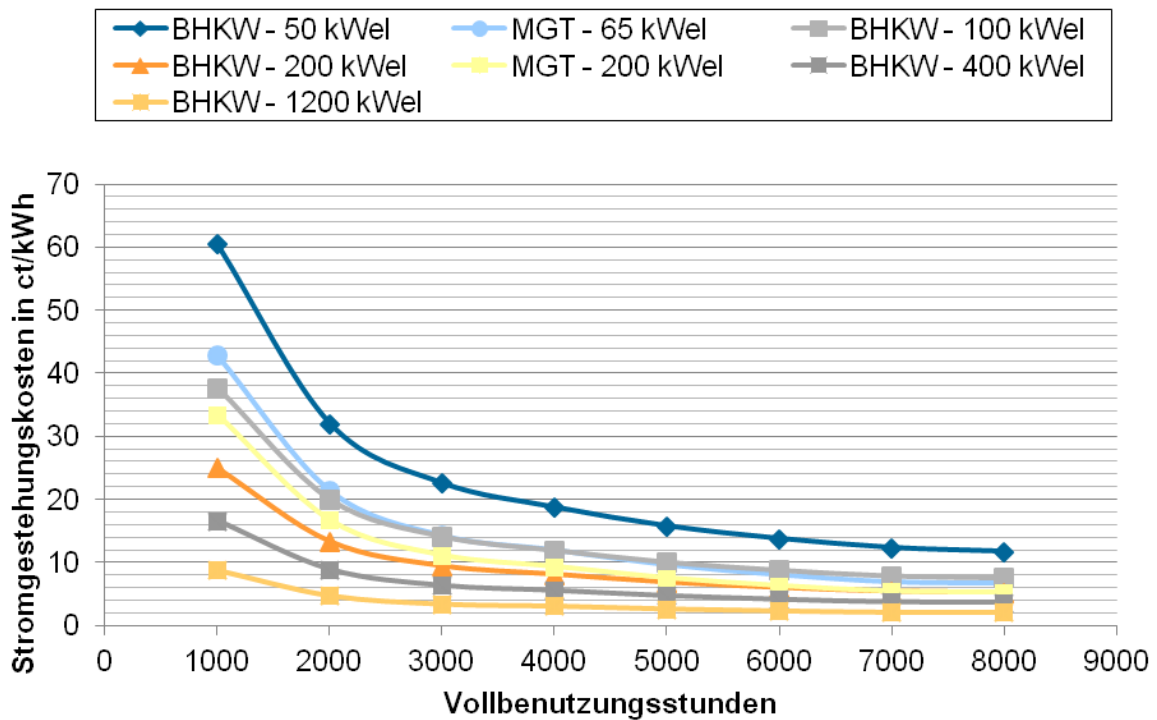


Bild 5.12: Stromgestehungskosten der Gasnutzungsaggregate

Aus dem Vergleich der Stromgestehungskosten ergeben sich folgende Schlüsse:

- Der Betrieb kleinerer Gasnutzungsaggregate führt zu höheren Stromgestehungskosten
- Bei geringen Vollbenutzungsstunden (0-3000 VBh) steigen die Stromgestehungskosten überproportional an
- Mit zunehmender Leistung des Gasnutzungsaggregates sinkt die Abhängigkeit der Stromgestehungskosten von den Vollbenutzungsstunden
- Mit steigenden Vollbenutzungsstunden weisen die Mikrogasturbinen (hellblaue und gelbe Kurven) im Vergleich zu entsprechend großen BHKW (dunkelblaue und orange-farbene Kurven) geringere Stromgestehungskosten auf
- Im Vergleich der Mikrogasturbinen mit entsprechenden BHKW erreicht insbesondere die 65-kW<sub>el</sub>-Mikrogasturbine geringere Stromgestehungskosten. Bei mehr als 6.000 VBh gilt dies auch für das 200-kW<sub>el</sub>-Aggregat.

### 5.2.3 Strom und faulgasbezogene Einsparungen

Aus den Stromgestehungskosten lässt sich ablesen, wie hoch die spezifischen Kosten je Kilowattstunde erzeugtem Strom sind. Sie geben jedoch keine Auskunft über die Einsparungen und Erlöse, die durch den Betrieb eines Gasnutzungsaggregates erzielt werden.

Die Einsparungen ergeben sich als Differenz aus den mittleren Strombezugskosten und den Stromgestehungskosten multipliziert mit der erzeugten Strommenge.

Die Erlöse ergeben sich aus der Förderung nach §7 KWKG 2002 (zuletzt geändert am 12.06.2012). Danach ist der KWK-Zuschlag nach elektrischer Leistung gestaffelt und wird für die jeweiligen Leistungsbestandteile jeweils anteilig gewährt. Für Gasnutzungsaggregate auf Kläranlagen wird in der Regel der Bereich der kleinen KWK-Anlagen bis 2.000 kW<sub>el</sub> (§ 7 Abs. 2 KWKG 2002) relevant sein. Die Erlöse ergeben sich aus dem spezifischen mittleren KWK-Zuschlag des Gasnutzungsaggregates multipliziert mit der erzeugten KWK-Strommenge. Die KWK-Strommenge ist vereinfacht der Anteil der Nettostrommenge, bei dessen Produktion auch die erzeugte Wärme genutzt wurde. Der jeweilige KWK-Zuschlag je Leistungsbestandteil ist in Tabelle 5.8 aufgeführt.

Da der KWK-Zuschlag keine Inflationsanpassung enthält, in den KVR-Leitlinien jedoch von einer gleichen Preissteigerung über alle Kosten und Erlöse ausgegangen wird, muss der KWK-Zuschlag mit einer negativen Kostenentwicklung in Höhe der angenommenen Inflation belastet werden. Für die Betrachtungen werden hier 3 % p. a. angesetzt (siehe Tabelle 5.5).

Die sich ergebenden mittleren Einsparungen und Erlöse errechnen sich ansonsten analog zu den Stromgestehungskosten und sind nachfolgend dargestellt:

Tabelle 5.8: KWK-Zuschlag je Leistungsbestandteil nach §7 Abs. 1 + 2 KWKG 2002

Leistungsbestandteil [kW <sub>el</sub> ]	KWK-Zuschlag [ct/kWh]	Dauer
<=50	5,41	Wahlweise 30.000 Betriebsstunden oder 10 Jahre bis 50 kW <sub>el</sub>
>50 - <=250	4,00	30.000 Betriebsstunden
>250 – 2.000	2,40	30.000 Betriebsstunden

Tabelle 5.9: Einsparungen und Erlöse aus dem Betrieb der Gasnutzungsaggregate

Technische Eigenschaften	BHKW			
elektrische Leistung [kW <sub>el</sub> ]	50	100	200	400
Faulgasbedarf [Nm <sup>3</sup> /a]	163.200	291.100	566.850	1.001.800
<b>Einsparungen Strombezug</b>				
mittlere Strombezugskosten [ct/kWh <sub>el</sub> ]	14	14	14	14
Stromgestehungskosten [ct/kWh <sub>el</sub> ]	-12,35	-7,93	-5,43	-3,74
spezifische Einsparungen [ct/kWh <sub>el</sub> ]	1,65	6,07	8,57	10,26
absolute Einsparungen [€]	5.313	39.953	114.463	277.060
<b>KWK-Zuschlag</b>				
durchschnittlicher KWK-Zuschlag [ct/kWh <sub>el</sub> ]	4,03	2,09	1,91	1,46
absoluter KWK-Zuschlag	13.015	13.753	25.445	39.461
<b>Gesamterlös/-einsparungen</b>				
spezifischer Gesamterlös [ct/kWh <sub>el</sub> ]	5,68	8,16	10,48	11,73
Gesamterlös [€]	18.327	53.706	139.908	316.521
Einsparungen pro Gaseinheit [ct/Nm <sup>3</sup> ]	11,23	18,45	24,68	31,60

Technische Eigenschaften	BHKW	MGT	
elektrische Leistung [kW <sub>el</sub> ]	1.200	65	200
Faulgasbedarf [Nm <sup>3</sup> /a]	3.152.000	259.300	694.800
<b>Einsparungen Strombezug</b>			
mittlere Strombezugskosten [ct/kWh <sub>el</sub> ]	14	14	14
Stromgestehungskosten [ct/kWh <sub>el</sub> ]	-2,10	-6,95	-5,43
spezifische Einsparungen [ct/kWh <sub>el</sub> ]	11,90	7,05	8,57
absolute Einsparungen [€]	975.470	29.356	111.037
<b>KWK-Zuschlag</b>			
durchschnittlicher KWK-Zuschlag [ct/kWh <sub>el</sub> ]	1,05	2,32	1,96
absoluter KWK-Zuschlag	86.230	9.661	25.445
<b>Gesamterlös/-einsparungen</b>			
spezifischer Gesamterlös [ct/kWh <sub>el</sub> ]	12,95	9,37	10,54
Gesamterlös [€]	1.061.700	39.016	136.483
Einsparungen pro Gaseinheit [ct/Nm <sup>3</sup> ]	33,68	15,05	19,64

Eine Betrachtung der Werte zeigt, dass die spezifischen Einsparungen - wie erwartet - gegenläufig zu den Stromgestehungskosten zunehmen. Der mittlere KWK-Zuschlag nimmt analog zu Tabelle 5.8 ab. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass die zunehmenden spezifischen Einsparungen den sinkenden mittleren KWK-Zuschlag deutlich überkompensieren, so dass die spezifischen Gesamteinsparungen je Gaseinheit mit steigender Aggregatgröße zunehmen. Der Vergleich der spezifischen Gesamteinsparungen je Gaseinheit der Mikrogasturbinen mit den entsprechenden BHKW zeigt, dass sich das Verhältnis im Gegensatz zu den Stromgestehungskosten genau umgekehrt hat. Die Mikrogasturbinen erzielen etwas geringere Einsparungen je Gaseinheit. Der Grund hierfür besteht in den im Vergleich geringeren elektrischen Wirkungsgraden.

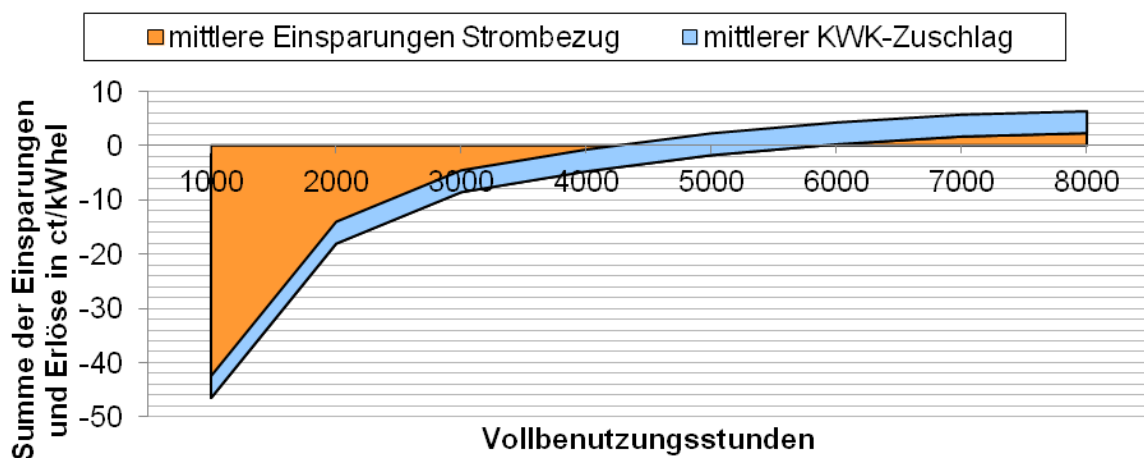


Bild 5.13: Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 50 kW<sub>el</sub>-BHKW

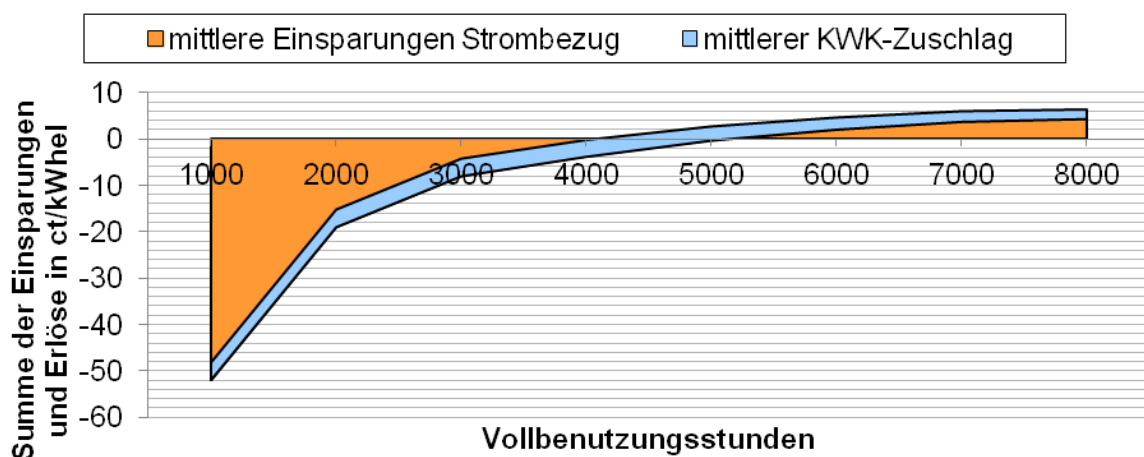


Bild 5.14: Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden einer 65 kW<sub>el</sub>-Mikrogasturbine

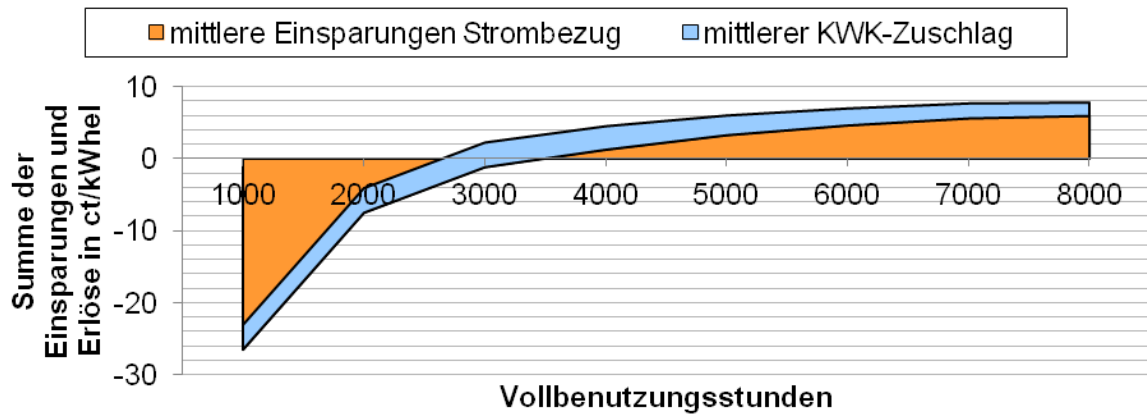


Bild 5.15: Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 100 kW<sub>el</sub>-BHKW

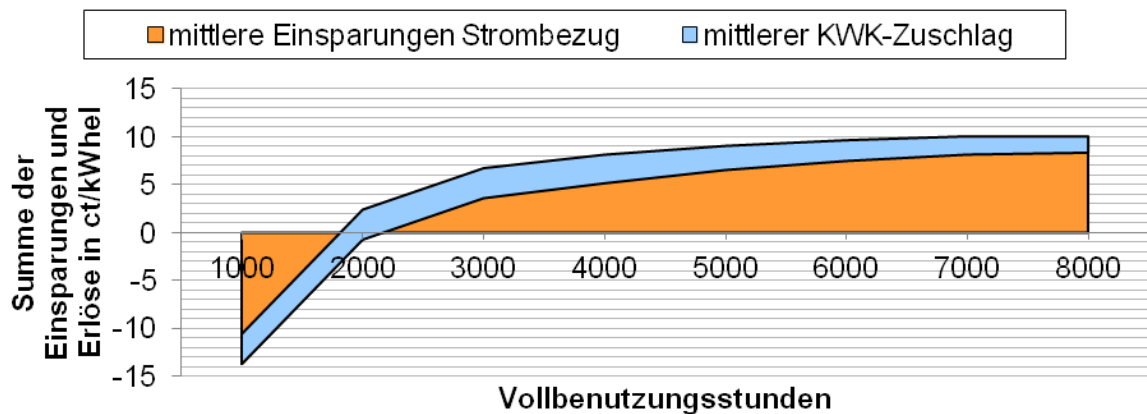


Bild 5.16: Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden einer 200 kW<sub>el</sub>-Mikrogasturbine

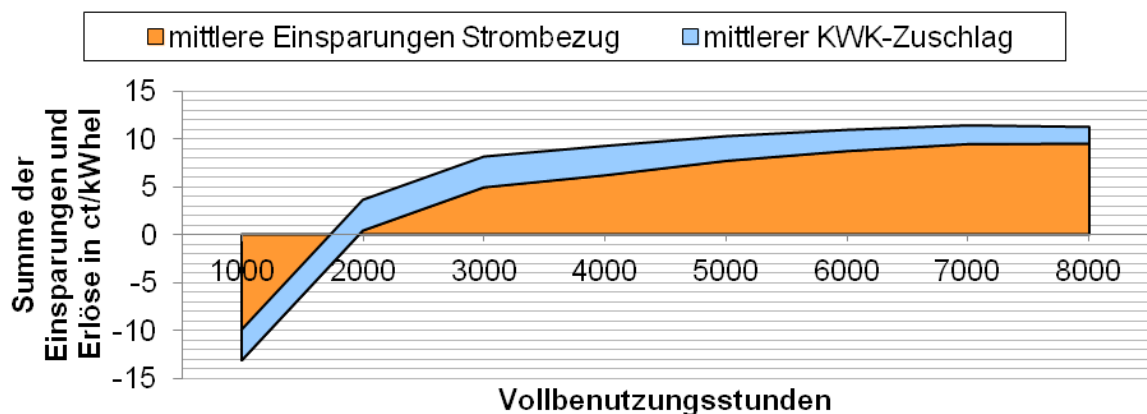


Bild 5.17: Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 200 kW<sub>el</sub>-BHKW

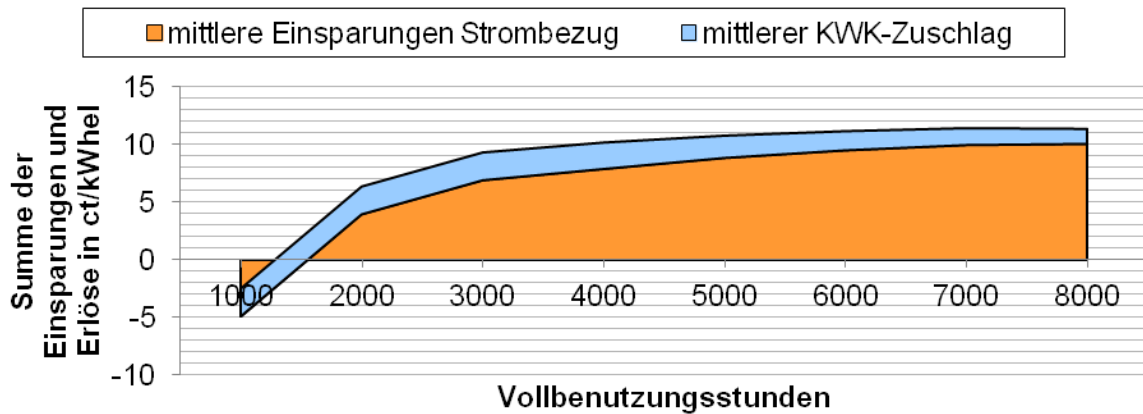


Bild 5.18: Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 400 kW<sub>el</sub>-BHKW

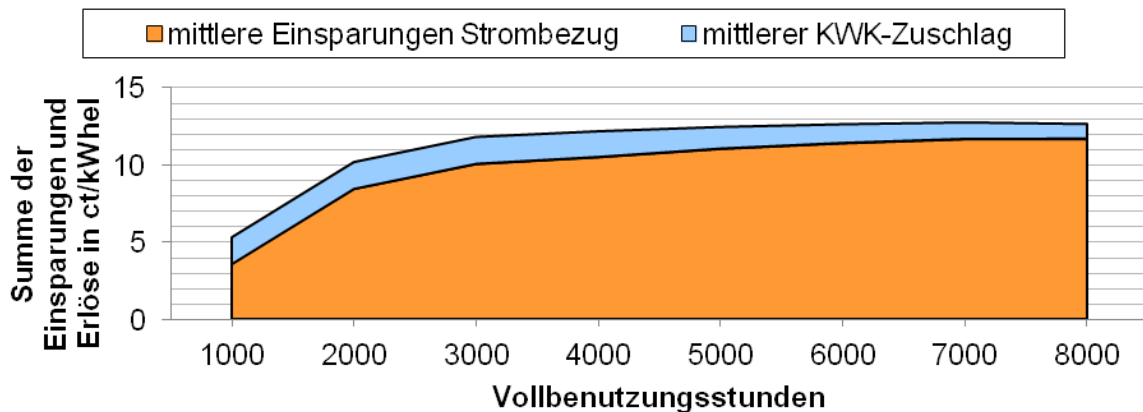


Bild 5.19: Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 1.200 kW<sub>el</sub>-BHKW

Analog zu den Stromgestehungskosten wurden auch die Einsparungen und Erlöse einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Die erzielbaren spezifischen Einsparungen und Erlöse gehen hiernach in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden mit zunehmender Größe des Gasnutzungsaggregates zurück. Gleichzeitig können große Gasnutzungsaggregate auch mit einer relativ geringen Zahl an Vollbenutzungsstunden wirtschaftlich betrieben werden. Bei der Betrachtung der faulgasbezogenen Einsparungen zeigt sich weiterhin, dass die 65-kW<sub>el</sub>-Mikrogasturbine im wirtschaftlichen Bereich (positive Einsparungen) deutlich höhere Einsparungen als das 50-kW<sub>el</sub>-BHKW erzielt bzw. beinahe die Einsparungen des 100-kW<sub>el</sub>-BHKW erreicht. Eine Entscheidung zwischen diesen Aggregaten kann in der Praxis so im Wesentlichen auf qualitativen Kriterien aufgebaut werden. Die 200-kW<sub>el</sub>-Mikrogasturbine kann die Einsparungen des entsprechenden BHKW aufgrund des geringeren elektrischen Wirkungsgrades in dieser Berechnung jedoch nicht erreichen.

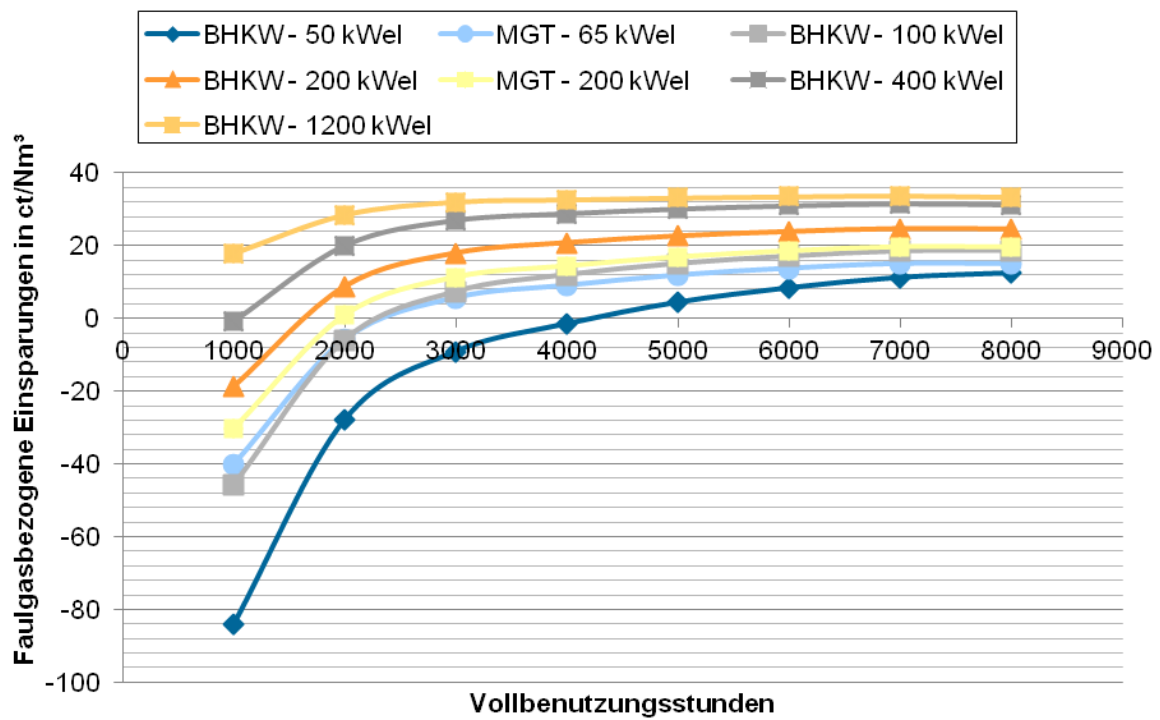


Bild 5.20: Faulgasbezogene Einsparungen der Gasnutzungsaggregate in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden



### 5.2.4 BHKW-Repowering

Vor dem Hintergrund der geringen mittleren Wirkungsgrade der derzeit installierten Gasnutzungsanlagen stellt sich die Frage, wann ein Austausch einer bestehenden Anlage durch eine neue, effizientere Anlage, das sogenannte Repowering, sinnvoll ist. Neben qualitativen Aspekten wie einem erhöhten Ausfallrisiko und einer erschwerten Ersatzteilbeschaffung bei alten Bestandsanlagen bestehen auch quantitativ beschreibbare Nachteile gegenüber Neuanlagen. Im Wesentlichen sind dies:

- vergleichsweise geringere elektrische Wirkungsgrade (siehe Bild 5.1)
- verschleißbedingte Wirkungsgradverluste
- erhöhte Kosten für die Instandhaltung und Revision

Unter Berücksichtigung dieser Punkte wurden die zuvor bereits betrachteten BHKW (Repowering-BHKW) mit älteren BHKW (Bestands-BHKW) der gleichen Leistungsklasse verglichen. Für die Bestands-BHKW wurden wiederum die Stromgestehungskosten und die faulgasbezogenen Einsparungen ermittelt. Hierbei wurden folgende Annahmen für die Bestands-BHKW getroffen:

- es fallen keine Investitionskosten an (Bestand)
- der elektrische und thermische Wirkungsgrad des Bestands-BHKW entspricht dem Stand von 2005 (ASUE,2005)
- das Bestands-BHKW erhält keinen KWK-Zuschlag mehr
- das Bestands-BHKW hat einen relativen Wirkungsgradverlust von 15 % (z. B.  $\eta_{el} = 33$ , dann folgt  $\eta_{el,aktuell} = 0,33 - 0,33 \cdot 0,15 = 0,285$  bzw. 28,5 %)
- die Leistung der erforderlichen Nebenaggregate beträgt nur 50 % im Vergleich zu den Repowering-BHKW
- die spezifischen Instandhaltungskosten sind um 10 % höher als bei den Repowering-BHKW
- die Kosten für die Generalüberholung sind um 20 % höher als bei den Repowering-BHKW

Daraus ergeben sich für die Bestands-BHKW die in Tabelle 5.10 dargestellten Anlagenzahlen. Neben den leicht erhöhten Betriebskosten haben die erzielten Nettowirkungsgrade wesentlichen Einfluss auf die Bewertung. Diese sind vergleichend in Bild 5.21 dargestellt:

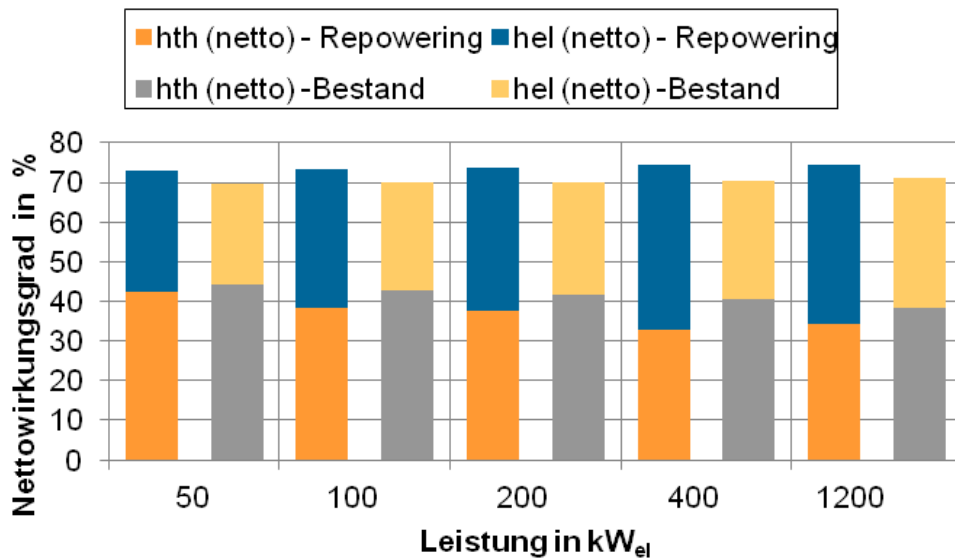


Bild 5.21: Elektrische und thermische Nettwirkungsgrade Bestands- und Repowering-BHKW

Tabelle 5.10: Anlagendaten der Bestands-BHKW

Technische Eigenschaften	BHKW				
elektrische Leistung [kW <sub>el</sub> ]	50	100	200	400	1.200
elektrischer Wirkungsgrad [ $\eta_{el}$ ]	31,5	33,00	34,5	36,1	38,8
thermischer Wirkungsgrad [ $\eta_{th}$ ]	55,3	53,6	52,0	50,4	48,1
Verschleiß [%]	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
reduzierter elektrischer Wirkungsgrad [ $\eta_{el,aktuell}$ ]	26,8	28,1	29,4	30,7	33,0
<b>Stromerzeugung</b>					
Bruttostromerzeugung [kWh <sub>el</sub> /a]	284.376	530.765	1.081.473	1.999.935	6.761.216
Leistungsaufnahme der Nebenaggregate [kW]	1,9	3	4,7	7,2	24,5
Energiebedarf der Nebenaggregate [kWh/a]	13.650	21.000	32.550	50.400	202.300
Nettostromerzeugung [kWh <sub>el</sub> /a (netto)]	270.726	509.765	1.048.923	1.949.535	6.660.066
elektrischer Nettwirkungsgrad [ $\eta_{el,netto}$ ]	25,5	26,9	28,5	29,9	32,5
<b>Wärmeerzeugung</b>					
Bruttowärmeerzeugung [kWh <sub>th</sub> /a]	586.917	1.015.437	1.917.934	3.287.769	9.856.283
Nutzwärme [kWh <sub>th</sub> /a]	469.533	812.350	1.534.347	2.630.215	7.885.026
<b>Betriebskosten</b>					
Generalüberholung [€]	23.040	38.160	63.360	105.120	234.000
Instandhaltung [€]	11.088	13.068	19.272	25.740	51.876

### Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten der Bestands-BHKW wurden wie oben beschrieben ermittelt und gemeinsam mit dem jeweiligen Repowering-BHKW über den Vollbenutzungsstunden aufgetragen. Beispielhaft ist dies nachfolgend für ein 200 kW<sub>el</sub>-BHKW dargestellt:

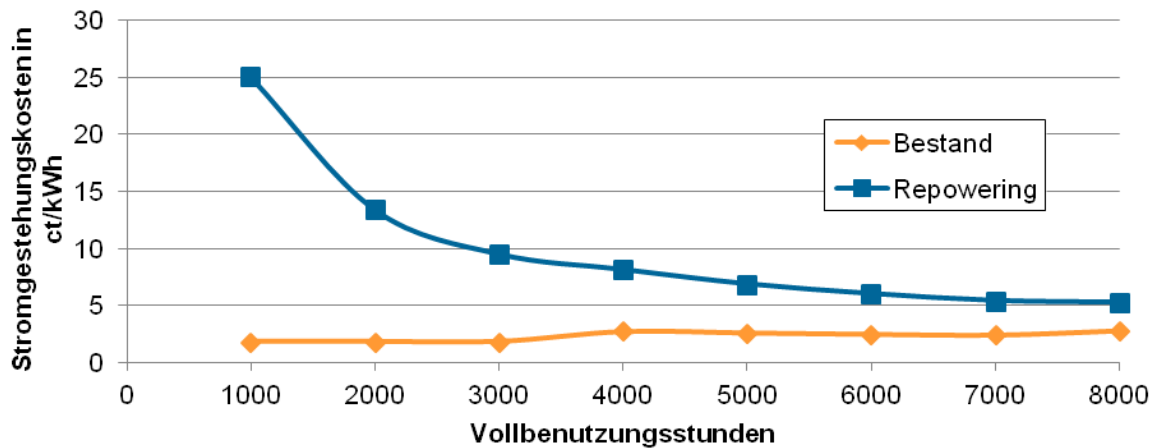


Bild 5.22: Vergleich der Stromgestehungskosten eines Bestands- und eines Repowering-BHKW mit einer Leistung von 200 kW<sub>el</sub>

Der Vergleich der Stromgestehungskosten zeigt, dass diese für Bestands-BHKW deutlich geringer sind als für Repowering-BHKW. Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich für alle betrachteten BHKW. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei den Bestands-BHKW lediglich variable Kosten für den Betrieb anfallen, während bei den Repowering-BHKW die Investitionskosten als fixe Kosten proportional auf die produzierte Strommenge verteilt werden.

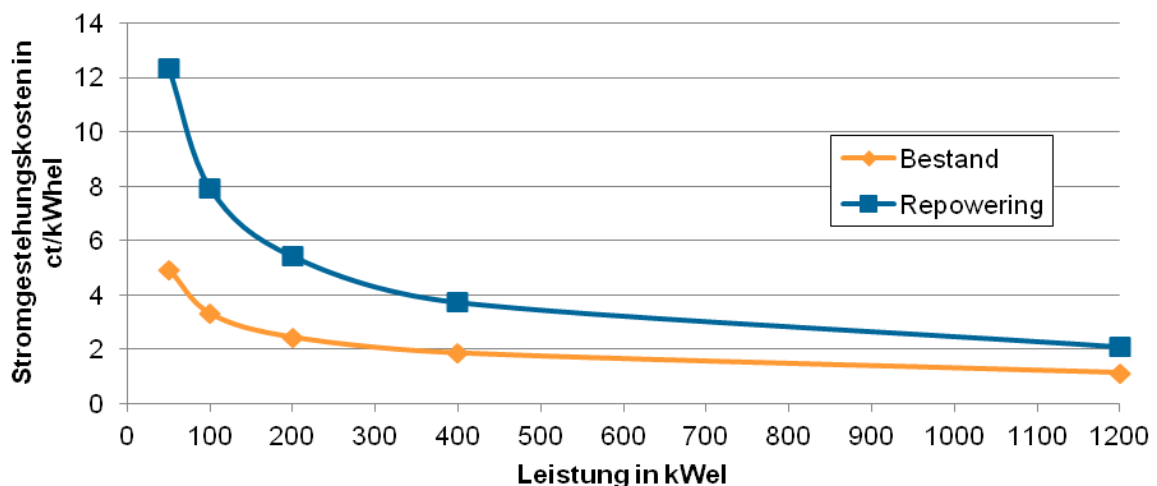


Bild 5.23: Vergleich der Stromgestehungskosten von Bestands- und Repowering-BHKW bei 7.000 Vollbenutzungsstunden

Wie auch zuvor geben die Stromgestehungskosten jedoch keine Auskunft darüber, wie effizient das verfügbare Faulgas genutzt werden kann. Dies wird nachfolgend betrachtet:

### Faulgasbezogene Einsparungen

Auch bei den faulgasbezogenen Einsparungen wurde analog zu dem entsprechenden vorangegangenen Abschnitt vorgegangen. Wiederum wird ein 200-kW<sub>el</sub>-BHKW beispielhaft herangezogen. Die faulgasbezogenen Einsparungen sind über den Vollbenutzungsstunden aufgetragen.

Es zeigt sich prinzipiell der gleiche Zusammenhang wie bei den Stromgestehungskosten. Während die faulgasbezogenen Einsparungen bei dem Bestands-BHKW annähernd konstant bleiben, steigen sie bei dem Repowering-BHKW mit den Vollbenutzungsstunden überproportional an. Anders als bei den Stromgestehungskosten zeigt sich allerdings, dass die faulgasbezogenen Einsparungen des Bestands-BHKW nur bis etwa 4.500 VBh diejenigen des Repowering-BHKW übersteigen. Werden mehr als 4.500 VBh erreicht, ist ein Austausch des betrachteten BHKW damit auch wirtschaftlich vorteilhaft.

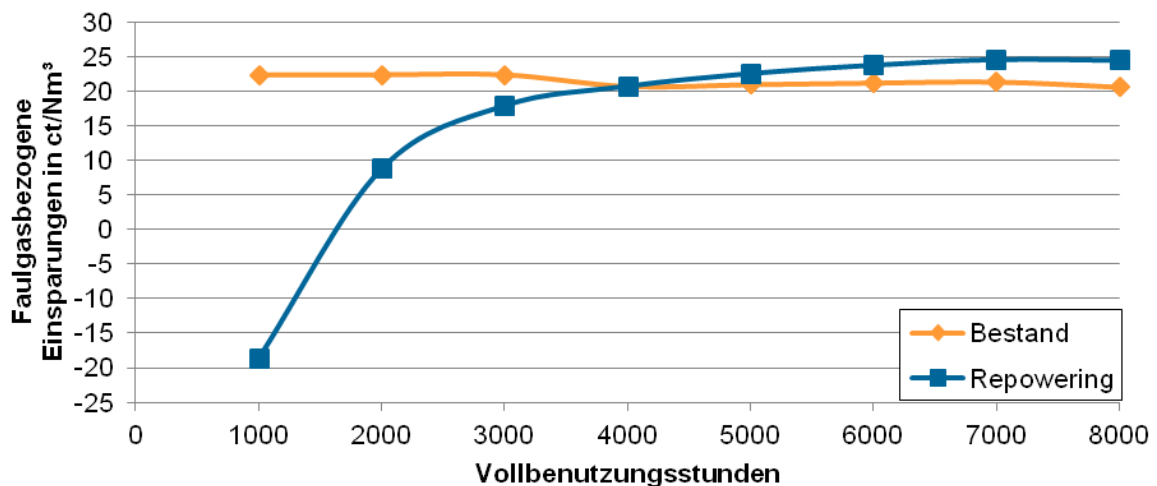


Bild 5.24: Vergleich der faulgasbezogenen Einsparungen eines Bestands- und eines Repowering-BHKW mit einer Leistung von 200 kW<sub>el</sub>

Für eine Betrachtung über alle Leistungsklassen hinweg wurden die faulgasbezogenen Einsparungen für 4.000 VBh und für 7.000 VBh über der Leistung aufgetragen.

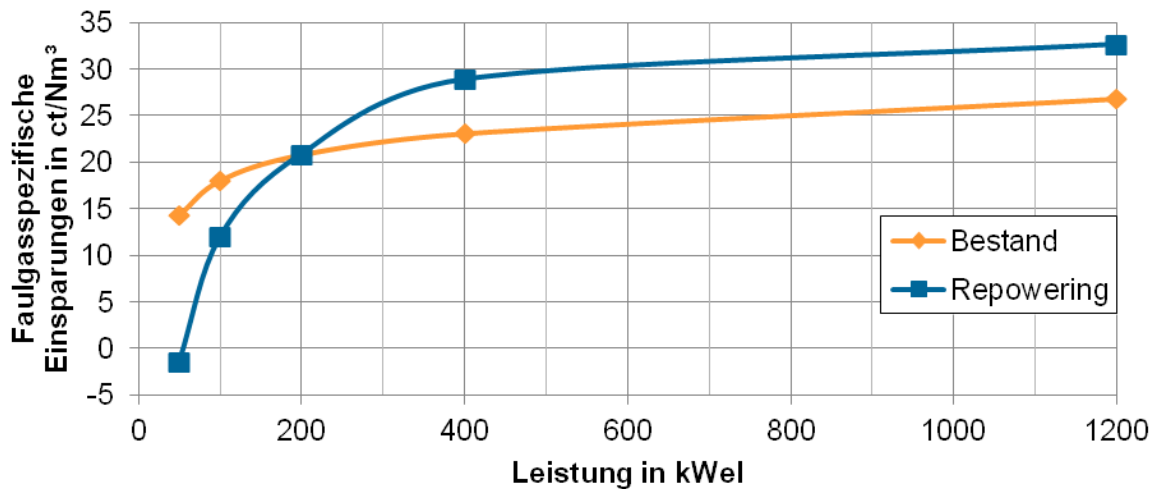


Bild 5.25: Vergleich der faulgasbezogenen Einsparungen von Bestands- und Repowering-BHKW bei 4.000 VBh

Der Vergleich der faulgaspezifischen Einsparungen bei 4.000 VBh zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen ein Repowering ab einer Leistung von etwa 200 kW<sub>el</sub> vorteilhaft ist (Schnittpunkt der Kurven). Im Bereich zwischen 200 kW<sub>el</sub> und 400 kW<sub>el</sub> steigen die relativen Einsparungen des Repowering-BHKW gegenüber dem Bestands-BHKW stetig an. Bei Leistungen über 400 kW<sub>el</sub> bleibt der Vorteil etwa konstant. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei 7.000 Vollbenutzungsstunden (Bild 5.26):

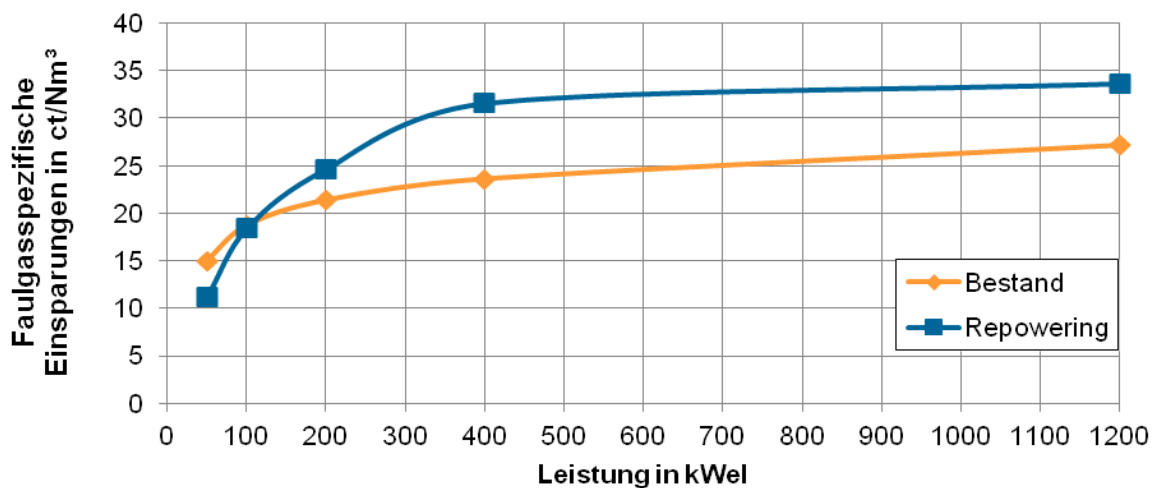


Bild 5.26: Vergleich der faulgasbezogenen Einsparungen von Bestands- und Repowering-BHKW bei 7.000 VBh

Aufgrund der geringeren Stromgestehungskosten der Repowering-BHKW bei 7.000 VBh sind die relativen Einsparungen gegenüber den Bestands-BHKW hier größer. Können 7.000 VBh erreicht werden, ist ein Austausch bereits ab etwa 100 kW<sub>el</sub> vorteilhaft.

### 5.2.5 Einschätzung für Betreiber

In der Praxis werden die zuvor getroffenen Annahmen nur selten exakt zutreffen. Insbesondere die Annahmen zum Alter bzw. den Nennwirkungsgraden, der verschleißbedingte Wirkungsgradverlust sowie die erreichten Vollbenutzungsstunden variieren. Um Betreibern dennoch die Möglichkeit zu geben, den Einsatz einer KWK-Anlage oder die Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches für ihre spezifische Situation überschlägig zu bewerten, wurden die dargestellten Annahmen verallgemeinert und eine Parametervariation durchgeführt.

#### Vergleich von Kraft-Wärme-Kopplung und reiner Wärmeerzeugung

Die reine Wärmeerzeugung und Fackelverluste machen mit etwa 21,2 % einen relativ hohen Anteil an der gesamten Faulgasproduktion aus. Mögliche Gründe dafür wurden im Abschnitt 5.1.1 bereits genannt. Bei der reinen Wärmeerzeugung kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass dadurch der Bezug von Primärenergie in Form von Erdgas oder Erdöl substituiert wird. Vereinfachend wurde hier davon ausgegangen, dass immer die gesamte Faulgasmenge sinnvoll genutzt werden kann und damit z.B. keine Wärmeüberschüsse mit einem zwangsweisen Abfackeln von Faulgas auftreten. Für den Erdgasbezug wird als Mittelwert von Haushaltspreis und Industriebezug ein Wert von 4,72 ct/kWh (netto) angesetzt (Destatis, 2013). Für Strom wurden 14,00 ct/kWh (netto) angesetzt. Je Normkubikmeter Faulgas mit einem Heizwert von 6,5 kWh/Nm<sup>3</sup> werden bei Nutzung eines Heizkessels mit einem üblichen Wirkungsgrad von 92 % etwa 6 kWh<sub>th</sub> erzeugt. Dadurch können 28,2 ct/Nm<sup>3</sup> Energiebezugskosten substituiert werden.

Wird ein Normkubikmeter Faulgas in einem BHKW genutzt, werden nach Berücksichtigung des Eigenenergiebedarfes und des Nutzwärmeanteils je nach Größenklasse elektrische Energie zwischen 1,7 kWh<sub>el</sub> und 2,7 kWh<sub>el</sub> und thermische Energie zwischen 3 kWh<sub>th</sub> und 2,2 kWh<sub>th</sub> erzeugt. Dadurch können Energiebezugskosten zwischen 30,0 ct/Nm<sup>3</sup> und 47,6 ct/Nm<sup>3</sup> substituiert werden. Während die Kosten für den Kessel in der Regel vernachlässigbar sind, ergeben sich bei BHKW deutliche Kosten, die hier in Form von Stromgestehungskosten bereits berechnet wurden. Gleichzeitig wird auf die erzeugte eklektische Energie ein KWK-Zuschlag gezahlt. Da sowohl die Stromgestehungskosten als auch der mittlere KWK-Zuschlag in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung und den erreichten Vollbenutzungsstunden stark variieren, kann hier keine pauschale Aussage getroffen werden. Die beschriebenen Abhängigkeiten sind in Bild 5.27 dargestellt:

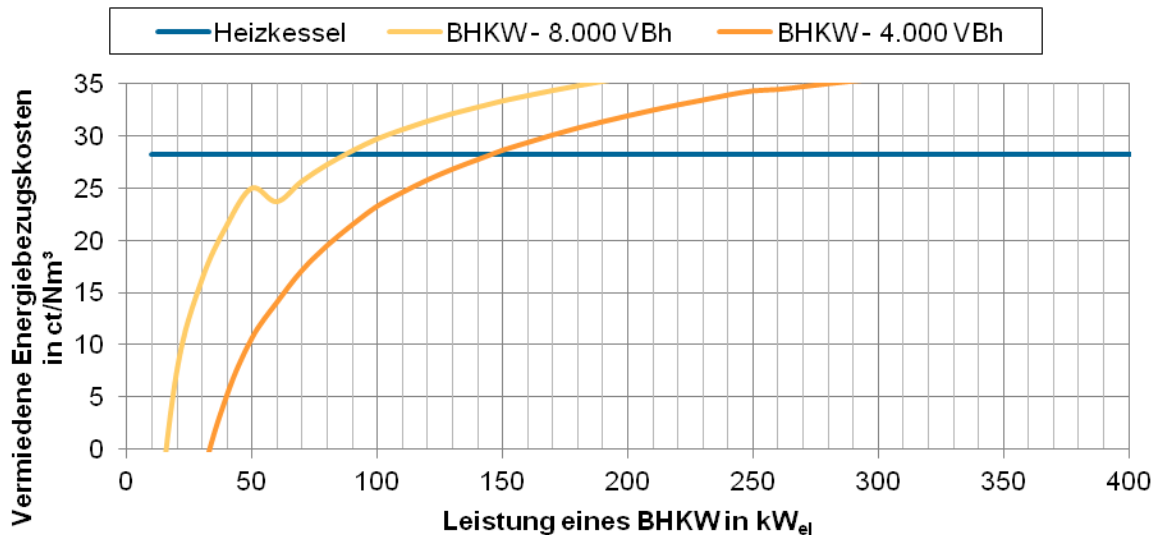


Bild 5.27: Vermiedene Energiebezugskosten von Repowering-BHKW und Heizkessel bei mittleren Strombezugskosten von 14 ct/kWh.

Die Auswertung von Bild 5.28 zeigt, dass der Einsatz eines BHKW gegenüber der reinen Wärmeerzeugung ab einer Leistung von etwa 85 kW<sub>ei</sub> bei 8.000 VBh bzw. 145 kW<sub>ei</sub> bei 4.000 VBh sinnvoll ist. Der wesentliche Unterschied ist die Stromerzeugung beim BHKW und der hierüber verdrängte Stromfremdbezug. Entsprechend wurde die Auswertung in Bild 5.28 für mittlere Strombezugskosten von 18 ct/kWh durchgeführt. Der Einsatz eines BHKW ist in diesem Fall schon ab einer Leistung von 40 kW<sub>ei</sub> bei 8.000 VBh bzw. 80 kW<sub>ei</sub> bei 4.000 VBh sinnvoll (siehe Bild 5.28). Kann nicht die gesamte Faulgasmenge sinnvoll zur Wärmeerzeugung genutzt werden, verschiebt sich die Kurve Heizkessel jeweils proportional nach unten.

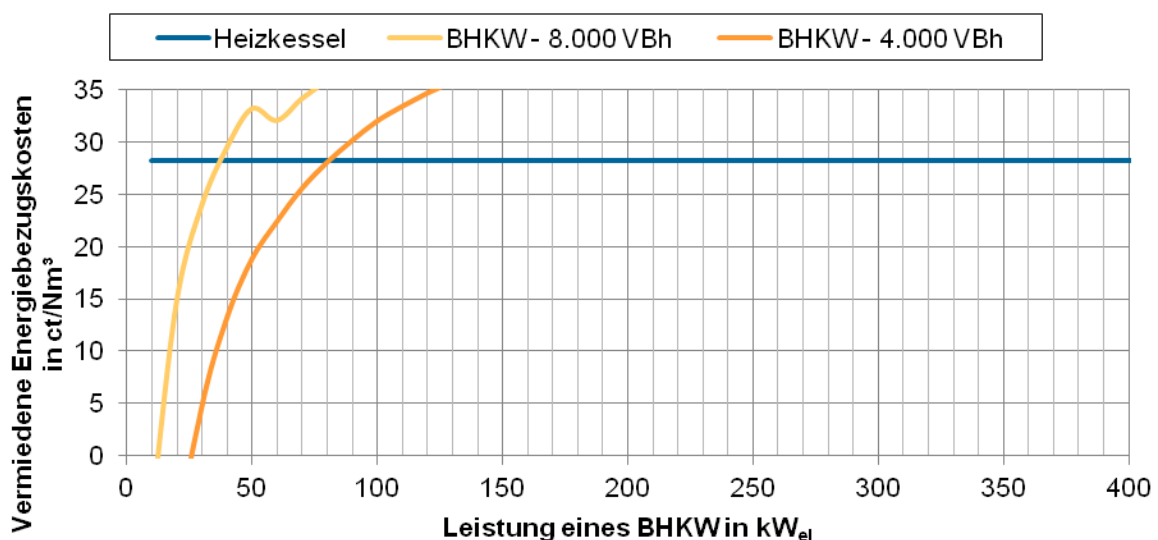


Bild 5.28: Vermiedene Energiebezugskosten von Repowering-BHKW und Heizkessel bei mittleren Strombezugskosten von 18 ct/kWh

Um die Bewertung für Betreiber zu vereinfachen, wurden für jedes BHKW die Vollbenutzungsstunden ermittelt, bei denen die vermiedenen Energiebezugskosten von BHKW und Kessel gleich sind (Schnittpunkt der Geraden). Wenn durch ein neues BHKW mehr Vollbenutzungsstunden erreicht werden, kann dieses wirtschaftlich betrieben werden. Dies ist als Entscheidungsgrundlage in Bild 5.29 dargestellt. Zusätzlich wurden die mittleren Strombezugskosten zwischen 14 ct/kWh und 18 ct/kWh variiert. Befindet sich eine Kombination aus Leistung und Vollbenutzungsstunden im Grenzbereich, ist der Strombezugspreis ausschlaggebend. Eine Kombination nahe am Bereich *BHKW wirtschaftlicher* mit einem mittleren Strombezugspreis ist wirtschaftlich. Befindet sich die Kombination hingegen nahe am Bereich *Heizkessel wirtschaftlicher* ist dies nicht der Fall. Da in der Praxis selten das gesamte Faulgas sinnvoll zur Wärmeerzeugung genutzt werden kann, zeigt Bild 5.30 das Diagramm, bei dem mit 80 % ein realistischer Anteil des Faulgases zur Wärmeerzeugung in einer Kesselanlage eingesetzt wird.

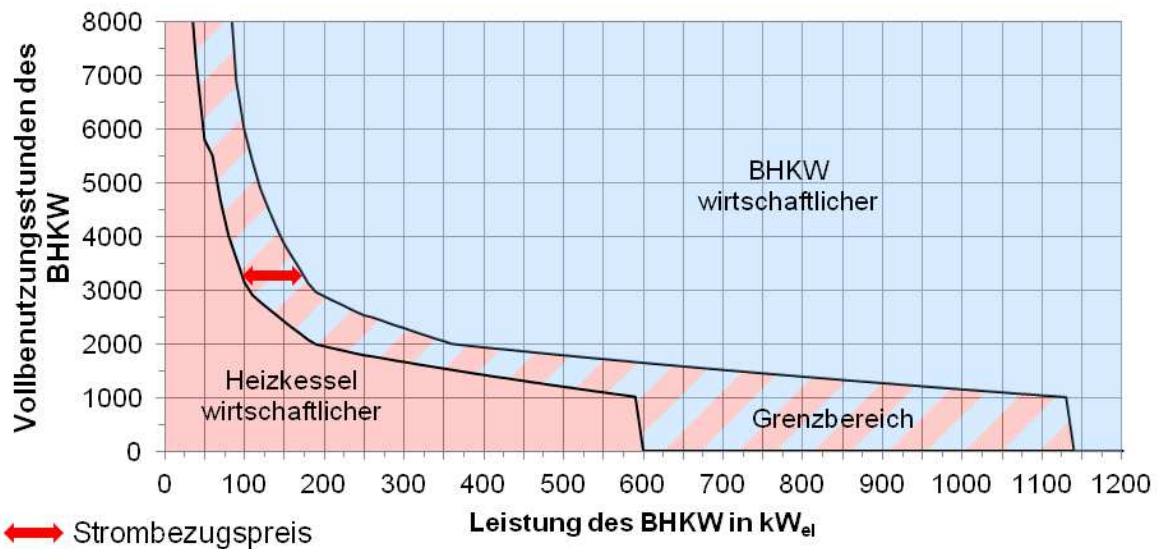


Bild 5.29: Entscheidung zwischen Heizkessel und Repowering-BHKW in Abhängigkeit von der BHKW-Leistung und den Vollbenutzungsstunden bei mittleren Strombezugskosten zwischen 14 ct/kWh und 18 ct/kWh



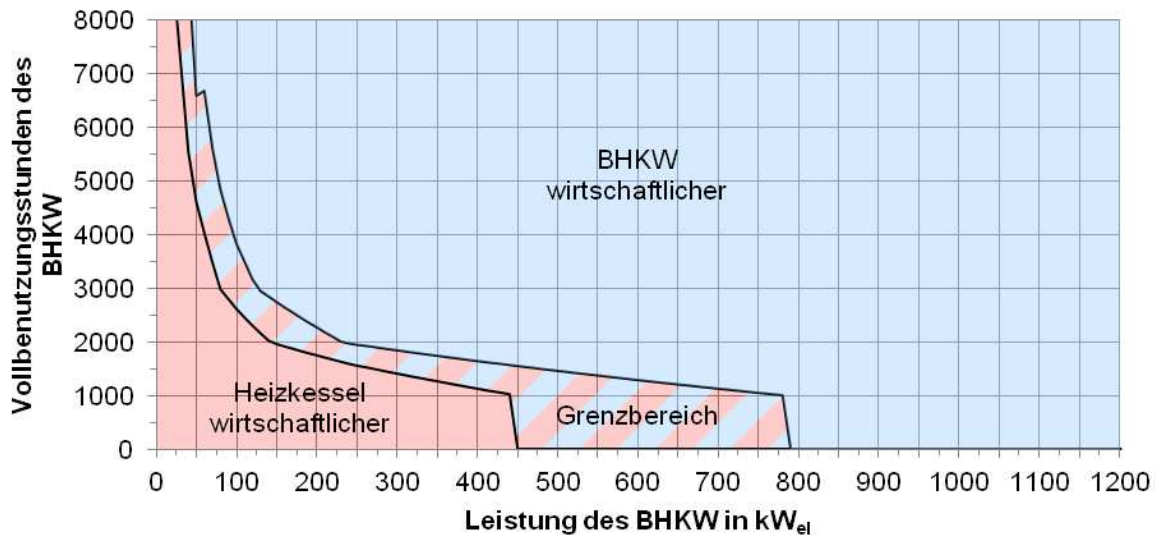


Bild 5.30: Entscheidung zwischen Heizkessel und Repowering-BHKW in Abhängigkeit von der BHKW-Leistung und den Vollbenutzungsstunden bei mittleren Strombezugs-kosten zwischen 14 ct/kWh und 18 ct/kWh und 80 % sinnvoller Wärmeerzeugung aus Faulgas

### BHKW-Repowering

Für jedes Bestands-BHKW und jede Parameterkombination aus verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust und Vollbenutzungsstunden wurde der elektrische Nennwirkungsgrad berechnet, bei dem die gleichen faulgasspezifischen Einsparungen erreicht werden wie mit einem entsprechenden Repowering-BHKW. Dies entspricht anschaulich jeweils dem Schnittpunkt der Kurven in den Bild 5.25 und Bild 5.26. Der so ermittelte elektrische Nennwirkungsgrad stellt damit jeweils den Wendepunkt für die Wirtschaftlichkeit eines Repowering-Vorhabens dar. Besitzt ein konkretes BHKW einen elektrischen Nennwirkungsgrad unterhalb des errechneten Wertes, ist das Repowering sinnvoll. Liegt der elektrische Nennwirkungsgrad höher, ist der Erhalt des Bestands-BHKW wirtschaftlich vorteilhaft. Die nachfolgende Darstellung zeigt das Ergebnis dieser Auswertungen für 7.000 VBh und ohne verschleißbedingten Wirkungsgradverlust beim Bestands-BHKW.

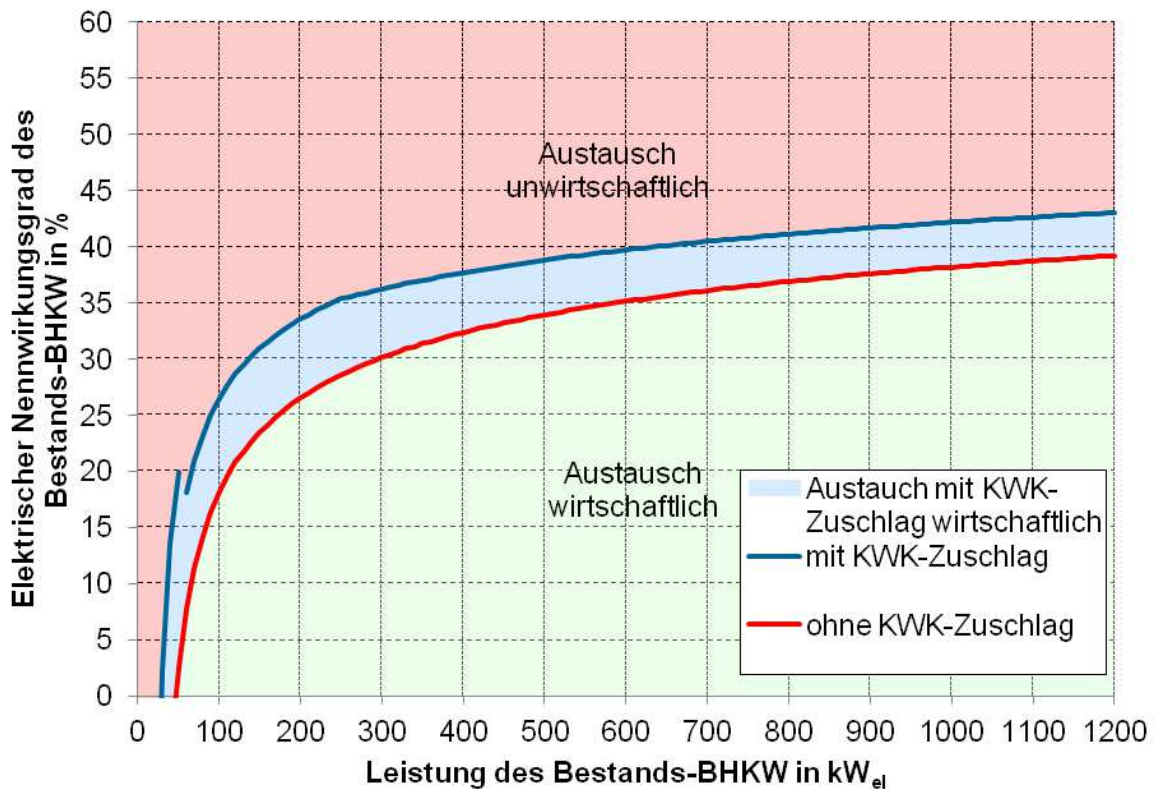


Bild 5.31: Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 7.000 VBh und mit 0 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust

Aus der Kombination von elektrischer Leistung und Nennwirkungsgrad lässt sich jeweils ablesen, ob ein Austausch im wirtschaftlichen oder unwirtschaftlichen Bereich liegt. Dazwischen ist der Bereich *Austausch mit KWK-Zuschlag wirtschaftlich* aufgeführt. Dieser Bereich ist dargestellt, um die Auswirkungen des derzeitigen KWKG auf die Wirtschaftlichkeit von Repowering-Vorhaben aufzuzeigen. Im Bereich *Austausch wirtschaftlich* (unterhalb der roten Kurve) ist ein Austausch allein aufgrund der Wirkungsgraddifferenz zwischen Bestands-BHKW und Repowering-BHKW wirtschaftlich. Im Bereich *Austausch mit KWK-Zuschlag wirtschaftlich* ergibt sich die Wirtschaftlichkeit erst daraus, dass das Repowering-BHKW nach dem KWKG erneut zuschlagsberechtigt ist. Der Bereich *Austausch unwirtschaftlich* (oberhalb der blauen Kurve) zeigt an, dass die Wirkungsgraddifferenz zwischen Bestands-BHKW und Repowering-BHKW nicht ausreicht, um die Investitionskosten für den Austausch zu kompensieren.

Allein auf Basis von Bild 5.31 kann eine Bewertung jedoch nicht erfolgen. In der Praxis zeigt sich, dass Bestands-BHKW am Ende der regulären Nutzungsdauer häufig verschleißbedingte Wirkungsgradverluste von etwa 15 % des elektrischen Nennwirkungsgrades aufweisen. In Bild 5.32 ist die Wirtschaftlichkeit ebenfalls für 7.000 VBh, jedoch mit 15 % verschleißbedingtem Verlust dargestellt.

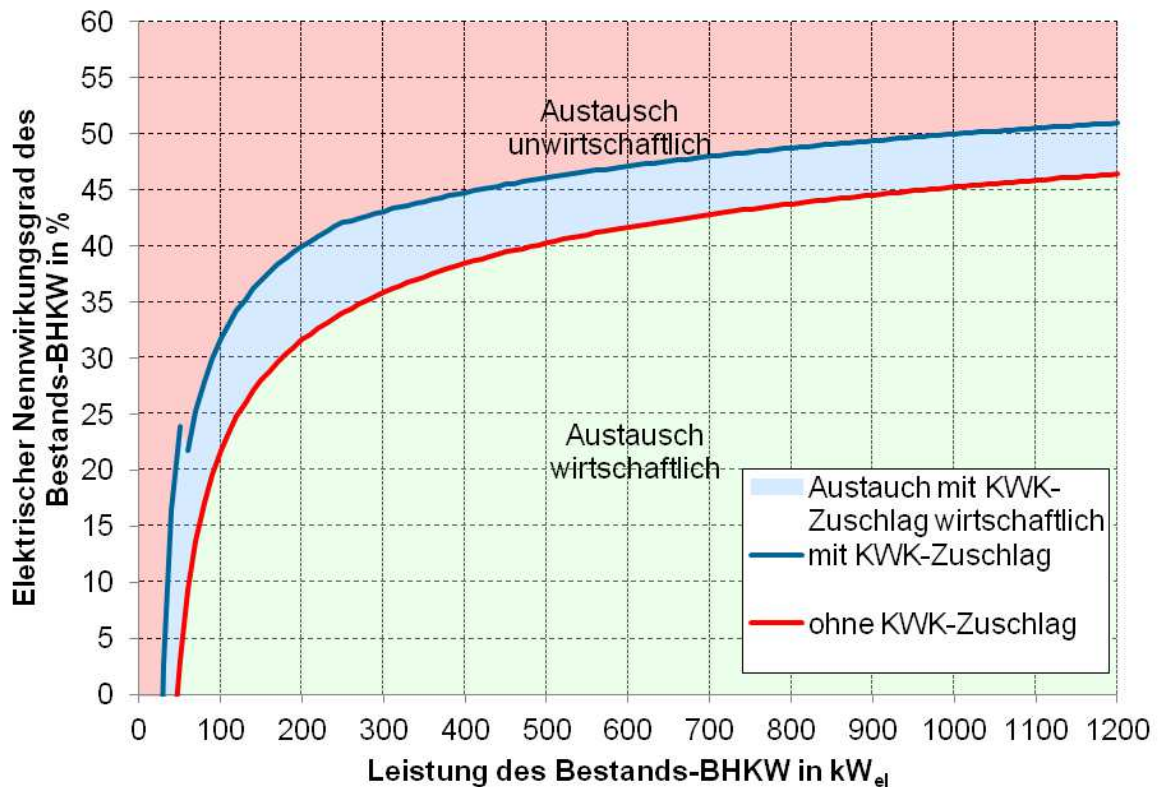


Bild 5.32: Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 7.000 VBh und mit 15 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust

Ein Vergleich von Bild 5.31 und Bild 5.32 zeigt, dass ein Austausch nun aufgrund des verschleißbedingten Wirkungsgradverlustes schon bei höheren Nennwirkungsgraden des Bestands-BHKW wirtschaftlich ist.

Da der verschleißbedingte Wirkungsgradverlust in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen wie Betriebsstunden, Gasqualität, Gaskonditionierung und Wartung des BHKW sehr unterschiedlich sein kann, wurden das Bild 5.31 sowie das Bild 5.32 als allgemein verwendbare Bewertungsgrundlage zusammengefasst. Neben den drei vorgenannten Bereichen entstehen so Überschneidungen (schraffierte Flächen), in denen die Wirtschaftlichkeit eines Austausches von der Höhe des verschleißbedingten Wirkungsgradverlustes abhängig ist. Die farbliche Schraffur gibt jeweils die Art der Überlappung an. Durch die Förderung nach dem KWKG besitzt der Überlappungsbereich aller drei Bereiche kaum Relevanz. Hat ein Bestands-BHKW einen hohen Wirkungsgradverlust, ist ein Austausch dort in der Regel bereits ohne KWK-Zuschlag wirtschaftlich. Im Falle eines niedrigen Wirkungsgradverlustes ist ein Austausch in der Regel mit KWK-Zuschlag wirtschaftlich. Erst durch Wegfall oder erhebliche Verringerung des KWK-Zuschlages ist im Falle eines niedrigen Wirkungsgradverlustes der unwirtschaftliche Bereich anzunehmen. Die Darstellung erfolgt für 7.000 VBh und 4.000 VBh.

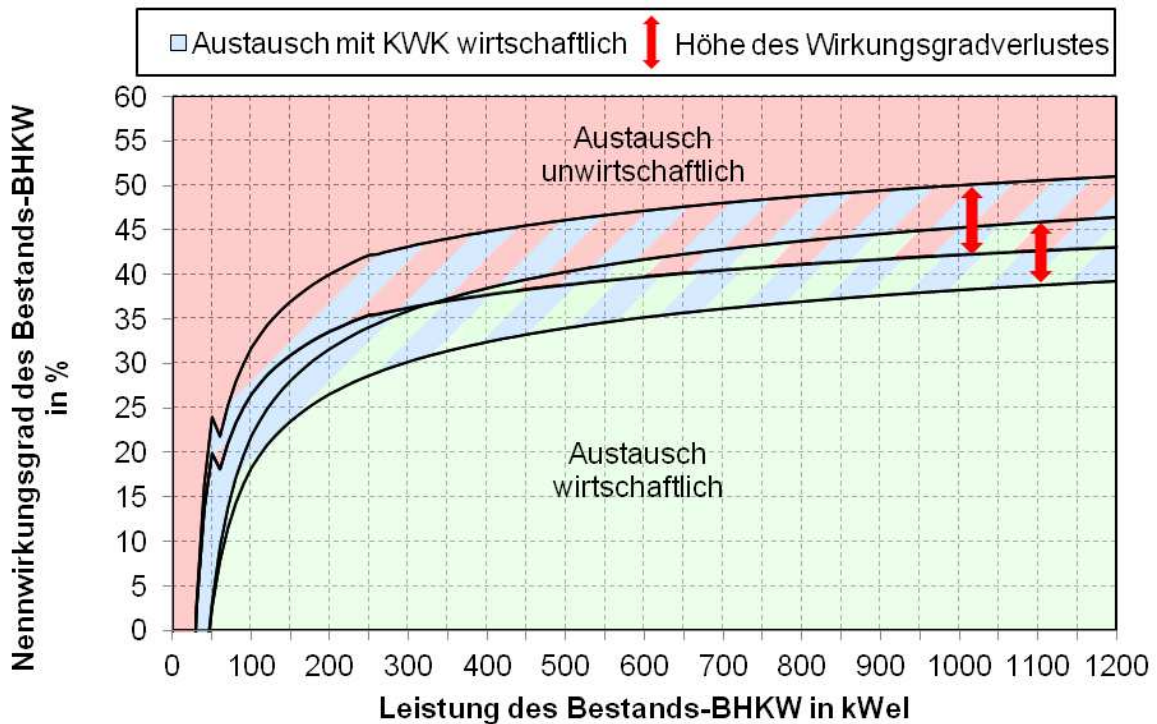


Bild 5.33: Bewertungsdiagramm zur Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 7.000 VBh im Bereich zwischen 0 % mit 15 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust

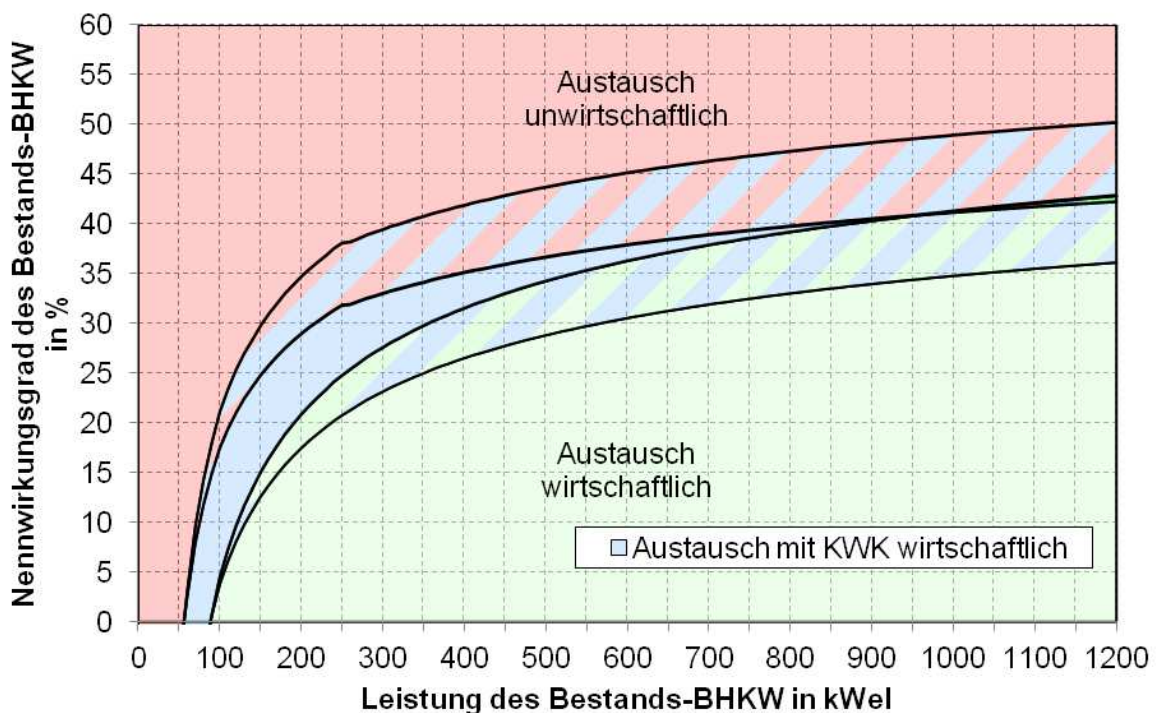


Bild 5.34: Bewertungsdiagramm zur Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 4.000 VBh im Bereich zwischen 0 % mit 15 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust

### 5.2.6 Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine verbesserte Gasnutzung

Vor dem Hintergrund des Leitbildes *CO<sub>2</sub>-neutrale Kläranlage* ist die Wirtschaftlichkeit einer Investition nicht das einzige Bewertungskriterium für die Investitionsentscheidung. Nachfolgend werden daher die durch die Substitution von Fremdenergiebezug vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen der eingesetzten Gasnutzungstechnologien verglichen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass fehlende Wärme durch einen Erdgaskessel mit 92 % Wirkungsgrad erzeugt wird und Strom als deutscher Strommix aus dem Netz entnommen wird. Als Emissionsfaktoren wurden für thermische Energie 216 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>th</sub> und für elektrische Energie 596 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> angesetzt (vgl. CO<sub>2</sub>-Emissionsrechner des LANUV). Zum Einen wurden die Gasnutzungsvarianten Faulgasnutzung zur Wärmeerzeugung und Faulgasnutzung in KWK (Bild 5.35) verglichen und zum Anderen die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Bestands-BHKW, Repowering-BHKW und Mikrogasturbinen dargestellt (Bild 5.37.).

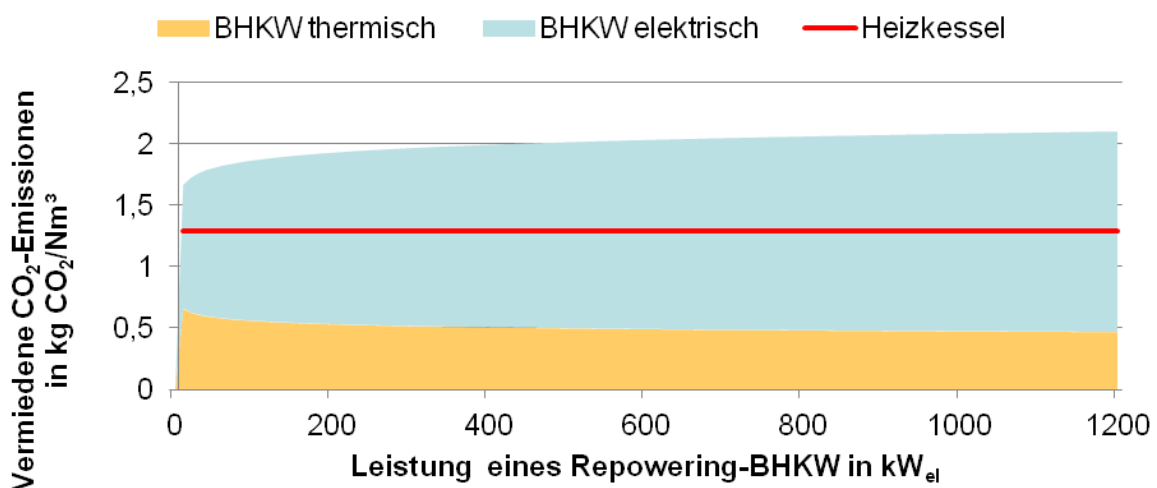


Bild 5.35: Vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen eines neuen BHKW im Vergleich zur reinen Wärmeerzeugung

Es zeigt sich, dass die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung deutlich höher sind als bei der reinen Wärmeerzeugung. Dies ist weniger auf die Energiemenge insgesamt als vielmehr auf die hohen Emissionsfaktoren von elektrischer Energie im Vergleich zu thermischer Energie zurückzuführen. Je nach Gewichtung der Kriterien *Wirtschaftlichkeit* und *Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen* muss die Entscheidung für eine KWK-Anlage daher nicht zwangsläufig nach Maßgabe von Bild 5.29 getroffen werden.

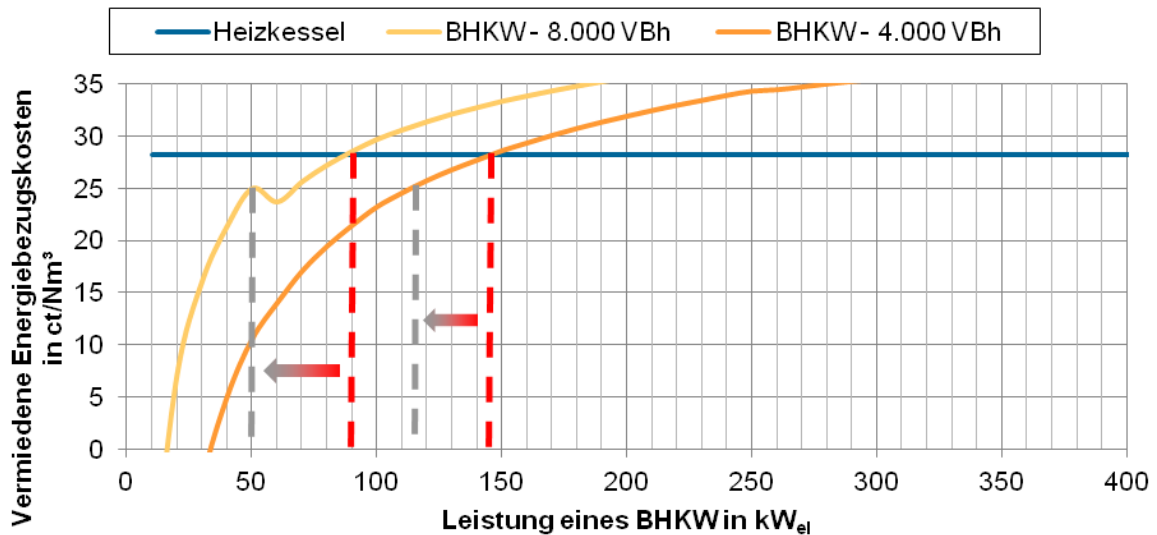


Bild 5.36: Vermiedene Energiebezugskosten von Repowering-BHKW und Heizkessel bei mittleren Strombezugskosten von 14 ct/kWh.

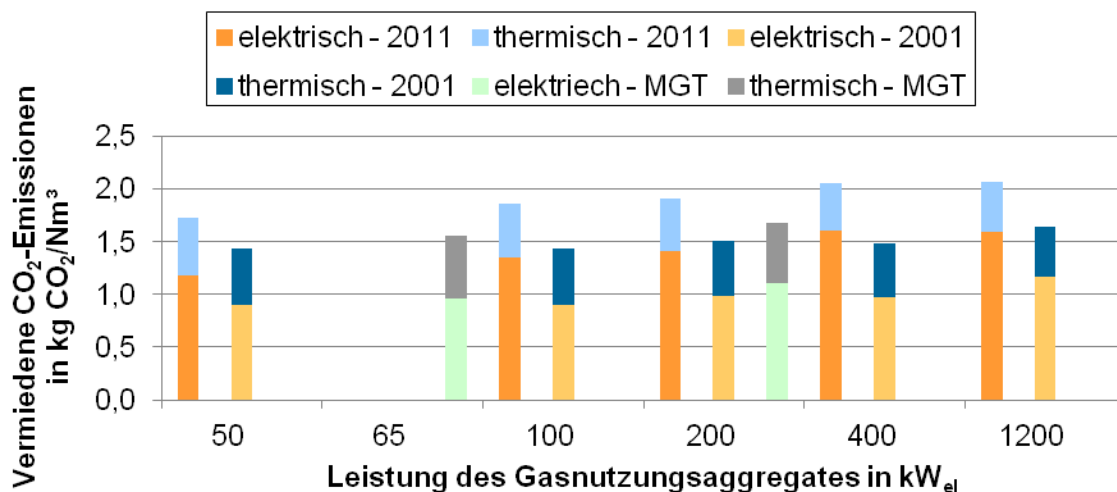


Bild 5.37: Vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Bestands-BHKW, Repowering-BHKW und Mikrogasturbinen

## 5.2.7 Auswirkungen veränderter Strombezugskosten

Eine Änderung der mittleren Strombezugskosten hat keinen Einfluss auf die Stromgestehungskosten. Die faulgasbezogenen Einsparungen der Gasnutzungsaggregate ändern sich jedoch, da sich das Delta zwischen Stromgestehungskosten und dem vermiedenen Strombezug ändert. Die Höhe der relativen Änderung ist dabei abhängig vom elektrischen Nettowirkungsgrad des Gasnutzungsaggregates. In Bild 5.38 ist die absolute Veränderung der faulgasbezogenen Einsparungen bei einer Veränderung des mittleren Strombezugspreises um 1 ct/kWh für alle betrachteten Gasnutzungsaggregate dargestellt:

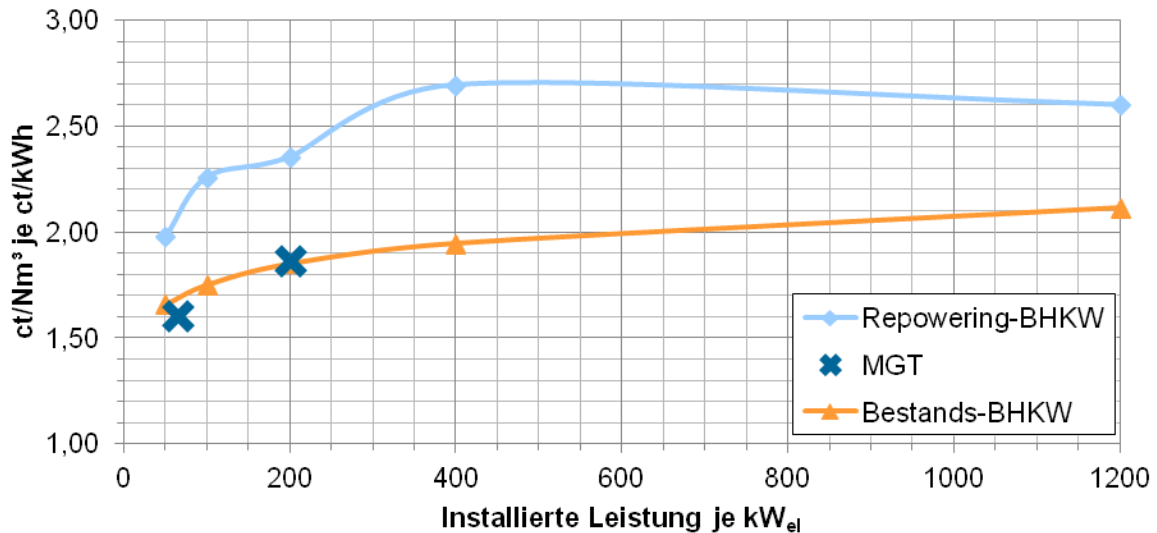


Bild 5.38: Absolute Veränderung der faulgasbezogenen Einsparungen bei einer Veränderung des mittleren Strombezugspreises um 1 ct/kWh

Die Veränderung ist nahezu unabhängig von den erreichten Vollbenutzungsstunden und entspricht damit einer Parallelverschiebung der entsprechenden Kurven. Besondere Auswirkungen hat der mittlere Strombezugspreis dabei, wie im entsprechenden Abschnitt bereits dargestellt, für die Entscheidung zwischen reiner Wärmeerzeugung und der Nutzung einer KWK-Anlage. Für die Entscheidung für oder gegen einen BHKW-Austausch ist der Einfluss geringer, da sich mit dem mittleren Strombezugspreis die Faulgasbezogenen Einsparungen des Bestands-BHKW und des Repowering-BHKW in gleicher Richtung verändern. Da die Veränderung bei den Bestands-BHKW jedoch etwas geringer ausfällt als bei den Repowering-BHKW, folgt, dass bei einer Erhöhung der mittleren Strombezugskosten der BHKW-Austausch etwas wirtschaftlicher wird, während bei einer Verringerung der Erhalt des Bestands-BHKW die wirtschaftlichere Alternative bleibt. Zurückzuführen ist dies auf die jeweiligen elektrischen Nettowirkungsgrade. Da der KWK-Zuschlag von der Höhe der mittleren Strombezugskosten unabhängig ist, ergibt sich, dass seine Bedeutung mit steigenden mittleren Strombezugskosten sinkt und umgekehrt.

### 5.3 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Rahmenbedingungen für den wirtschaftlichen Betrieb von Gasnutzungsaggregaten und die durch ihren Betrieb vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen untersucht.

Sowohl BHKW als auch Mikrogasturbinen stellen danach wirtschaftliche Lösungen dar. Insbesondere Mikrogasturbinen mit einer Leistung von 65 kW<sub>el</sub> können sich im Vergleich zu BHKW günstiger darstellen, wenn die Instandhaltung eines BHKW nicht durch das Betriebspersonal erfolgen kann. Prinzipiell erhöht sich die Wirtschaftlichkeit mit steigenden Vollbenutzungsstunden, wobei kleine Leistungsklassen mehr Vollbenutzungsstunden benötigen, um eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Dies ist auf höhere spezifische Kosten und geringere elektrische Wirkungsgrade im Vergleich zu Gasnutzungsaggregaten mit höherer Leistung zurückzuführen.

Ein Vergleich der Gasnutzungsalternativen Wärmeerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung erlaubt eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit für Betreiber. Gleiches gilt für das BHKW-Repowering. Die Bezugskosten für Strom und Erdgas wirken sich hierbei wesentlich auf die Entscheidung zwischen reiner Wärmeerzeugung und der Faulgasnutzung in KWK-Anlagen aus. Unter derzeitigen Rahmenbedingungen wird die Nutzung von KWK-Anlagen im Bereich zwischen 40 kW<sub>el</sub> und 80 kW<sub>el</sub> wirtschaftlich. Dies entspricht Faulgasmengen von etwa 130.000 Nm<sup>3</sup>/a bzw. 245.000 Nm<sup>3</sup>/a oder 17.000 EGW bzw. 32.000 EWG und deckt sich gut mit den Ergebnissen von GRETZSCHEL ET AL. (Gretzschel et al., 2011). Der Einfluss der Strombezugskosten auf die Entscheidung zum BHKW-Repowering ist hingegen geringer, da sowohl Bestands-BHKW als auch Repowering-BHKW von der Änderung betroffen sind.

Die erzielbaren Steigerungen in der Energieeigenproduktion sind zum Teil erheblich und hängen von der Leistungsklasse des Gasnutzungsaggregates ab. Da auch die Repowering-BHKW über die Nutzungsdauer einen verschleißbedingten Wirkungsgradverlust erfahren werden, müssen entsprechende Verluste bei einem Vergleich nicht berücksichtigt werden (Bild 5.39).. Die Bewertung der vermiedenen direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigt abschließend, dass die Faulgasnutzung in aktuellen BHKWs unter Klimagesichtspunkten allen anderen Nutzungen vorzuziehen ist. Dies ist vor allem auf den hohen spezifischen Emissionsfaktor des fremdbezogenen Stroms zurückzuführen.



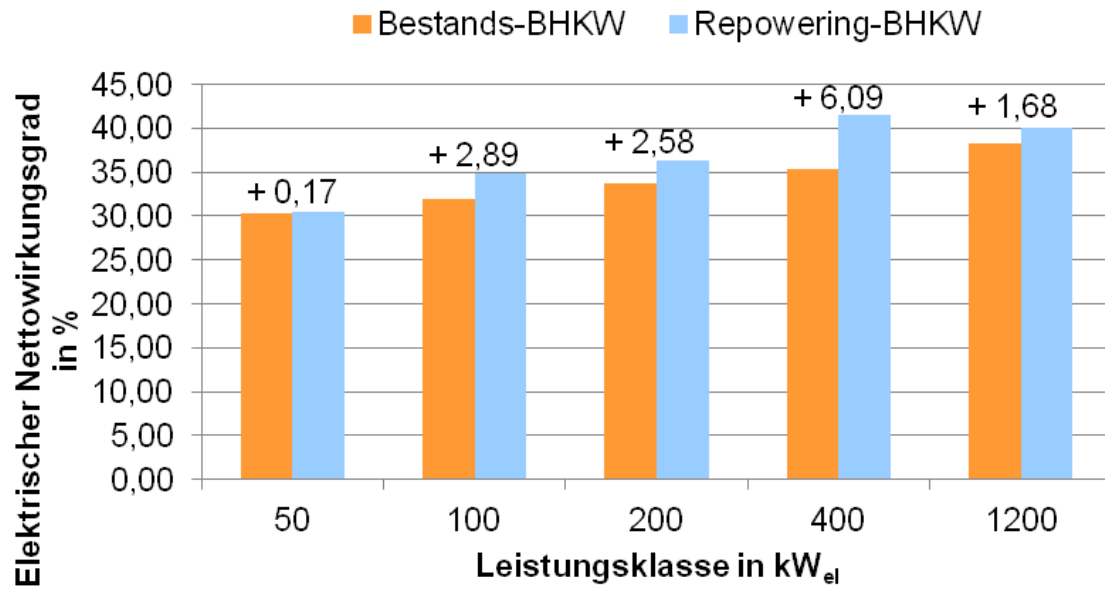


Bild 5.39: Elektrische Nettowirkungsgrade von Bestands- und Repowering-BHKW ohne verschleißbedingten Verlust

## 6 Standortbezogene Verbundkonzepte

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Möglichkeiten betrachtet, die Faulgasausbeute auf Kläranlagen zu steigern (Kapitel 4) und das erzeugte Faulgas effizient zu nutzen (Kapitel 5). Die Faulgasausbeute kann hiernach um etwa 5 % bis 10% gesteigert werden, während bei den Gasnutzungstechnologien bis zu 6 % Effizienzgewinne erreichbar sind. Die Summe dieser Potenziale stellt die theoretische Obergrenze für die Steigerung des Eigenversorgungsgrades dar. Insbesondere wenn nur ein Gasnutzungsaggregat vorhanden ist, werden sich in der Praxis ein zeitweiser Teillastbetrieb und ein gewisser Anteil an Fackelverlusten nicht vollständig verhindern lassen. Es zeigt sich, dass bei heutigen elektrischen Eigenversorgungsgraden zwischen 40 % und 61 % selbst unter Annahme der maximalen ermittelten Potenziale mit den marktverfügbaren Technologien keine vollständige Strombedarfsdeckung aus Faulgas möglich ist. Für die vollständige Deckung des Strombedarfes auf Kläranlagen müssen entsprechend weitere regenerative Erzeugungspotenziale erschlossen werden.

Diese Potenziale bietet z.B. die Integration anderer Erneuerbarer Energieträger (Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft). Ein solcher Regenerativverbund wird in Abschnitt 6.2 untersucht.

Neben Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung besteht in Nordrhein-Westfalen eine große Zahl an Kläranlagen ohne Schlammfäulung, auf denen das energetische Potenzial des Klärschlammes ungenutzt bleibt (siehe Abschnitt 3.1). Die anaerobe Stabilisierung der dort anfallenden Schlammengen auf nahegelegenen Kläranlagen mit Fäulung wird im Abschnitt 6.3 als Schlammverbund untersucht.

In den Sommermonaten besteht auf anaerob stabilisierenden Kläranlagen in der Regel ein Wärmeüberschuss, dessen sinnvolle Nutzung die Effizienz der Faulgasnutzung und damit die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen erhöhen könnte. Die Möglichkeiten der Nutzung dieses Wärmeüberschusses werden im Abschnitt 6.4 unter dem Stichwort Wärmeverbund betrachtet.

Vor der Betrachtung der genannten standortbezogenen Verbundkonzepte wird in Abschnitt 6.1 die betrachtete Modellanlage beschrieben und das Vorgehen erläutert. In Abschnitt 6.5 werden schließlich die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst.

## 6.1 Modellanlage und Vorgehen

Als Modellanlage wurde eine Kläranlage gewählt, zu der den Projektpartnern umfangreiche Daten bezüglich der Faulgasproduktion, den Gasnutzungsaggregaten, dem Strombedarf und der Eigenerzeugung vorlagen. Auch bezüglich der weiteren Anlagencharakteristika spiegelt die Anlage den Bestand in Nordrhein-Westfalen gut wieder. Die wesentlichen Anlagendaten sind wie folgt:

- Ausbaugröße: 48.000 EW
- Mittlere Zulaufmenge: 17.000 m<sup>3</sup>/d
- Klärgasanfall: 350.000 Nm<sup>3</sup>/a
- Methan-Gehalt: 64 %
- Gasspeichervolumen: 400 Nm<sup>3</sup> (Speicherkapazität ca. 10 h)
- Fackelverluste: 1.700 Nm<sup>3</sup>/a
- Gasnutzung: 3 BHKW à 50 kWel
- Schaltspiele der BHKW: 1.660 Stück
- Elektrischer Wirkungsgrad: 32 %
- Thermischer Wirkungsgrad: 53 %
- Eigenversorgungsgrad: 42 %
- Strombedarf: 1.800.000 kWh/a
- Strombezug: 1.040.000 kWh/a

### Vorgehen

Grundlage der Betrachtungen bilden der Strom- und Wärmebedarf sowie die Faulgasproduktion der Kläranlage in Stundenwerten. Der real erzielte Eigenversorgungsgrad dient als Bewertungsmaßstab für die Auswirkungen der Verbundkonzepte.

Bei den Verbundkonzepten Regenerativverbund und Schlammverbund erhöhen sich die Energiemengen, die der Kläranlage zur Eigenversorgung bereit stehen. Diese Energiemengen müssen durch eine geeignete Regelung der BHKW bedarfsgerecht in die Kläranlage integriert werden. Während die Integration erneuerbarer Energien den Strombedarf senkt, wird im Schlammverbund die Faulgasmenge durch Fremdschlamm erhöht. Durch den Gasspeicher können die zusätzlichen Energiemengen bedarfsgerecht eingesetzt werden. Die BHKW müssen entsprechend geregelt werden.

---

Diese Regelung wurde unter folgenden Prämissen modelliert:

- Die Regelung der BHKW ist vom Füllstand des Gasspeichers abhängig. Bei hohem Füllstand kann bedarfsgerecht geregelt werden. Wenn ein bestimmter Schwellenwert erreicht ist, wird der Gasspeicher zunächst wieder gefüllt, bevor erneut bedarfsgerecht geregelt werden kann.
- Wird ein maximaler Füllstand des Gasspeichers überschritten, erfolgt die Faulgasnutzung auch ohne entsprechende Bedarfe. Kann das Faulgas nicht in den BHKW genutzt werden, wird es abgefackelt.
- Um unnötige Schaltspiele der BHKW zu vermeiden, wird der momentane Bedarf von einer unscharfen Logik überlagert.
- Zur Vermeidung von Teillastbetrieb wird immer diejenige Kombination von BHKW eingesetzt, die den Bedarf mit maximalem Wirkungsgrad decken kann. Häufige Schaltspiele werden auch hier unterdrückt.
- Nach Berücksichtigung der Gasmenge erfolgt eine rein stromgeführte Regelung. Der Wärmebedarf ist nicht Gegenstand der Regelung.
- Um eine übermäßige Unterdeckung des Wärmebedarfes auszugleichen, wird ein 10 m<sup>3</sup>-Warmwasserspeicher integriert.

Neben dem Eigenversorgungsgrad dienen auch die Schaltspiele der BHKW und die Fackelverluste, die sich aus der beschriebenen Regelung ergeben, als Bewertungsgrundlage für die Verbundkonzepte.

Die zugrunde gelegten Strom- und Wärmebedarfe sowie deren Deckung in der Modellanlage sind in Bild 6.1 und Bild 6.2 beispielhaft für den Monat März dargestellt.

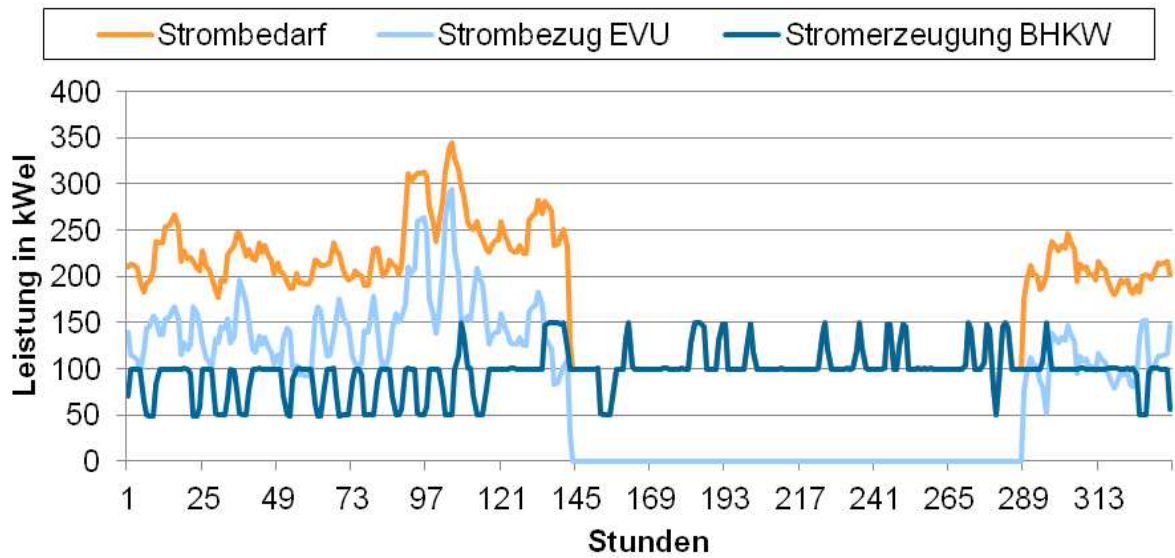


Bild 6.1: Strombedarf und Strombedarfsdeckung aus den BHKW und EVU-Strombezug der Modellanlage

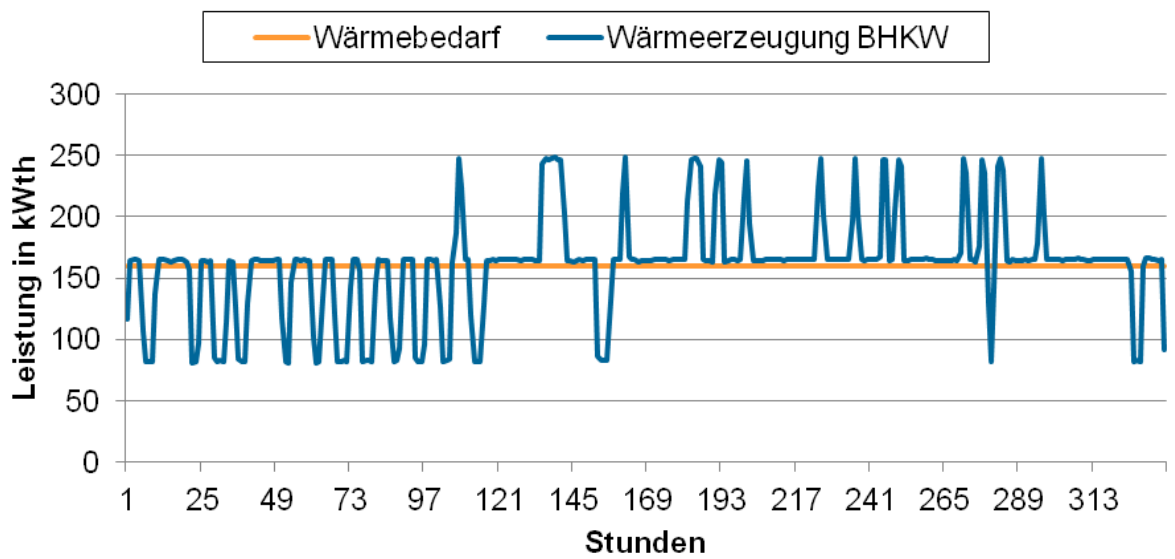


Bild 6.2: Wärmebedarf und Wärmebedarfsdeckung aus den BHKW der Modellanlage

## 6.2 Regenerativverbund

Ziel des Regenerativverbundes ist es, durch die Integration weiterer erneuerbarer Energieträger den Eigenversorgungsgrad zu erhöhen. Dabei soll die fluktuativ erzeugte Energie nicht nur dann integriert werden, wenn zufällig Bedarf und Erzeugung zusammenfallen. Vielmehr besteht durch den Verbund aus BHKW und Gasspeicher auf den meisten Kläranlagen die Möglichkeit, die Energie in Form von Faulgas zu speichern und bedarfsgerecht einzusetzen. Die BHKW können bei hoher Einspeisung von fluktuativer Energie weniger oder keinen Strom erzeugen und das „gesparte“ Faulgas später bedarfsgerecht einsetzen. Dieses Prinzip ist qualitativ in Bild 6.3 dargestellt. Die Nutzung weiterer Erzeugungspotenziale vermindert zunächst den Stromfremdbezug. Durch den verringerten Strombedarf und eine bedarfsgerechte Regelung kann Faulgas eingespeichert und bedarfsgerecht ausgespeichert werden. Durch die strukturell erhöhte Faulgasmenge im Gasspeicher können die BHKW leichter im Bereich des optimalen elektrischen Wirkungsgrades betrieben werden. So kann sich auch die Energieausbeute leicht erhöhen bzw. die Verluste verringern.

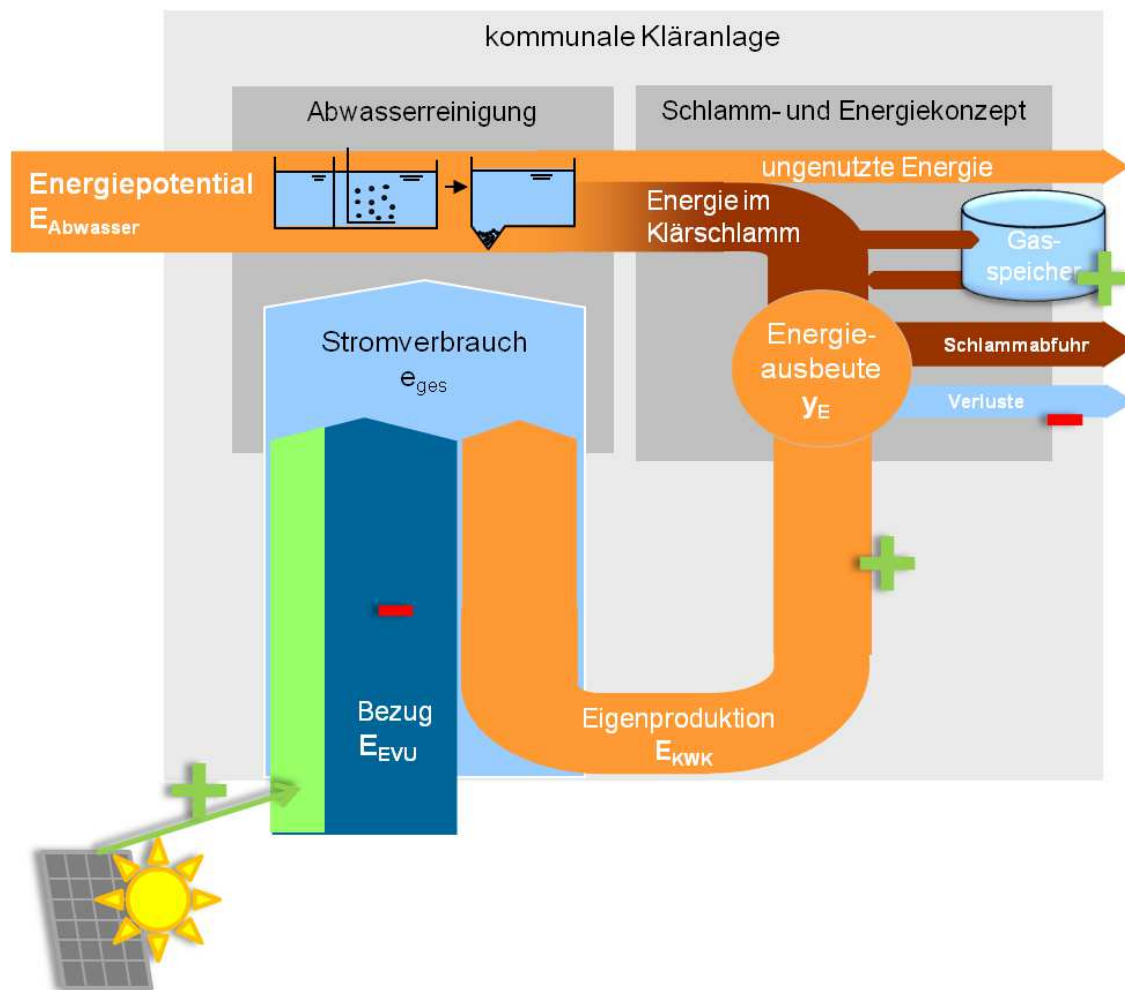


Bild 6.3: Prinzip des Regenerativverbundes

Als regenerative Energieträger kommen im Wesentlichen Windenergie und Photovoltaik in Frage. Die Stromgestehungskosten für Windenergie (kein Kleinwind) in Nordrhein-Westfalen schwanken je nach Standort und Anlage zwischen 7 ct/kWh und 11 ct/kWh und liegen damit deutlich unter den Strombezugspreisen von Kläranlagen. Je nach Anlagengröße erzeugen moderne Windkraftanlagen in NRW dabei zwischen 1.000.000 kWh<sub>el</sub>/a und 7.000.000 kWh<sub>el</sub>/a. Diese Größenordnung übersteigt jedoch den Bedarf vieler Kläranlagen, sodass eine Integration insbesondere bei größeren Kläranlagen sinnvoll ist. Da auch die Genehmigungsanforderungen zur Errichtung einer Windenergieanlage nur an besonders geeigneten Standorten erfüllt werden können, wird die Integration von Windenergieanlagen hier nicht als allgemeines Beispiel betrachtet.

Anders als Windenergieanlagen sind Photovoltaikanlagen stufenlos skalierbar und können ohne besondere Genehmigungsanforderungen installiert werden. So kann davon ausgegangen werden, dass die Installation einer Photovoltaikanlage prinzipiell auf jeder Kläranlage möglich ist, wenn auch nicht immer in erforderlicher Größe. Die Stromgestehungskosten liegen mit 11,5 ct/kWh bis 13,5 ct/kWh in der Regel unterhalb der derzeitigen Strombezugskosten von Kläranlagen. Die Dimensionierung sollte so gewählt werden, dass möglichst keine Einspeisung in das öffentliche Netz erfolgt, da die Vergütungssätze nach dem EEG 2012 die Stromgestehungskosten häufig nicht mehr decken und für den Nachweis der vergütungsrelevanten Strommengen dann ein aufwendiges Messkonzept erforderlich wird (EEG 2012, 07/2012). Als Richtgröße für die Auslegung kann der mittlere Strombedarf der Kläranlage angesetzt werden. Selbst bei voller Leistung der Photovoltaikanlage kommt es so in der Regel nicht zu einer Ausspeisung. Entsprechend des mittleren Bedarfes der Modellanlage von 204 kW<sub>el</sub> wird hier im Folgenden daher eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 200 kW<sub>p</sub> betrachtet. Der spezifische Ertrag am Standort der Modellanlage beträgt 920 kWh/kW<sub>p</sub>. Der Lastgang der Photovoltaikanlage wurde anhand von Vergleichsanlagen in der Netzregion der Modellanlage modelliert und entsprechend skaliert. Der betrachtete Zeitraum entspricht dem Zeitraum, aus dem auch die Daten der Modellanlage stammen, sodass auch Wetterereignisse weitgehend korrelieren.

### **Ergebnisse der Untersuchung**

Die Photovoltaikanlage erzeugt im Jahr 184.170 kWh. Würden die erzeugten Strommengen ohne besondere Regelung der BHKW in das Netz der Kläranlage integriert, könnten davon 154.800 kWh oder 84 % unmittelbar verbraucht werden. Entsprechend würde es zu einer Ausspeisung von 29.370 kWh in das öffentliche Netz kommen. Durch die oben beschriebene Regelung kann mit 179.699 kWh bzw. 97,5 % beinahe die gesamte Strommenge in das Netz der Kläranlage integriert werden, lediglich 4.550 kWh müssen ins öffentliche Netz

ausgespeist werden. Bild 6.4 zeigt den EVU-Strombezug ohne Integration der Photovoltaikanlage sowie nach der Integration ohne und mit Regelung der BHKW.

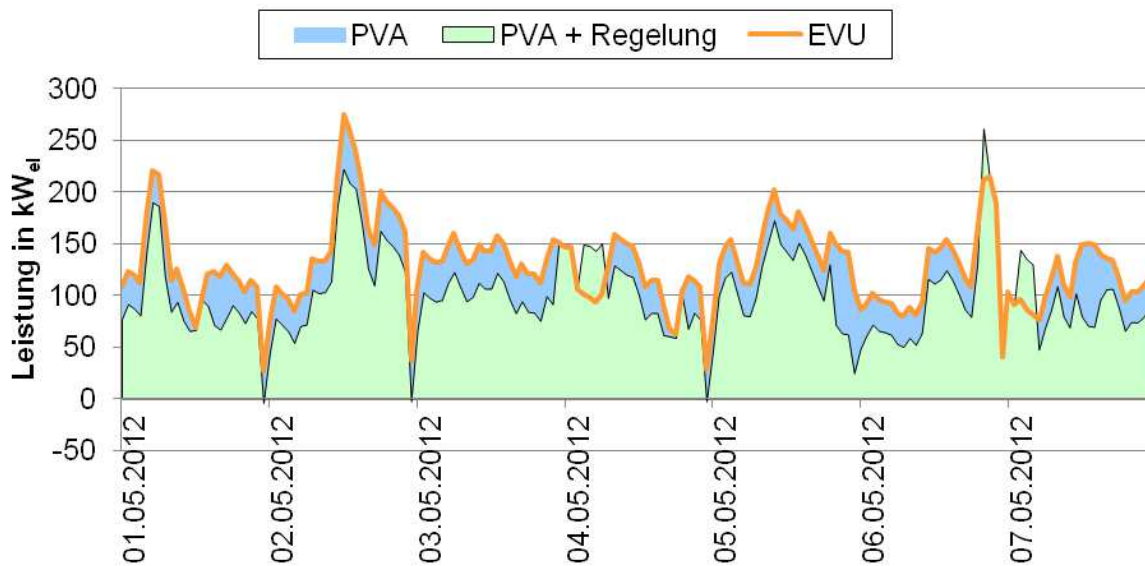


Bild 6.4: Integration einer 200 kWp PV-Anlage in die Modellanlage in der ersten Maiwoche

Die Grafik zeigt beispielhaft für die erste Maiwoche die Auswirkungen der Integration der Photovoltaikanlage. Die orangene Linie zeigt den ursprünglichen Strombezug vom EVU in der Ausgangssituation. Die hellgrüne Fläche stellt den Strombezug der Modellanlage nach Integration der Photovoltaikanlage und Regelung der BHKW dar. Die hellblaue Fläche zeigt den Unterschied zwischen der Integration mit und ohne die beschriebene Regelung der BHKW. Der Strombezug der Modellanlage wird insbesondere um die Mittagszeit deutlich reduziert. Ohne eine Regelung der BHKW kommt es bei geringem Strombedarf und hoher Erzeugung der Photovoltaikanlage zur Einspeisung in das öffentliche Netz (blaue Fläche im negativen Bereich). Die Regelung kann dies effektiv verhindern.

Durch die Integration der Photovoltaikanlage ohne Regelung der BHKW wird der Strombezug auf 884.500 kWh/a reduziert und so ein Eigenversorgungsgrad von 50 % erreicht. Dadurch können die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 597,2 t/a reduziert werden. Durch die Regelung kann dieser um ein weiteres Prozent auf 51 % erhöht werden. Die Schaltspiele der BHKW bleiben mit einer Erhöhung um 260 Stück auf 1.920 im vertretbaren Bereich. Die Fackelverluste erhöhen sich auf 11.300 Nm<sup>3</sup>. Durch den eingesetzten Warmwasserpuffer erhöht sich der externe Heizenergiebedarf nur marginal um 4.500 kWh<sub>th</sub>/a.



### 6.3 Schlammverbund

Die Ergebnisse der Datenabfrage haben gezeigt, dass die Faultürme der Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen mit einer geringen Faulraumbelastung und sehr hohen Faulzeiten noch erhebliche Kapazitätsreserven besitzen (siehe Abschnitt 3.3.3). Gleichzeitig findet auf 52 % der Kläranlagen, die immerhin 17 % der Reinigungsleistung ausmachen, keine Schlammfäulung statt (siehe Abschnitt 3.2). Das energetische Potenzial dieser Klärschlämme bleibt so derzeit ungenutzt. Durch den Transport der Klärschlämme zu nahegelegenen Kläranlagen mit Schlammfäulung kann das energetische Potenzial des Schlammes genutzt und so ein Schlammverbund geschaffen und die Faulgasproduktion gesteigert werden. Die größere Gasmenge führt dazu, dass mehr Strom und Wärme im BHKW erzeugt werden können. In Verbindung mit dem Gasspeicher können die BHKW tendenziell besser im optimalen Bereich betrieben werden und es steht mehr Faulgas für eine stromgeführte Regelung zur Verfügung. Das Prinzip des Schlammverbundes ist nachfolgend dargestellt.

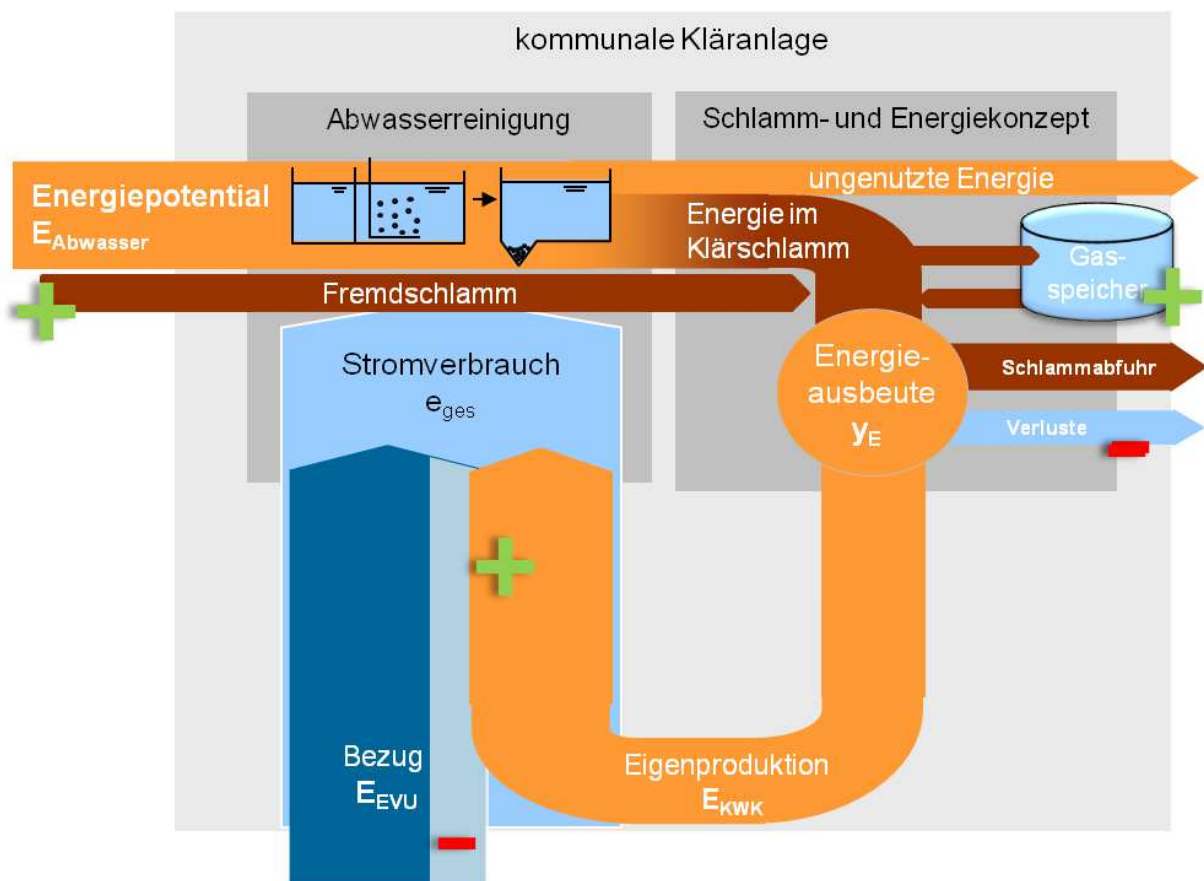


Bild 6.5: Prinzip des Schlammverbundes

Für einen Schlammverbund sind die rechtlichen Anforderungen an die Schlammbehandlung und -entsorgung zu beachten und das Schlammverbundkonzept ist mit den zuständigen Behörden abzustimmen.

Der Klärschlamm aus aeroben Stabilisierungsanlagen entspricht hinsichtlich TR-Gehalt und spezifischer Faulgasausbeute im Wesentlichen dem Rohschlamm auf anaeroben Anlagen, lediglich der oTR-Gehalt ist durch die längere Aufenthaltszeit in der biologischen Stufe etwas verringert (siehe ATV-DVWK-M 368).

Bezüglich der erzielbaren Gasausbeute wird für den Schlamm von folgenden Charakteristika ausgegangen:

- TR-Gehalt: 4 %
- oTR-Anteil: 65 %
- spezifische Gasausbeute: 450 l/kg oTS<sub>zu</sub>
- Methangehalt: 65 %

Aus diesen Charakteristika ergibt sich eine spezifische Faulgasausbeute von 11,7 Nm<sup>3</sup> Faulgas je m<sup>3</sup> Klärschlamm. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Kapitel 5 und der BHKW-Eigenschaften der Modellanlage können durch die Gasproduktion Kosten für Strom- und Erdgasbezug in Höhe 2,92 €/m<sup>3</sup> Klärschlamm und CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 21 kg/m<sup>3</sup> Klärschlamm vermieden werden. Für den Transport müssen dagegen Kosten in Höhe von etwa 0,75 €/(m<sup>3</sup>\*km) und CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 97,5 g/tkm (Gramm pro Tonnenkilometer) aufgewendet werden. Die Transportkosten stammen dabei aus Preisanfragen für ähnliche Untersuchungen der Projektpartner und die aufzuwendenden CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden nach einer entsprechenden UBA-Studie berechnet (UBA, 2012a). Aus den Werten ergeben sich die in Bild 6.6 und Bild 6.7 dargestellten maximalen Transportentfernungen.

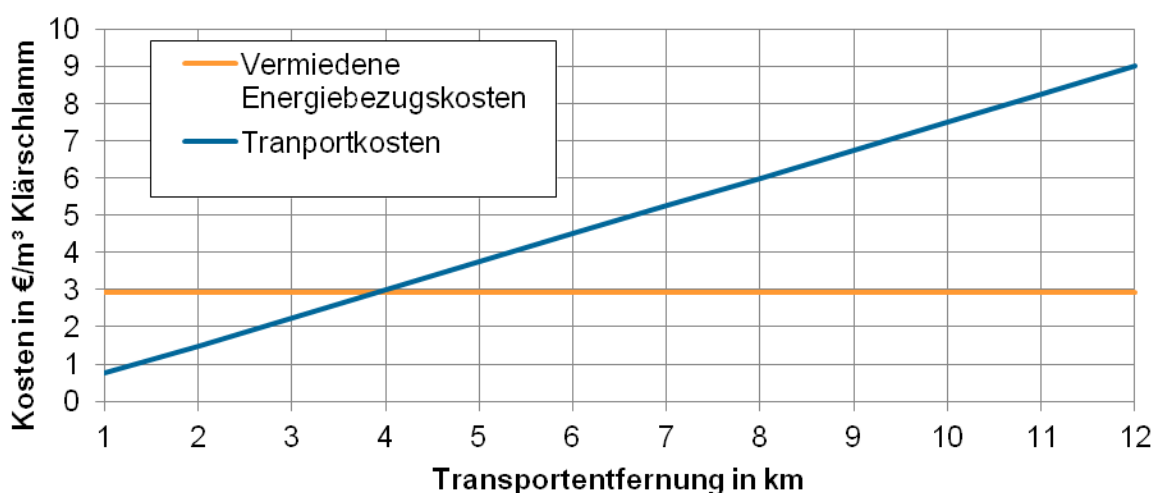


Bild 6.6: Vergleich von Transportkosten und vermiedenen Energiebezugskosten

Der vorangegangene Vergleich zeigt, dass die Transportkosten den limitierenden Faktor für den Schlammverbund sind. Während diese die vermiedenen Energiebezugskosten bereits bei mehr als 4 km Transportentfernung übersteigen, erreichen die transportbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen erst bei 213 km den vermiedenen Wert. In der Praxis ist ein Schlammverbund damit nur dann wirtschaftlich vorteilhaft, wenn entweder ein sehr enger räumlicher Zusammenhang besteht oder z. B. durch eine verbesserte Massenreduktion des Faulschlammes auf der Zielanlage zusätzlich Entsorgungskosten eingespart werden können. Eine weitere Möglichkeit kann die Installation einer Klärschlamm-Druckleitung sein, wie dies beim Aggerverband umgesetzt wurde (Menniger, 2013).

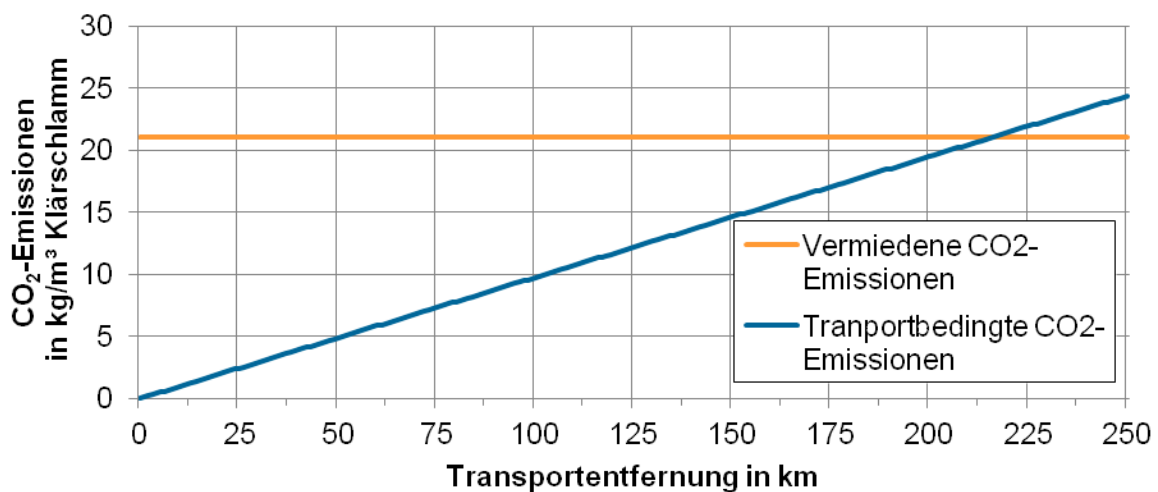


Bild 6.7: Vergleich transportbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen und vermiedener CO<sub>2</sub>-Emissionen

Aufgrund der üblichen Kapazität eines Tanklastfahrzeuges von 15 m<sup>3</sup> wurde für die Beispielkläranlage eine Zugabe von 15 m<sup>3</sup> Fremdschlamm je Tag angesetzt. Aus dem Klärschlamm werden durch Faulung etwa 64.230 Nm<sup>3</sup> zusätzliches Faulgas mit einem energetischen Potenzial von 133.180 kWh<sub>el</sub> erzeugt. Nach einer bedarfsgerechten Regelung können daraus 124.850 kWh<sub>el</sub> effektiv genutzt werden. Der Grund für die Differenz liegt in Wirkungsgradverlusten im Teillastbetrieb der BHKW begründet. Die Eigenbedarfsdeckung für Strom erhöht sich auf 49 %. Auch hier erhöhen sich die Schaltspiele um 250 auf 1.910 Stück und bleiben damit im vertretbaren Bereich. Fackelverluste treten in Höhe von 7.350 Nm<sup>3</sup>/a auf. Aufgrund der gestiegenen Wärmeerzeugung verringert sich der externe Heizenergiebedarf nennenswert um etwa 53.000 kWh<sub>th</sub>. Bild 6.8 zeigt den Strombezug vor und nach der Integration des Fremdschlammes. Durch die zusätzliche Stromerzeugung können CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 74,4 t/a vermieden werden, der reduzierte Heizenergiebedarf trägt mit 11,4 t/a zur Verringerung bei.

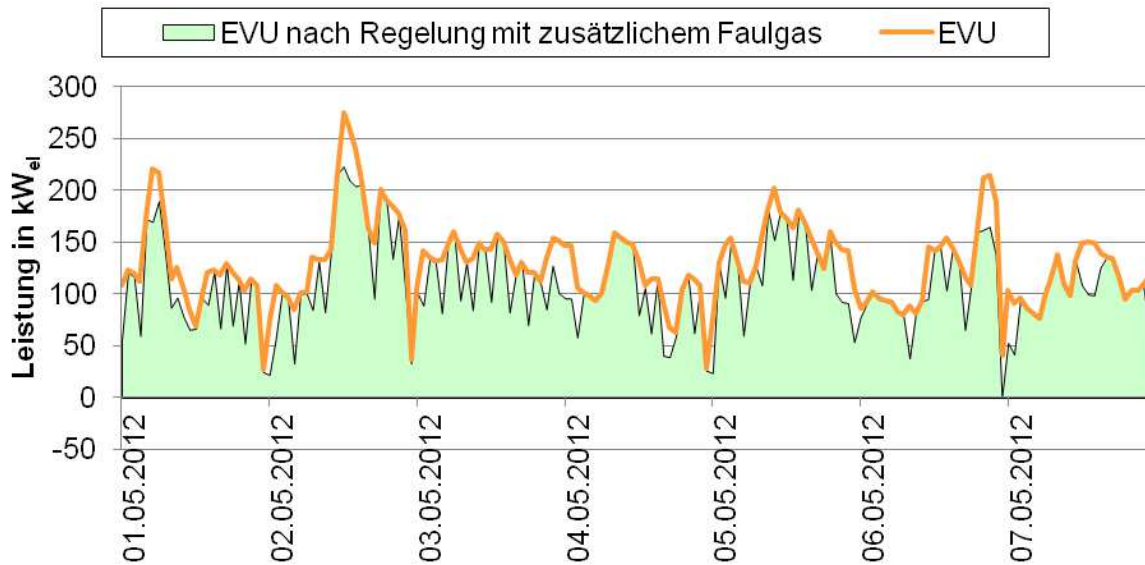


Bild 6.8: Strombezug vor und nach Integration von Fremdschlamm

## 6.4 Wärmeverbund

Ziel des Wärmeverbundes ist es, die Wärmeüberschüsse, die insbesondere in den Sommermonaten auf Kläranlagen auftreten, sinnvoll an Dritte weiterzugeben und so den Wärmenutzungsgrad zu erhöhen. Die Modellkläranlage hat einen Wärmebedarf von etwa 1.000.000 kWh<sub>th</sub>, kann von den 1.250.000 kWh<sub>th</sub>, die durch die BHKW erzeugt werden jedoch nur etwa 70 % und damit 853.500 kWh<sub>th</sub> nutzen. Entsprechend bleiben 30 % oder 396.500 kWh<sub>th</sub> ungenutzt. In den Wintermonaten besteht zudem ein Wärmebedarf in Höhe von 150.000 kWh<sub>th</sub>, der durch die BHKW nicht gedeckt werden kann und so einen Erdgasbezug erfordert. Wärmebedarf und Wärmeerzeugung der Modellanlage sind in Bild 6.9 dargestellt.

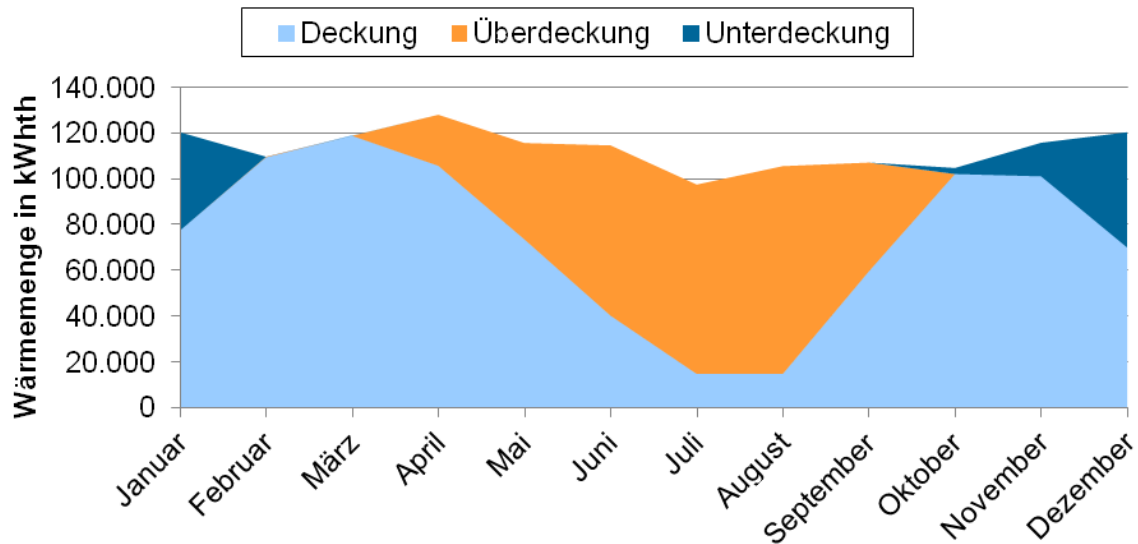


Bild 6.9: Deckung des Wärmebedarfes auf der Modellanlage

Die Darstellung verdeutlicht, dass die Wärmeüberschüsse auf der Modellanlage vornehmlich zwischen März und Oktober auftreten. Von Oktober bis Januar kann der Wärmebedarf zum Teil nicht durch die BHKW gedeckt werden. Wie im Kapitel 5 bereits erläutert, können die Wärmeüberschüsse von Kläranlagen insbesondere für die Erzeugung von Prozesswärme genutzt werden, da dafür ein kontinuierlicher und von dem Heizenergiebedarf unabhängiger Wärmebedarf besteht. Das Prinzip des Wärmeverbundes ist in Bild 6.10 dargestellt. Der Wärmeüberschuss wird über eine Wärmeleitung an einen nahegelegenen Verbraucher, dies kann z.B. ein nur im Sommer geöffnetes Freibad sein, weitergegeben.

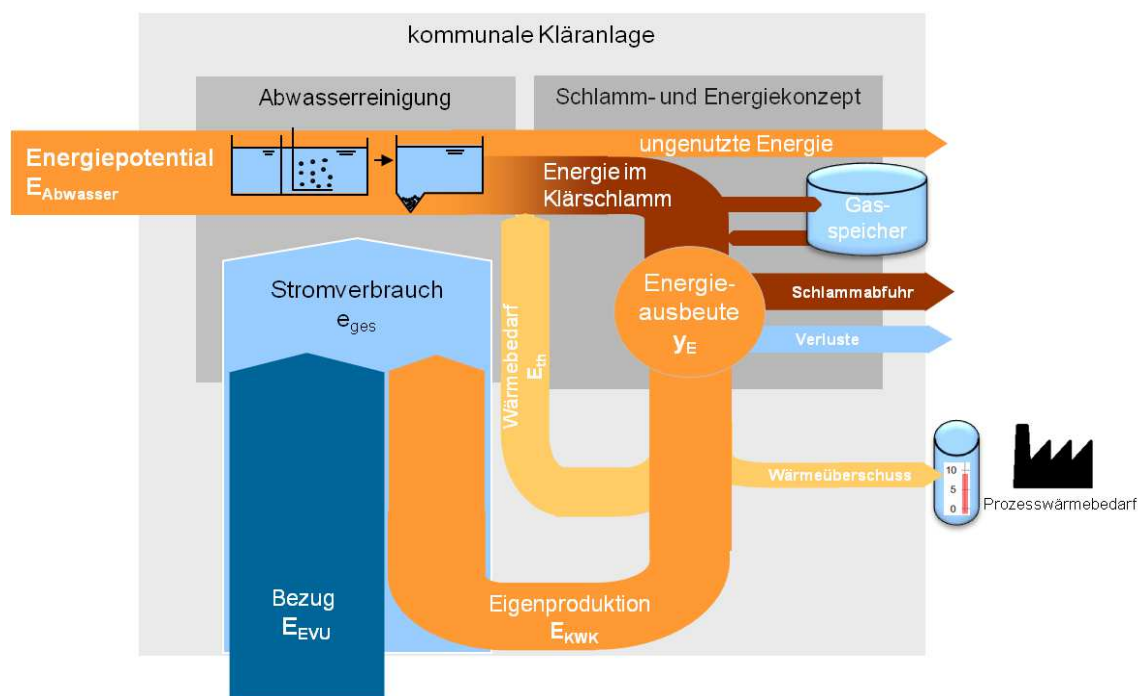


Bild 6.10: Prinzip des Wärmeverbundes

### Ergebnisse der Untersuchung

Für die Prozesswärme wurde ein kontinuierlicher Bedarf von 80 kW<sub>th</sub> beim Wärmeabnehmer angenommen. Dies entspricht in etwa der durchschnittlichen Wärmeleistung der Modellanlage in den Monaten mit Wärmeüberschuss. Es wurde ein Warmwasserpufferspeicher angenommen, der die schwankende Erzeugung ausgleicht. Aus Sicht des Wärmekunden ergibt sich die nachfolgend dargestellte Wärmebereitstellung.

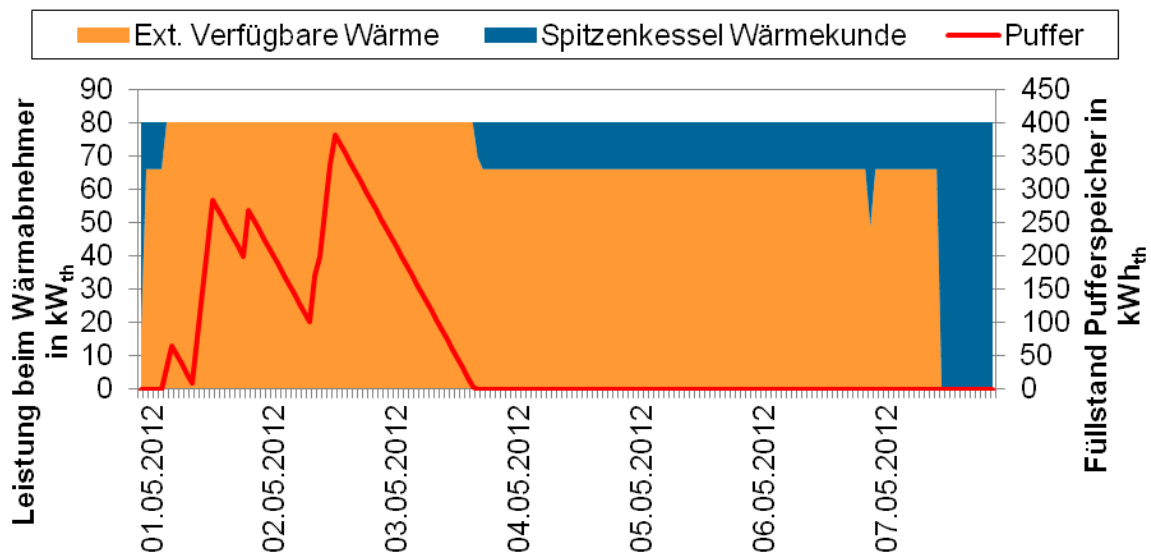


Bild 6.11: Wärmebereitstellung beim Wärmekunden

Aus Bild 6.11 geht hervor, wie die Wärme beim Wärmekunden bereitgestellt wird. Steigt die Wärmeleistung über 80 kW<sub>th</sub>, wird Wärme im Pufferspeicher eingespeichert (siehe 01.05.2012). Kann die erforderliche Leistung nicht bereitgestellt werden, wird zunächst der Puffer geleert (siehe 03.05.2012), bevor ein Spitzenlastkessel beim Wärmekunden die nötige Wärme bereitstellen muss (siehe 04.05.2012 und 07.05.2012).

Durch den dargestellten Wärmeverbund können dem Wärmeabnehmer 313.000 kWh<sub>th</sub> zur Verfügung gestellt werden. Die übrigen 83.000 kWh<sub>th</sub> sind Puffer- oder Leitungsverluste. Setzt man Investitionskosten von 230 €/m und Betriebs- und Wartungskosten von 3,3 % für die Wärmeleitung an, dann darf die Länge der Wärmeleitung maximal 450 m betragen. Bei dieser Länge entsprechen Investitions- und Betriebskosten genau den Wärmeerlösen zu 4,72 ct/kWh. Durch den Wärmeverbund kann so ein Wärmenutzungsgrad von 93,4 % erreicht werden. Aus Sicht des Wärmeabnehmers werden 44,7 % des Wärmeenergiebedarfes durch die Nahwärme gedeckt. Es ergeben sich vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 67,7 t/a.

## **6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zu Verbundkonzepten**

Bei allen untersuchten Verbundkonzepten konnte eine Steigerung des Eigenversorgungsgrades und/oder des Energienutzungsgrades festgestellt werden. Während durch den Regenerativverbund deutliche wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können, müssen beim Schlamm- und Wärmeverbund kurze Transportentfernungen bzw. Leitungslängen für eine Wirtschaftlichkeit vorliegen. Der Regenerativverbund kann zudem, in unterschiedlich starker Ausprägung, an fast jedem Anlagenstandort umgesetzt werden. Für den Schlamm- und Wärmeverbund müssen dagegen stets die entsprechenden Voraussetzungen, d. h. Kläranlagen mit aerober Stabilisierung oder ein passender Prozesswärmebedarf vorhanden sein. Dies dürfte nur in Ausnahmefällen erfüllt sein. Bei allen Varianten wird eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht.

## 7 Aufbau eines stationären Bilanzmodells

### 7.1 Bedeutung des Bilanzmodells

Im Zuge dieses Projekts wurde ein einfaches auf MS-Excel basierendes Programm entwickelt, welches ein stationäres Bilanzmodell der zu untersuchenden Kläranlage liefert. In Abhängigkeit der jeweiligen Randbedingungen der Kläranlage sollen mit dem Programm folgende Ziele erreicht werden:

- Darstellung einer möglichst schnell zu erstellenden einfachen stationären CSB-Bilanz, die in die Verfahrenstechnik der jeweiligen Kläranlage eingebunden wird.
- Berechnung wichtiger Kenngrößen der Kläranlage und visuelle Darstellung dieser. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung von energetischen Kenngrößen.
- Ermittlung und Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher verfahrenstechnischer und betrieblicher Randbedingungen auf die energetischen Kenngrößen der Anlage.
- Dies soll durch eine möglichst große Anzahl an vorgegebenen Auswahlmöglichkeiten gewährleistet werden
- Vergleich der anhand von Messwerten ermittelten Kennwerte mit den rechnerisch unter Verwendung gängiger Regelwerke ermittelten Referenzwerten.

In Abhängigkeit der Verfahrenstechnik und wichtiger Faktoren der Betriebstechnik ermittelt das Programm eine stationäre Bilanz des CSB-Umsatzes sowie relevante Schlamm- und Energiemengen der Kläranlage. Zur Überprüfung auf Plausibilität werden verschiedene berechnete Größen mit den tatsächlichen gemessenen Werten vergleichend dargestellt. Neben der Abbildung des tatsächlichen Zustands bietet das Programm die Möglichkeit, die durch Variation einzelner Parameter der Verfahrens- oder Betriebstechnik entstandenen Auswirkungen auf die CSB-Bilanz und die dargestellten Größen zu ermitteln. Parallel zum Ist-Zustand der Kläranlage können bis zu fünf verschiedene Varianten zeitgleich berechnet und gegenübergestellt werden. Dadurch kann der Einfluss einzelner Parameter auf die energetischen Größen ermittelt werden.

Das Programm wurde im Wesentlichen für den Betreiber einer Kläranlage konzipiert. Bei der Entwicklung des Modells wurde daher auf eine gängige, normalerweise bereits vorhandene Software (MS Excel) zurückgegriffen. Ebenso wurde auf einen möglichst übersichtlichen Aufbau des Modells geachtet, um die Zugänglichkeit für die Anwender zu vereinfachen.

Das Programm eignet sich dazu einen „grobe“ Überblick über die energetische Situation einer Kläranlage zu erhalten. An dieser Stelle wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Berechnungen des Modells nicht exakt die Realität abbilden, da das Programm eine Reihe



von Vereinfachungen und Annahmen enthält. Für eine exakte Betrachtung der energetischen Situation einer Kläranlage sind weitere Berechnungen erforderlich.

## 7.2 Aufbau des Bilanzmodells

Das Programm zur schnellen Erstellung eines stationären Bilanzmodells wurde mit der Software Microsoft Excel und der Programmiersprache Visual Basic (VBA) erstellt. Diese Software bietet alle Voraussetzungen, um sowohl eine einfache Dateneingabe als auch eine strukturierte und visuell ansprechende Datenausgabe zu ermöglichen. Da MS Excel auf Kläranlagen gewöhnlich zur Datenverarbeitung genutzt wird, ist für die Anwendung des Programms keine Neuanschaffung von Software nötig. Aufgrund der unter VBA unterschiedlich zur Verfügung stehenden Codes und, um die Anwendung des Programms auch für ältere Excel Versionen zu gewährleisten, wurde jeweils eine eigene Version für Excel 2010, Excel 2007 und Excel 2003 erstellt. Diese Versionen können sich in der Dateneingabe und insbesondere der visuellen Darstellung geringfügig voneinander unterscheiden.

Aufgebaut ist das Programm in vier verschiedene Excel-Arbeitsblätter, die folgendermaßen bezeichnet werden:

- Eingabe
- Berechnungen (ausgeblendet)
- Ausgabe
- Variantenvergleich

### Arbeitsblatt „Eingabe“

Auf der linken Seite des Arbeitsblatts „**Eingabe**“ werden für die Berechnung notwendige oder ergänzende Parameter abgefragt. Neben den Zulaufparametern, sind dies insbesondere Parameter die für den Vergleich „tatsächlicher Ist-Zustand“ vs. „berechneter Ist-Zustand“ notwendig sind (vgl. Bild 7.1). Durch Eingabe der ergänzenden Parameter kann die Anzahl der durch das Modell getroffenen Annahmen verringert werden. Durch Betätigung der Schaltfläche „Eingabefläche auf Plausibilität prüfen“ werden die eingegebenen Werte geprüft. Falls diese unplausibel erscheinen werden Warnhinweise gegeben.

In die „Parameter der Kläranlage für die Berechnung“ (blau eingefärbt) werden die Jahresmittelwerte der Abwassermenge, die mittleren Zulaufkonzentrationen für CSB, AFS, TKN, NO<sub>3</sub>-N und die Größenklasse der Kläranlage eingetragen. Ergänzende Parameter die nicht unbedingt erforderlich aber für die Berechnungen hilfreich sind, sind die mittlere BSB<sub>5</sub>-Zulaufkonzentration, der Überwachungswert für Stickstoff gesamt, der Glühverlust für Primärschlamm und Überschussschlamm sowie der Abscheidegrad der Vorklärung für

verschiedene Parameter. Falls für den Abscheidegrad der Vorklärung Werte eingetragen werden, werden diese für die Berechnungen des Ist-Zustandes, aber nicht für die Berechnungen der Varianten herangezogen (s.u.).

In die „Parameter der Kläranlage für den Ergebnisvergleich“ (violett eingefärbt) können die tatsächlich gemessenen Werte für die Menge an Primärschlamm und Überschussschlamm, die Methangasproduktion, den Stromverbrauch der Kläranlage bzw. der Belüftung und die Strom- und Wärmeproduktion der Kläranlage eingetragen werden. Diese Eintragungen sind optional. Bei Eingabe erfolgt ein Vergleich der tatsächlich gemessenen Werte mit den durch das Modell berechneten Werten.

Parameter der Kläranlage für die Berechnung	Einheit	Wert
Abwassermenge	m <sup>3</sup> /d	10.000
Mittlere CSB-Konzentration; Zulauf Kläranlage	mg/l	400,0
Mittlere AFS-Konzentration; Zulauf Kläranlage	mg/l	200,0
Mittlere TKN-Konzentration; Zulauf Kläranlage	mg/l	100,0
Mittlere NO <sub>3</sub> -N-Konzentration; Zulauf Kläranlage	mg/l	0,0
Mittlere BSB <sub>5</sub> -Konzentration im Zulauf Kläranlage <sup>1)</sup>	mg/l	
Größenklasse Kläranlage		4
S <sub>anorgN,ÜW</sub> <sup>1)</sup>	mg/l	
Glühverlust Primärschlamm <sup>1)</sup>	%	
Glühverlust Überschussschlamm <sup>1)</sup>	%	
Abscheidegrad Vorklärung bzgl. CSB <sup>1)</sup>	%	
Abscheidegrad Vorklärung bzgl. AFS <sup>1)</sup>	%	
Abscheidegrad Vorklärung bzgl. TKN <sup>1)</sup>	%	
Abscheidegrad Vorklärung bzgl. BSB <sub>5</sub> <sup>1)</sup>	%	
<sup>1)</sup> keine Angaben notwendig.		
Eingabefläche auf Plausibilität prüfen		
Parameter der Kläranlage für den Ergebnisvergleich	Einheit	Wert
Primärschlamm Menge <sup>2)</sup>	kg[TS]/a	500.000
Überschussschlamm Menge <sup>2)</sup>	kg[TS]/a	500.000
Rohschlamm Menge (alternativ) <sup>2)</sup>	kg[TS]/a	
Glühverlust Rohschlamm (alternativ) <sup>2)</sup>	%	
Methangasproduktion <sup>2)</sup>	Nm <sup>3</sup> /a	100.000
Stromverbrauch Kläranlage <sup>2)</sup>	kWh <sub>el</sub> /a	1.000.000
Stromverbrauch Belüftung <sup>2)</sup>	kWh <sub>el</sub> /a	700.000
Stromproduktion Kläranlage <sup>2)</sup>	kWh <sub>el</sub> /a	500.000
Wärmeproduktion Kläranlage <sup>2)</sup>	kWh <sub>th</sub> /a	800.000
<sup>2)</sup> keine Angaben notwendig. Eingetragene Werte werden mit den errechneten Ergebnissen verglichen		

Bild 7.1: Linke Seite des Arbeitsblatts „Eingabe“

Auf der rechten Seite des Arbeitsblatts „Eingabe“ (vgl. Bild 7.1) werden die „Parameter bezüglich Verfahrens- und Betriebstechnik“ der Kläranlage abgefragt. Hierzu gehören die Parameter der biologischen Stufe, der gegebenenfalls vorhandenen Vorklärung und der gegebenenfalls vorhandenen Schlammbehandlung inklusive Gasnutzung.

Parameter bezüglich Verfahrens- und Betriebstechnik							
		Ist-Zustand	Varianten				
			1	2	3	4	5
<b>Verfahrenstechnik</b>							
einstufige Belebung	ja/nein	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
zweistufige Belebung (z.B. A/B-Anlage)	ja/nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Vorklärung</b>							
Aufenthaltszeit	h	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Volumen	m³	400					
<b>Biologie</b>							
Schlammalter (nur für einstufige Anlagen)	Tage	15					
Sauerstoffgehalt Belebungsbecken*	mg/l	1,5					
Alpha-Wert*							
Sauerstoffertrag*	kg [O <sub>2</sub> ]/kWh						
Reinigungsziel (Kohlenstoff/Nährstoffelimination)		Kohlenstoffelim. und Stickstoffelim.					
Temperatur Belebung*	°C	121					
<b>Anaerobe Schlammstabilisierung</b>							
	ja/nein	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Volumen Faulbehälter gesamt	m³	4500					
Temperatur Faulbehälter*	°C	35					
<b>Trübwasserbehandlung</b>							
Anteil Stickstofffracht Trübwasser an Stickstofffracht im Zulauf*	%						
klassisches SBR-Verfahren (Nitrifikation/Denitrifikation)	ja/nein	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stickstoffelimination*	%	12					
Deammonifikation	ja/nein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stickstoffelimination*	%						
<b>Desintegration</b>							
Verbesserung der spezifischen anaeroben Abbaubarkeit	%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Eindickung</b>							
TS Gehalt Rohschlamm Zulauf Faulturn (nach evtl. Eindickung)	%	4,5					
<b>Co-Vergärung</b>							
Art 1	ja/nein	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Menge 1	m³/d	3					
TS Gehalt 1*	%						
Art 2							
Menge 2	m³/d						
TS Gehalt 2*	%						
<b>Gasnutzungstechnologie</b>							
Wirkungsgrad elektrisch	%	32					
Wirkungsgrad thermisch	%						
* wenn möglich mitangeben. Bei Nicht-Angabe werden Annahmen getroffen.							
Alle Varianten berechnen		Ist-Zustand berechnen	Variante 1 berechnen	Variante 2 berechnen	Variante 3 berechnen	Variante 4 berechnen	Variante 5 berechnen
Alle Varianten löschen		Ist-Zustand löschen	Variante 1 löschen	Variante 2 löschen	Variante 3 löschen	Variante 4 löschen	Variante 5 löschen
Variantenvergleich löschen		Variantenvergleich					

Bild 7.2: Rechte Seite des Arbeitsblatts „Eingabe“

Falls eine Vorklärung ausgewählt wird, kann der Abscheidegrad der Vorklärung entweder durch die Eingabe der Aufenthaltszeit oder durch das Volumen der Vorklärung berechnet werden. Falls sowohl für die Aufenthaltszeit und das Volumen Werte eingetragen werden wird mit der Aufenthaltszeit gerechnet. Für den Ist-Zustand kann der Abscheidegrad der Vorklärung in „Parameter der Kläranlage für die Berechnung“ auch separat eingetragen werden (s.o.).

Durch die Eingabe ergänzender Parameter (mit \* gekennzeichnet) kann auch hier die Anzahl der durch das Modell getroffenen Annahmen verringert werden. Falls keine Eintragungen erfolgen werden vom Modell für die ergänzenden Parameter die unter Tabelle 7.1 aufgelisteten Annahmen herangezogen.

Tabelle 7.1: Annahmen für die ergänzenden Parameter

Ergänzender Parameter	Einheit	Annahme
Mittlere BSB5-Konzentration	[mg/l]	0,5 * CCSB
Glühverlust Primärschlamm	[%]	67
Glühverlust Überschussschlamm	[%]	In Abhängigkeit des Schlammalters zwischen 65 und 75
Sauerstoffgehalt Belebungsbecken	[mg/l]	2,0
Alpha-Wert	[-]	0,7
Sauerstoffertrag	[kgO <sub>2</sub> /d]	3,0
Temperatur Biologie	[°C]	15
Temperatur Faulung	[°C]	35
Anteil Stickstofffracht Trübwasser an Stickstofffracht Zulauf	[%]	15
Stickstoffelimination klassisches SBR-Verfahren (Nitrifikation/Denitrifikation)	[%]	90
Stickstoffelimination Deammonifikation	[%]	80

Neben der Abbildung des Ist-Zustands besteht die Möglichkeit, die Randbedingungen der Kläranlage in den Varianten 1 bis 5 zu variieren.

Mit verschiedenen Schaltflächen können die Berechnungen für den Ist-Zustand oder die Varianten entweder einzeln oder gemeinsam gestartet und dargestellt werden:

- Ist Zustand berechnen: startet die Berechnungen für den Ist-Zustand. Die Ergebnisse werden im Arbeitsblatt „Ausgabe“ dargestellt.
- Variante 1 etc. berechnen: startet jeweils die Berechnungen für die Varianten 1 bis 5. Die Ergebnisse werden im Arbeitsblatt „Ausgabe“ dargestellt.
- Alle Varianten berechnen: startet die Berechnungen für den Ist-Zustand und für alle Varianten. Die Ergebnisse werden im Arbeitsblatt „Ausgabe“ dargestellt.
- Variantenvergleich: Die Ergebnisse aller Varianten werden im Arbeitsblatt „Variantenvergleich“ vergleichend dargestellt.

Bei Betätigung einer dieser Schaltflächen werden die jeweiligen Eingaben geprüft. Eine Berechnung wird nur durchgeführt, wenn die Eingabewerte plausibel erscheinen. Andernfalls werden Warnhinweise gegeben.

Durch weitere Schaltflächen können die Darstellungen gelöscht werden:

- Ist Zustand oder Varianten löschen:  
Durch Betätigung einer der Schaltflächen (Ist Zustand löschen; Variante 1 etc. löschen; Alle Varianten löschen) werden die jeweiligen Darstellungen im Arbeitsblatt „**Ausgabe**“ gelöscht. Dies kann für eine übersichtliche Anwendung des Programms hilfreich sein.
- Variantenvergleich löschen:  
Die Darstellungen im Arbeitsblatt „**Variantenvergleich**“ werden gelöscht.

### **Arbeitsblatt „Berechnungen“**

Die von der Software durchgeführten Berechnungen werden in einem eigenen, für den Anwender nicht ersichtlichen Arbeitsblatt „**Berechnungen**“ durchgeführt. Im Folgenden sind die wichtigsten Berechnungen und die dafür verwendete Literatur aufgeführt:

- Energieproduktion (ATV-DVWK, 2001; DWA, 2009; Imhoff K. und Imhoff K.R., 1976)
  - Schlammanfall (ATV-DVWK, 2001; ATV-DVWK, 2003; Jardin, 2012)
  - Co-Vergärung (DWA, 2009)
  - Desintegration (vgl. Kapitel Desintegration)
  - Gasproduktion (Imhoff K. und Imhoff K.R., 1976)
- Energiebedarf für Belüftung (ATV-131)
  - Sauerstoffbedarf (ATV-DVWK, 2001; Jardin, 2012)
  - Deammonifikation (vgl. Kapitel Deammonifikation)
- CSB-Bilanz (größtenteils nach ATV-DVWK, 2001)

Die auf der Kläranlage produzierte thermische und elektrische Energie resultiert aus dem Gasanfall und der verwendeten/angesetzten Technologie zur Klärgasnutzung. Der Gasanfall kann aus dem Schlammanfall der Kläranlage, einer gegebenenfalls eingesetzten Co-Vergärung, einer gegebenenfalls eingesetzten Desintegration und den Randbedingungen zur Faulung (Volumen, Temperatur) berechnet werden.

Die für die Belüftung benötigte Energie kann über den ermittelten Sauerstoffbedarf berechnet werden. Berücksichtigt werden muss eine gegebenenfalls eingesetzte Deammonifikation, welche eine Verminderung der benötigten Sauerstoffmenge mit sich bringt.

Die Berechnung des gesamten Energieverbrauchs der Kläranlage wäre nur in Verbindung mit zahlreichen Annahmen möglich, welche zu einer großen prozentualen Abweichung zum tatsächlichen gesamten Energieverbrauch führen könnten. Daher wurde auf eine Berechnung des gesamten Energieverbrauchs verzichtet.

Die Berechnung der CSB-Werte zur Erstellung der CSB-Bilanz erfolgt größtenteils gemäß ATV-DVWK (2001). Ergänzend wurden Ansätze nach ATV-DVWK (2003), DWA (2009) sowie Imhoff K. und Imhoff K.R. (1976) herangezogen.

### **Arbeitsblatt „Ausgabe“**

Nach Betätigung der entsprechenden Schaltfläche im Arbeitsblatt „Eingabe“ werden die jeweiligen wichtigsten Ergebnisse durch VBA im Arbeitsblatt „Ausgabe“ dargestellt. Sowohl für den Ist-Zustand als auch für die Varianten 1 bis 5 kann folgendes gezeigt werden:

- Abbildung der CSB-Bilanz inkl. der Verfahrenstechnik der jeweiligen Kläranlage
- Diagramm der Strombetrachtung in kWh/a
- Diagramm der Strombetrachtung spezifisch in kWh/(E\*a)
- Diagramm der Wärmeproduktion spezifisch in kWh/(E\*a)
- Diagramm der Schlambetrachtung in kg[TS]/Tag
- Tabelle wichtiger Kennzahlen (u.a.: angeschlossene Einwohnerwerte, Raumbelastung Faulbehälter, Aufenthaltszeit Faulbehälter, C/N-Verhältnis Zulauf Biologie)
- Anmerkungen: In Abhängigkeit der jeweiligen Randbedingungen der Kläranlage und der resultierenden Ergebnisse der Berechnungen werden allgemeine Hinweise gegeben.

### **Arbeitsblatt „Variantenvergleich“**

Im Arbeitsblatt „Variantenvergleich“ werden die berechneten Kenngrößen der einzelnen Varianten und des Ist-Zustands vergleichend gegenübergestellt. Somit können Auswirkungen verschiedener Randbedingungen der Varianten „auf einen Blick“ ersichtlich gemacht werden. In jeweils einem Diagramm werden die Stromproduktion, der Strombedarf für die Belüftung, die Wärmeproduktion, der Überschussschlammanfall und die Methanproduktion verglichen. In einer Tabelle werden weitere wichtige Kenngrößen vergleichend dargestellt.

### 7.3 Beispielhafte Darstellung

Anhand von drei Beispielen wird die Anwendung des Programms zur Erstellung eines Bilanzmodells demonstriert. Hierzu wurden drei reale Kläranlagen, welche sich alle in Nordrhein-Westfalen befinden, herangezogen. Alle drei Kläranlagen verfügen über eine anaerobe Schlammstabilisierung und ein Blockheizkraftwerk zur Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie aus dem anfallenden Klärgas. Im Folgenden werden die mit dem Programm erzielten Ergebnisse für jede Kläranlage aufgeführt.

#### 7.3.1 Kläranlage A:

In Tabelle 7.2 sind die wesentlichen für das Programm verwendeten Eingangsparameter des Jahres 2012 für die Kläranlage A aufgeführt. Die vom Programm erstellte CSB-Bilanz, welche in die Verfahrenstechnik der Kläranlage A integriert wird, ist in Bild 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.2: Ausgangsparameter der Kläranlage A für das Jahr 2012 (Mittelwerte)

Parameter	Einheit	Wert
Abwassermenge	[m <sup>3</sup> /d]	9.890
Mittlere CSB-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	533
Mittlere AFS-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	311 <sup>1)</sup>
Mittlere TKN-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	56
Mittlere NO <sub>3</sub> -N-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	0 <sup>2)</sup>
Ausbaugröße Kläranlage	[EW]	35.000
Glühverlust Überschussschlamm	[%]	69,4
Methangasproduktion	[Nm <sup>3</sup> /a]	173.668
Stromverbrauch Kläranlage	[kWh/a]	1.138.422
Stromproduktion Kläranlage	[kWh/a]	335.832
Volumen Vorklärung	[m <sup>3</sup> ]	478
Schlammalter Biologie	[d]	22,6
Sauerstoffgehalt Belebungsbecken	[mg/l]	0,86
Temperatur Biologie	[°C]	13,9
Volumen Faulbehälter	[m <sup>3</sup> ]	1.600
Temperatur Faulbehälter	[°C]	38
Trockensubstanzgehalt Rohschlamm	[%]	4,9
Gasnutzungstechnologie Wirkungsgrad elektrisch	[%]	28
Gasnutzungstechnologie Wirkungsgrad thermisch	[%]	58

<sup>1)</sup>AFS wird im Zulauf nicht gemessen; Die AFS-Konzentration im Zulauf wird über die CSB-Konzentration und Tabelle 1 aus ATV-DVWK (2001) abgeschätzt.

<sup>2)</sup>NO<sub>3</sub>-N wird im Zulauf nicht gemessen; Nach Rücksprache mit dem Betreiber befindet sich jedoch kein Nitrat im Zulauf

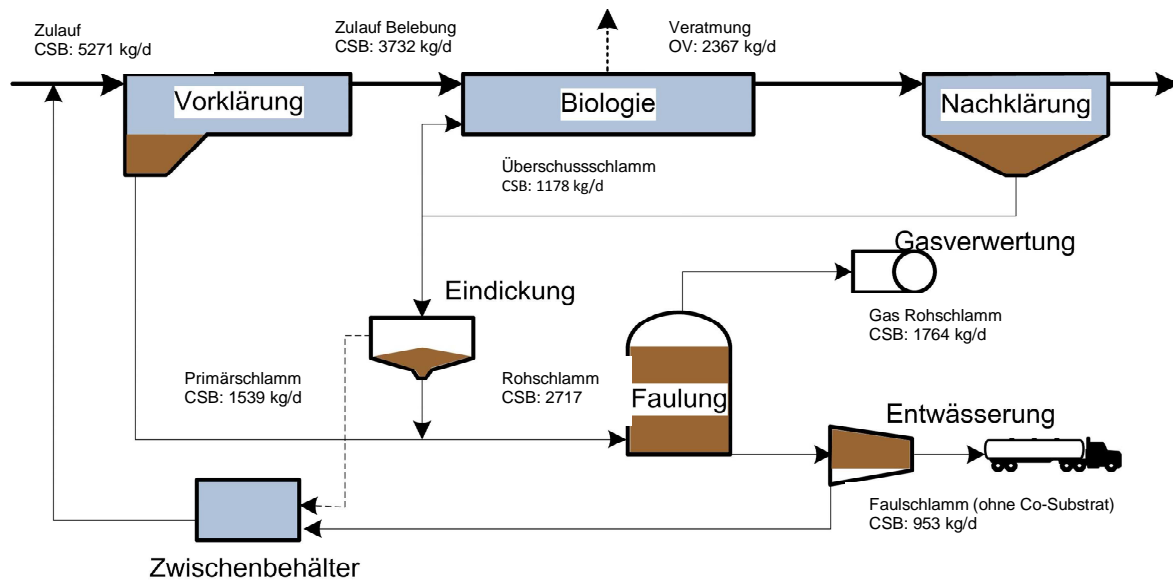


Bild 7.3: CSB-Bilanz der Kläranlage A

Nach der Modellberechnung werden von der mittleren CSB-Fracht im Zulauf von 5.271 kg/d 2.367 kg/d in der Biologie veratmet, während 2.717 kg/d als Rohschlamm der Faulung zugeführt werden. Für die Gasverwertung steht eine umgerechnete CSB-Fracht von 1.764 kg/d zur Verfügung. Damit werden etwa 33 % der organischen Verschmutzung im Zulauf in den Energieträger Methan umgewandelt. In Tabelle 7.3 werden die vom Programm berechneten wichtigsten Kennzahlen der Kläranlage für den Ist-Zustand dargestellt und soweit vorhanden mit dem tatsächlichen Ist-Zustand verglichen.

Tabelle 7.3: Kennzahlen der Kläranlage A

Parameter	Einheit	Ist-Zustand tatsächlich	Ist-Zustand berechnet
angeschlossene EW	[E]	43.928	43.928
Stromverbrauch Kläranlage	[kWh/(E*a)]	26	-
Stromverbrauch Belüftung	[kWh/(E*a)]	-	14
Stromproduktion Kläranlage	[kWh/(E*a)]	8	14
Wärmeproduktion	[kWh/(E*a)]	-	30
ÜS-Anfall	[g/(E*d)]	67*	29
PS-Anfall	[g/(E*d)]		40
Methangasmenge	[IN/(E*d)]	11	14
Raumbelastung Faulbehälter	[kg[oTS]/(m <sup>3</sup> *d)]	1,2	1,3
Aufenthaltszeit Faulbehälter	[d]	27	26
CSB/Nges-Verhältnis Zulauf Biologie (inkl. Trübwasser)	[-]	-	6,8

\*:in den Faulbehälter zugegebene Rohschlammmenge



Der tatsächliche spezifische Stromverbrauch auf der Kläranlage A liegt mit  $26 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$  zwischen Zielwert ( $18 \text{ kWh}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ ) und Toleranzwert ( $30 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$ ) nach Haberkern et al., 2006 für Anlagen der Größenklasse 4. Der Stromverbrauch der gesamten Kläranlage wird nicht berechnet. Jedoch wird der Stromverbrauch für die Belüftung berechnet (vgl. Kapitel 7.2). Der Anteil des berechneten Stromverbrauchs Belüftung zum tatsächlichen Stromverbrauch gesamt beträgt 54 %. Dies entspricht durchaus einem gängigen Anteil des Energiebedarfs der Belüftung im Verhältnis zum Gesamtenergiebedarf. Daher kann vermutet werden, dass der tatsächliche Stromverbrauch für die Belüftung ähnlich hoch ist wie der berechnete. Die durch das Programm berechnete Stromproduktion der Kläranlage liegt mit  $14 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$  etwa 75 % höher als die tatsächliche Stromproduktion der Kläranlage. Dies ist insofern überraschend, da die berechnete Methangasproduktion „nur“ knapp 30 % über der tatsächlichen Methangasproduktion liegt. Es lässt sich daher schnell erkennen, dass der angegebene elektrische Wirkungsgrad der Gasnutzungstechnologie (vgl. Tabelle 7.2) deutlich zu hoch ist. Falls das gesamte anfallende Gas im BHKW genutzt wird, liegt der elektrische Wirkungsgrad bei nur 20 %. Gegebenenfalls resultiert die Abweichung jedoch auch daraus, dass ein Teil des anfallenden Gases in einem separaten Heizkessel genutzt oder abgefackelt wird.

Da keine Daten für die tatsächlich anfallenden Schlammengen vorhanden sind, kann nicht abschließend geklärt werden, warum die tatsächliche Methangasproduktion mit  $11 \text{ l}/(\text{E} \cdot \text{d})$  relativ gering ist. Sowohl die berechnete Raumbelastung im Faulbehälter als auch die berechnete Aufenthaltszeit im Faulbehälter entsprechen gängigen Werten.

Da der Anteil der Stickstofffracht im Trübwasser an der gesamten Stickstofffracht nicht angegeben wurde, wurde im Programm ein Anteil von 15 % angenommen (vgl. Kapitel 7.2). Damit errechnet sich das  $\text{CSB}/\text{N}_{\text{ges}}$ -Verhältnis im Zulauf zur Biologie zu 6,8. Nach Roth (2007) ist ein Verhältnis von  $\text{CSB}:\text{N}_{\text{ges}} < 7$  im Zulauf zur Biologie ungünstig und kann zu erhöhten Nitratgehalten im Ablauf führen. Das Modell zeigt damit für diesen Parameter einen eventuellen Handlungsbedarf auf der Kläranlage auf.

### 7.3.2 Kläranlage B:

In Tabelle 7.4 sind die wesentlichen für das Programm verwendeten Eingangsparmeter des Jahres 2011 für die Kläranlage B aufgeführt. Die vom Programm erstellte CSB-Bilanz, welche in die Verfahrenstechnik der Kläranlage B integriert wird, ist in Bild 7.4 dargestellt.

Tabelle 7.4: Ausgangsparmeter der Kläranlage B für das Jahr 2011 (Mittelwerte)

Parameter	Einheit	Wert
Abwassermenge	[m <sup>3</sup> /d]	17.013
Mittlere CSB-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	366
Mittlere AFS-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	213 <sup>1)</sup>
Mittlere TKN-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	34,6
Mittlere NO <sub>3</sub> -N-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	0 <sup>2)</sup>
Mittlere BSB <sub>5</sub> -Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	117,1
Ausbaugröße Kläranlage	[EW]	48.000
Primärschlamm Menge	[kg[TS]/d]	421.000
Überschussschlamm Menge	[kg[TS]/d]	607.000
Methangasproduktion	[Nm <sup>3</sup> /a]	221.905
Stromverbrauch Kläranlage	[kWh/a]	1.886.382
Stromverbrauch Belüftung	[kWh/a]	848.872
Stromproduktion Kläranlage	[kWh/a]	679.836
Volumen Vorklärung	[m <sup>3</sup> ]	690
Schlammalter Biologie	[d]	29
Temperatur Biologie	[°C]	12,7
Volumen Faulbehälter	[m <sup>3</sup> ]	3.820
Temperatur Faulbehälter	[°C]	37
Trockensubstanzgehalt Rohschlamm	[%]	4,2
Gasnutzungstechnologie Wirkungsgrad elektrisch	[%]	32

<sup>1)</sup>AFS wird im Zulauf nicht gemessen; Die AFS-Konzentration im Zulauf wird über die CSB-Konzentration und Tabelle 1 aus ATV-DVWK (2001) abgeschätzt.

<sup>2)</sup>NO<sub>3</sub>-N wird im Zulauf nicht gemessen; wird mit 0 mg/l angenommen

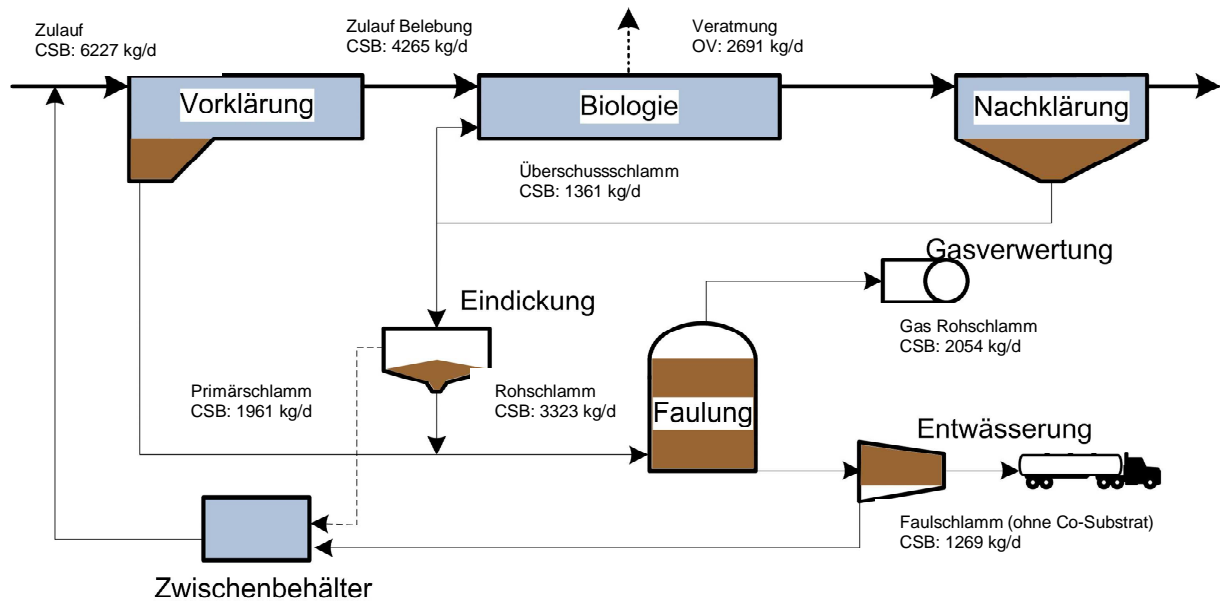


Bild 7.4: CSB-Bilanz der Kläranlage B

Nach der Modellberechnung werden von der mittleren CSB-Fracht im Zulauf von 6.227 kg/d 2.691 kg/d in der Biologie veratmet, während 3.223 kg/d als Rohschlamm der Faulung zugeführt werden. Für die Gasverwertung steht eine umgerechnete CSB-Fracht von 2.054 kg/d zur Verfügung. Damit werden etwa 33 % der organischen Verschmutzung im Zulauf in den Energieträger Methan umgewandelt. In Tabelle 7.5 werden die vom Programm berechneten wichtigsten Kennzahlen der Kläranlage B für den Ist-Zustand dargestellt und soweit vorhanden mit dem tatsächlichen Ist-Zustand verglichen.

Tabelle 7.5: Kennzahlen der Kläranlage B

Parameter	Einheit	Ist-Zustand tatsächlich	Ist-Zustand berechnet
angeschlossene EW	[E]	51.890	51.890
Stromverbrauch Kläranlage	[kWh/(E*a)]	36	
Stromverbrauch Belüftung	[kWh/(E*a)]	16	18
Stromproduktion Kläranlage	[kWh/(E*a)]	13	16
ÜS-Anfall	[g/(E*d)]	32	31
PS-Anfall	[g/(E*d)]	22	35
Methangasmenge	[l <sub>N</sub> /(E*d)]	12	14
Raumbelastung Faulbehälter	[kg[oTS]/(m <sup>3</sup> *d)]	0,5	0,6
Aufenthaltszeit Faulbehälter	[d]	57	48
CSB/N <sub>ges</sub> -Verhältnis Zulauf Biologie (inkl. Trübwasser)	[-]		6,9

---

Der tatsächliche Stromverbrauch der Kläranlage liegt mit 36 kWh/(E\*a) deutlich über dem Toleranzwert nach Haberkern et al., 2006 von 30 kWh/(E\*a) für Kläranlagen der Größenklasse 4. Der tatsächliche Stromverbrauch für die Belüftung ist mit 16 kWh/(E\*a) gleich hoch wie der Toleranzwert nach Haberkern et al. (2006). Sowohl der tatsächliche Stromverbrauch für die Belüftung, die tatsächliche Stromproduktion, die tatsächlich anfallende Methangasmenge und der tatsächlich ÜS-Anfall unterscheiden sich jeweils nur geringfügig vom berechneten Wert. Der berechnete PS-Anfall liegt etwa 60 % über dem tatsächlichen PS-Anfall. Es muss hier jedoch angemerkt werden, dass die AFS-Konzentration im Zulauf, welche einen entscheidenden Einfluss auf den PS-Anfall hat, nur abgeschätzt werden konnte (vgl. Tabelle 7.4). Insgesamt kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den mit dem Programm berechneten Parametern und den tatsächlichen Parametern erzielt werden.

### 7.3.3 Kläranlage C:

In Tabelle 7.6 sind die wesentlichen für das Programm verwendeten Eingangsparameter des Jahres 2012 für die Kläranlage C aufgeführt. Die vom Programm erstellte CSB-Bilanz, welche in die Verfahrenstechnik der Kläranlage C integriert wird, ist in Bild 7.5 dargestellt.

Tabelle 7.6: Ausgangsparameter der Kläranlage C für das Jahr 2012 (Mittelwerte)

Parameter	Einheit	Wert
Abwassermenge	[m <sup>3</sup> /d]	6.871
Mittlere CSB-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	246
Mittlere AFS-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	154 <sup>1)</sup>
Mittlere TKN-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	24
Mittlere NO <sub>3</sub> -N-Konzentration; Zulauf Kläranlage	[mg/l]	0 <sup>2)</sup>
Ausbaugröße Kläranlage	[EW]	10.000
Methangasproduktion	[Nm <sup>3</sup> /a]	70.810 <sup>3)</sup>
Stromverbrauch Kläranlage	[kWh/a]	374.115
Stromproduktion Kläranlage <sup>3)</sup>	[kWh/a]	238.668
Wärmeproduktion Kläranlage <sup>3)</sup>	[kWh/a]	528.769
Volumen Vorklärung	[m <sup>3</sup> ]	341
Schlammalter Biologie	[d]	17,3
Sauerstoffgehalt Belebungsbecken	[mg/l]	1,9
Temperatur Biologie	[°C]	12,4
Volumen Faulbehälter	[m <sup>3</sup> ]	865
Temperatur Faulbehälter	[°C]	40,8
Trockensubstanzgehalt Rohschlamm	[%]	4,9
Gasnutzungstechnologie Wirkungsgrad elektrisch	[%]	28
Gasnutzungstechnologie Wirkungsgrad thermisch	[%]	58

<sup>1)</sup>AFS wird im Zulauf nicht gemessen; Die AFS-Konzentration im Zulauf wird über die CSB-Konzentration und Tabelle 1 aus ATV-DVWK (2001) abgeschätzt.

<sup>2)</sup>NO<sub>3</sub>-N wird im Zulauf nicht gemessen; Nach Rücksprache mit dem Betreiber befindet sich jedoch kein Nitrat im Zulauf

<sup>3)</sup>zusätzlich wurden noch 11.335 m<sup>3</sup> Erdgas eingesetzt

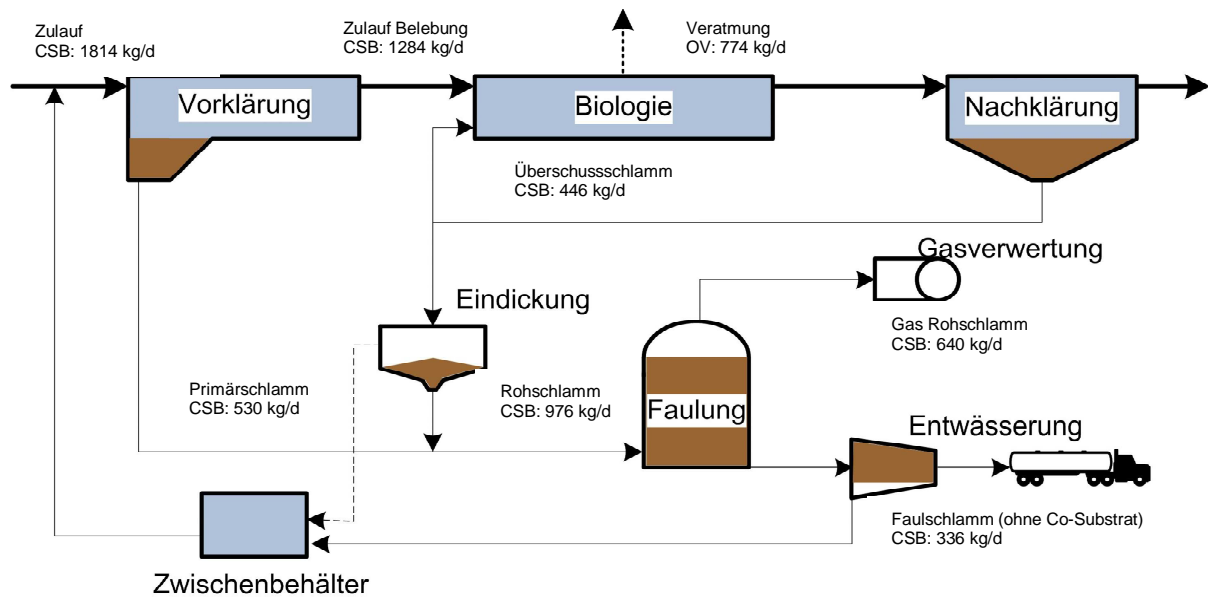


Bild 7.5: CSB-Bilanz der Kläranlage C

Nach der Modellberechnung werden von der mittleren CSB-Fracht im Zulauf von 1.814 kg/d 774 kg/d in der Biologie veratmet, während 976 kg/d als Rohschlamm der Faulung zugeführt werden. Für die Gasverwertung steht eine umgerechnete CSB-Fracht von 640 kg/d zur Verfügung. Dies bedeutet, dass 35 % der organischen Verschmutzung im Zulauf in den Energieträger Methan umgewandelt wird. In Tabelle 7.7 werden die vom Programm berechneten wichtigsten Kennzahlen der Kläranlage für den Ist-Zustand dargestellt und soweit vorhanden mit dem tatsächlichen Ist-Zustand verglichen.

Tabelle 7.7: Kennzahlen der Kläranlage C

Parameter	Einheit	Ist-Zustand tatsächlich	Ist-Zustand berechnet
angeschlossene EW	[E]	15.116	15.116
Stromverbrauch Kläranlage	[kWh/(E*a)]	25	-
Stromverbrauch Belüftung	[kWh/(E*a)]	-	17
Stromproduktion Kläranlage	[kWh/(E*a)]	16	15
Wärmeproduktion	[kWh/(E*a)]	35	31
ÜSS-Anfall	[g/(E*d)]	-	31
PS-Anfall	[g/(E*d)]	-	40
Methangasmenge	[ $\text{Nm}^3$ /(E*d)]	15	15
Raumbelastung Faulbehälter	[kg[oTS]/(m <sup>3</sup> *d)]	0,8	0,9
Aufenthaltszeit Faulbehälter	[d]	46	39
CSB/ $N_{\text{ges}}$ -Verhältnis Zulauf Biologie (inkl. Trübwasser)	[-]	-	7,5

---

Der tatsächliche spezifische Stromverbrauch der Kläranlage C liegt mit  $25 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$  zwischen Zielwert ( $18 \text{ kWh}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ ) und Toleranzwert ( $30 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$ ) nach Haberkern et al., 2006 für Anlagen der Größenklasse 4. Das Verhältnis von berechnetem Stromverbrauch für die Belüftung zum tatsächlichen Stromverbrauch der Kläranlage beträgt 68 % und liegt damit im Bereich herkömmlicher Kläranlagen. Die Abweichung zwischen den berechneten und tatsächlichen Werten für die anfallende Methangasmenge, für die Wärmeproduktion und für die Stromproduktion betragen maximal 13 %. Es kann insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung des Modells mit der tatsächlichen Kläranlage festgestellt werden. Auffällig ist die relativ geringe Raumbelastung des Faulbehälters und die relativ hohe Aufenthaltszeit im Faulbehälter, welche eine zusätzliche Zufuhr von Substraten (Co-Vergärung) in den Faulbehälter interessant macht.

### 7.3.4 Variantenbetrachtung

Wie bereits in Kapitel 7.2 beschrieben, besitzt das Programm die Möglichkeit, verschiedene Varianten der zu untersuchenden Kläranlage zeitgleich zu berechnen. Am Beispiel der Kläranlage C wird im Folgenden eine Variantenbetrachtung durchgeführt. Es werden den Randbedingungen der Kläranlage entsprechende Varianten ausgewählt. Dabei sollen zunächst die Kapazität des Faulbehälters durch Zugabe von Co-Substraten ausgenutzt werden (Variante 1 und Variante 2). Da sich durch die zusätzliche Co-Vergärung das CSB/N<sub>ges</sub>-Verhältnis im Zulauf zur Biologie durch die zusätzlichen Stickstofffrachten im Trübwasser verringern kann, soll in einer weiteren Variante (Variante 3) eine zusätzliche separate Trübwasserbehandlung untersucht werden. Alle anderen Randbedingungen sowie die Zulaufbelastungen bleiben unverändert.

Variante 1: Zusätzliche Co-Vergärung (1,5 m<sup>3</sup>/d Speiseabfälle, TS-Gehalt: 18 %)

Variante 2: Zusätzliche Co-Vergärung (1,5 m<sup>3</sup>/d Speiseabfälle, TS-Gehalt: 18 %; 6 m<sup>3</sup>/d Apfelschlempe, TS-Gehalt: 3 %)

Variante 3: Zusätzliche Co-Vergärung (2 m<sup>3</sup>/d Speiseabfälle, TS-Gehalt: 18 %; 6 m<sup>3</sup>/d Apfelschlempe, TS-Gehalt: 3 %) und separate Trübwasserbehandlung (Nitrifikation/Denitrifikation)

Das Programm rechnet für alle Varianten die entsprechenden CSB-Bilanzen und Säulendiagramme. Auf die Darstellung der Diagramme wird an dieser Stelle verzichtet, in Tabelle 7.8 werden aber die wichtigsten Kennzahlen der Varianten zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 7.8: Kennzahlen der Variantenbetrachtung

Parameter	Einheit	Ist-Zustand	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Stromverbrauch Belüftung	[kWh/(E*a)]	17	18	18	18
Stromproduktion Kläranlage	[kWh/(E*a)]	15	24	28	28
Wärmeproduktion	[kWh/(E*a)]	31	51	59	59
ÜS-Schlammanfall	[g/(E*d)]	31	31	31	31
PS-Schlammanfall	[g/(E*d)]	40	40	40	40
Methangasmenge	[l <sub>N</sub> /(E*d)]	15	24	28	28
Raumbelastung Faulbehälter	[kg[oTS]/(m <sup>3</sup> *d)]	0,9	1,2	1,4	1,4
Aufenthaltszeit Faulbehälter	[d]	39	37	29	29
CSB/N <sub>ges</sub> -Verhältnis Zulauf Biologie (inkl. Trübwasser)	[-]	7,5	7,1	6,9	8,4



Durch die Zugabe von 2 m<sup>3</sup>/d Speiseabfällen (Variante 1) kann die produzierte Methangasmenge von 15 l/(E\*d) auf 24 l/(E\*d) erhöht werden. Die Raumbelastung des Faulbehälters steigt auf 1,2 kg[oTS]/(m<sup>3</sup>\*d) deutlich an, während die Aufenthaltszeit des Faulbehälters aufgrund des hohen TS-Gehaltes der Speiseabfälle nur geringfügig auf 37 Tage abnimmt. Durch eine weitere Zugabe von 6 m<sup>3</sup> Apfelschlempe (Variante 2) kann die produzierte Methangasmenge auf 28 l/(E\*d) erhöht werden. Die Raumbelastung steigt auf 1,4 kg[oTS]/(m<sup>3</sup>\*d).

Die Aufenthaltszeit im Faulbehälter nimmt, aufgrund des geringen Trockensubstanz Gehaltes der Apfelschlempe, deutlich auf 29 Tage ab. Nach DWA (2009) sollte die Faulzeit für Kläranlagen < 50.000 EW zwischen 20 und 30 Tagen liegen. Übliche Raumbelastung liegen nach der gleichen Literatur bei etwa 1,5 kg[oTS]/(m<sup>3</sup>\*d). Sowohl die Faulzeit als auch die Raumbelastung der Variante 2 liegen in diesem Bereich.

Das CSB/N<sub>ges</sub>-Verhältnis im Zulauf zur Biologie ist schon im berechneten Ist-Zustand mit 7,5 relativ gering. Durch die Zugabe von Co-Substraten nimmt dieses Verhältnis in Variante 1 auf 7,1 ab und sinkt für Variante 2 sogar unter das von Roth (2007) angegebene kritische Verhältnis von 7,0. Durch eine separate Trübwasserbehandlung (Variante 3) kann dieses Verhältnis trotz der betrachteten Co-Vergärung auf 8,4 angehoben werden.

### 7.3.5 Bewertung des stationären Bilanzmodells

Die beispielhafte Darstellung zeigt, dass das Programm schnelle Erkenntnisse bezüglich der energetischen Situation einer Kläranlage liefern kann. Es lassen sich teils sehr gute Übereinstimmungen der berechneten mit den tatsächlichen Kenngrößen erzielen (vgl. Kläranlage B und Kläranlage C). Bei großen Unterschieden zwischen den tatsächlichen und den berechneten Kenngrößen sind gegebenenfalls Optimierungsmaßnahmen auf der Kläranlage angebracht, da die berechneten Werte größtenteils auf Richtwerten und Idealwerten aus der Literatur beruhen (bspw. Energieverbrauch für Belüftung). Durch die Variantenbetrachtung kann der Einfluss und die Signifikanz verschiedener Randbedingungen auf die berechneten Kenngrößen schnell und einfach ermittelt und dargestellt werden. Das Programm kann jedoch nur einen „grobe“ Überblick über die energetische Situation einer Kläranlage liefern. Für eine Fortführung der Betrachtung bzw. für die Planung sind daher weitere umfassendere Untersuchungen und Berechnungen notwendig.

## 8 Potentialabschätzung NRW

In Nordrhein-Westfalen werden 634 kommunale Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von insgesamt 35,0 Mio. EW betrieben. Ungefähr 52 % dieser Ausbaugröße (176 Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung) wurde durch die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführte Datenabfrage erfasst und hinsichtlich der jeweiligen Energieausbeute und der Effizienz der Klärgasnutzung ausgewertet. Aufbauend auf den abgeleiteten Referenzwerten für Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung wird das Optimierungspotential durch die in den Kapiteln 3.3 bis 6 beschriebenen Maßnahmen zur Steigerung der Energieausbeute für ganz Nordrhein-Westfalen abgeschätzt. In einem ersten Schritt wird der Ist-Zustand NRW berechnet. Anschließend werden sechs verschiedene Szenarien betrachtet, für die das jeweilige Optimierungspotential den notwendigen Investitionen gegenübergestellt wird.

Tabelle 8.1: Betrachtete Szenarien

Szenario	Stichwort	Beschreibung
Ist-Zustand	IST	Ist-Zustand in NRW als Basis für den Szenarienvergleich
Szenario 1	Faulung	Umstellen von simultaner aerober auf getrennte anaerobe Stabilisierung
Szenario 2	Primärschlamm	Primärschlammmentnahme durch vergrößerte Vorklärung oder Vorfällung steigern
Szenario 3	Schlammalter	Schlammalter in der Belebung senken, um aerobe Stabilisierung zu begrenzen
Szenario 4	Nachrüsten	Auf Kläranlagen ohne Faulgasverstromung KWK-Aggregat nachrüsten
Szenario 5	Repowering	Durch Modernisierung die Wirkungsgrade der KWK-Aggregate erhöhen
Szenario 6	Verbund	Freie Faulbehälterkapazitäten für Ausfällung externer Schlämme/Co-Substrate nutzen

Für die in Kapitel 4 betrachteten Kläranlagenkategorien wurde jeweils eine Referenzkläranlage gewählt (Mediankläranlage nach Tabelle 3.4). Für diese Referenzkläranlagen wurden die notwendigen Investitionen und das erzielbare Optimierungspotential bestimmt und anschließend auf alle betreffenden Kläranlagen dieser Kategorie in NRW hochgerechnet. Um die Auswirkungen der verfahrenstechnischen Anpassung auf die Kläranlage (Schlammfall, Faulgasfall, Belüftungsenergie, etc.) abzuschätzen, wurde für die Szenarien 2, 3 und 6 das in Kapitel 7 beschriebene stationäre Bilanzmodell verwendet. Die weiteren Ansätze zur Berechnung der Szenarien sind in Tabelle 8.2 aufgeführt.

Tabelle 8.2: Verwendete Ansätze zur Szenarienberechnung

Beschreibung	Wert bzw. Formel	Quelle
Preis für Stromfremdbezug	18,0 Ct/kWh	Annahme
Betriebsstunden BHKW pro Jahr	7.000 Bh/a	Annahme
KWK genutzte Prozesswärme	85 %	Annahme
CO <sub>2</sub> -Ausstoß Strombezug	597 g CO <sub>2</sub> /kWh <sub>el</sub>	Ökoinstitut, 2010
CO <sub>2</sub> -Ausstoß Wärme (Erdgas)	250 g CO <sub>2</sub> /kWh <sub>th</sub>	Ökoinstitut, 2010
CO <sub>2</sub> -Ausstoß Klärschlammtransport	93 g CO <sub>2</sub> /tkm	LfU, 2011
spez. Kosten für die Verwertung bzw. Entsorgung von Klärschlamm in NRW (inkl. Transport)	255 €/t TR	abgeleitet aus: UBA, 2012b
spez. Kosten für Transport in Abh. vom Transportweg	$2,5424 \cdot x^{-0,5392}$ €/t OS/km	LU, 2013
spez. Investitionskosten für die Umstellung auf Faulung in Abh. von EW-Belastung	$81.098 \cdot x^{-0,684}$ €/EW	Gretzschel et al., 2010
spez. Kapitalkosten für die Umstellung auf Faulung in Abh. von EW-Belastung	$5.610,9 \cdot x^{-0,694}$ €/EW/a	Gretzschel et al., 2010
spez. Betriebskosteneinsparung bei Umstellung auf Faulung in Abh. von EW-Belastung	$1,13E^{-13} \cdot x^3 - 1,18E^{-8} \cdot x^2 + 3,9E^{-4} \cdot x + 1,7839$ €/EW/a	Gretzschel et al., 2010
spez. Investitionskosten für den Bau einer Vorklärung in Abh. des Vorklärvolumens	$22.642 \cdot x^{-0,551}$ €/m <sup>3</sup>	abgeleitet aus: Gretzschel et al., 2010
elektrischer Wirkungsgrad eines KWK-Aggregates in Abh. der Leistung	$25,459 \cdot x^{0,0745}$ %	siehe Kapitel 5
spez. Investitionskosten für die Installation eines KWK-Aggregates in Abh. der Leistung	bis 100 kW <sub>el</sub> : $56.845 \cdot x^{-0,651}$ über 100 kW <sub>el</sub> : $44.161 \cdot x^{-0,590}$ €/kW <sub>el</sub>	siehe Kapitel 5
spez. Kosten für einen Vollwartungsvertrag eines KWK-Aggregates in Abh. der Leistung	bis 100 kW <sub>el</sub> : $26,137 \cdot x^{-0,5702}$ über 100 kW <sub>el</sub> : $17,053 \cdot x^{-0,4782}$ Ct/kWh <sub>el</sub>	nach ASUE, 2011

## 8.1 Ist-Zustand NRW

Die im Rahmen der Datenumfrage erfassten 176 Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung stellen mit einer Ausbaugröße von insgesamt 18,3 Mio. EW rund 58 % der Ausbaugröße aller mit separater Klärschlammfaulung betriebenen Kläranlagen in NRW dar (31,6 Mio. EW). Für den Ist-Zustand der anaeroben Schlammstabilisierung in NRW werden die ausgewerteten Daten auf die Gesamtausbaugröße im Bundesland hochgerechnet. Die Hochrechnung wurde für jede der vier EW-Kategorien in Abhängigkeit des jeweiligen Verhältnisses von ausgewerteten zu in NRW vorhandenen Kläranlagen mit Faulung durchgeführt. Die sich ergebenden Werte sind in Tabelle 8.3 aufgeführt.

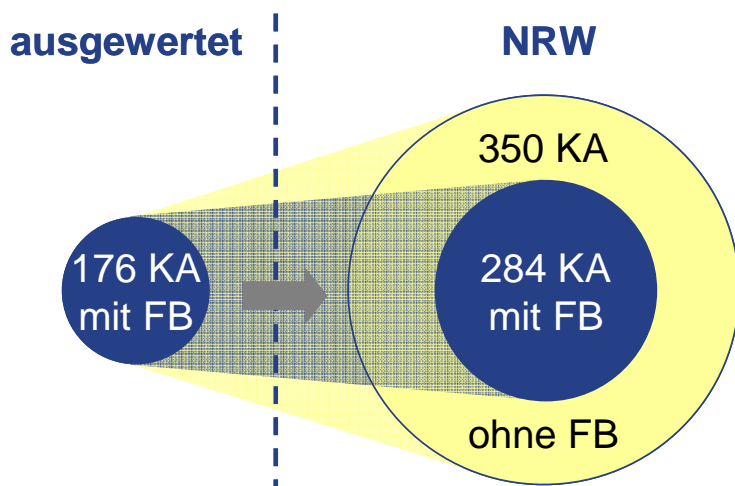


Bild 8.1: Übertrag der ausgewerteten Daten auf alle Kläranlagen mit Faulung in NRW

Die Hochrechnung wurde für jede der vier EW-Kategorien in Abhängigkeit des jeweiligen Verhältnisses von ausgewerteten zu in NRW vorhandenen Kläranlagen mit Faulung durchgeführt. Die sich ergebenden Werte sind in Tabelle 8.3 aufgeführt.

Tabelle 8.3: Ist-Zustand Faulgasanfall und Faulgasnutzung in NRW (Hochrechnung)

Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung		[EW]	Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III	Kategorie IV	Gesamt I-IV
			< 20.000	20.000-50.000	50.000-100.000	> 100.000	
ausgewertete Kläranlagen	Anzahl	[-]	57	62	31	26	176
	Ausbaugröße	[EW]	1.165.448	3.198.274	3.077.070	10.867.100	18.307.892
Verhältnis ausgew./NRW	$f_{\text{ausgewertet/NRW}}$	[-]	0,69	0,66	0,51	0,57	0,58
Kläranlagen in NRW mit separater anaerober Stabilisierung	Anzahl	[-]	80	100	60	44	284
	Ausbaugröße	[EW]	1.677.079	4.868.605	6.023.373	19.007.100	31.576.157
	Stromverbrauch Kläranlagen	[MWh/a]	52.612	135.470	149.939	466.171	804.191
	Stromproduktion aus Faulgas	[MWh/a]	18.768	47.914	63.730	267.200	397.612
	Strombezug Kläranlagen	[MWh/a]	33.844	87.555	86.209	198.971	406.579
	verfügbares Faulbehältervolumen	[m <sup>3</sup> ]	97.900	217.400	241.600	594.600	1.151.500
	Faulgasanfall auf Kläranlagen	[Nm <sup>3</sup> /a]	11.309.000	28.697.000	41.589.000	132.413.000	214.008.000
	Aggregate zur Stromerzeugung	[-]	55	100	90	121	366
Gesamtleistung der Stromerzeuger	[kW <sub>el</sub> ]	2.637	8.056	11.258	43.367	65.318	

Über alle Kategorien ergibt sich für Nordrhein-Westfalen, dass jährlich rund 214 Mio. Nm<sup>3</sup> Faulgas auf Kläranlagen anfallen, die in insgesamt ca. 370 Aggregaten zur Stromerzeugung (überwiegend BHKW) zu rund 398 GWh/a verstromt werden. Mit dieser Strommenge können rund 50 % des Stromverbrauchs der Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung (804 GWh/a) gedeckt werden.

## 8.2 Untersuchte Szenarien

### 8.2.1 Szenario 1: Verfahrensumstellung auf anaerobe Stabilisierung

In Nordrhein-Westfalen werden 321 kommunale Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von rund 3,3 Mio. EW ohne anaerobe Stabilisierung betrieben. Der dort anfallende Klärschlamm wird überwiegend simultan aerob im Belebungsbecken (vgl. Bild 3.1). Die Umstellung von aerober auf anaerobe Stabilisierung bietet gerade aus energetischer Sicht zahlreiche Vorteile, bedeutet aber auch erhebliche Investitionen für den Umbau der Kläranlage (siehe Kapitel 4.1). Bei den derzeitigen Energie- und Entsorgungskosten ist eine Verfahrensumstellung von aerober auf anaerobe Stabilisierung ab einer Ausbaugröße von 20.000 EW wirtschaftlich (Gretzschel et al., 2010).

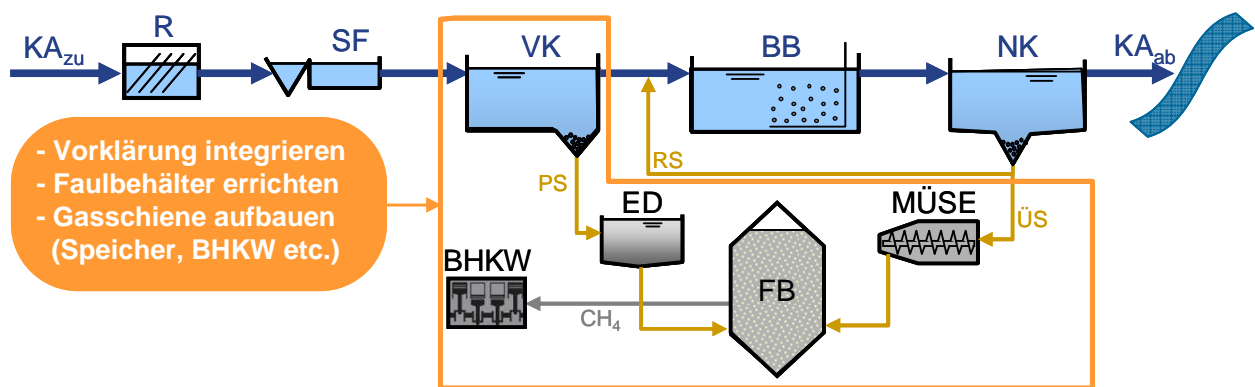


Bild 8.2. Szenario 1: Verfahrensumstellung auf anaerobe Stabilisierung

In Nordrhein-Westfalen werden derzeit 32 kommunale Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von jeweils mehr als 20.000 EW betrieben (insgesamt rund 1,5 Mio. EW), für die eine Umrüstung zur Schlammfäulung möglich erscheint. Für diese Kläranlagen werden unter Verwendung der in Tabelle 8.2 aufgeführten Ansätze die notwendigen Investitionskosten für den Bau von Faulstufen und die daraus resultierenden Kapitalkosten sowie die Veränderung der Betriebskosten berechnet. Die spezifischen Investitionskosten für die Umrüstung von Kläranlagen nach Bild 8.3 beinhalten die Kosten für den Bau einer Faulstufe mit allen benötigten Peripherieaggregaten (Heizschlammumpen, Wärmetauscher, Gasaufbereitung, BHKW, usw.), einer Vorklärung, einem Zwischenpumpwerk und einer Überschussschlammverdickung. Die notwendigen Investitionskosten für die Umrüstung der 32 Kläranlagen belaufen sich insgesamt auf rund 72,4 Mio. Euro.

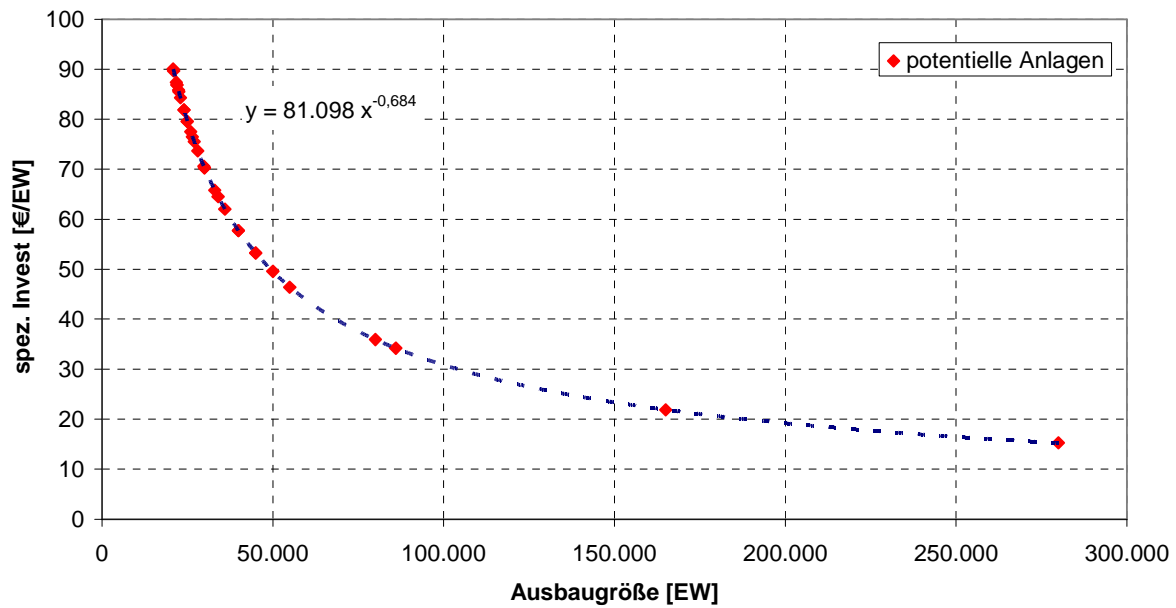


Bild 8.3: Investitionskosten für Umstellung einer Kläranlage auf anaerobe Stabilisierung (Kostenfunktion nach Gretzschel et al., 2010)

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden auf der Kostenseite zum einen die sich aus den Investitionen ergebenden Kapitalkosten sowie die zusätzlichen Betriebskosten für den Betrieb der Faulstufe berücksichtigt. Dem gegenüber stehen auf der Nutzenseite die Einsparungen durch den verminderten Strombezug sowie die Verringerung der Entwässerungs-, Transport- und Verwertungskosten auf Grund des geringeren Klärschlammanfalls. Die Auswirkungen der Verfahrensumstellung auf anaerobe Stabilisierung bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als 20.000 EW auf die Faulgas- und Stromproduktion und auf den Stromverbrauch sind unterschieden nach den Kategorien in Bild 8.4 dargestellt.

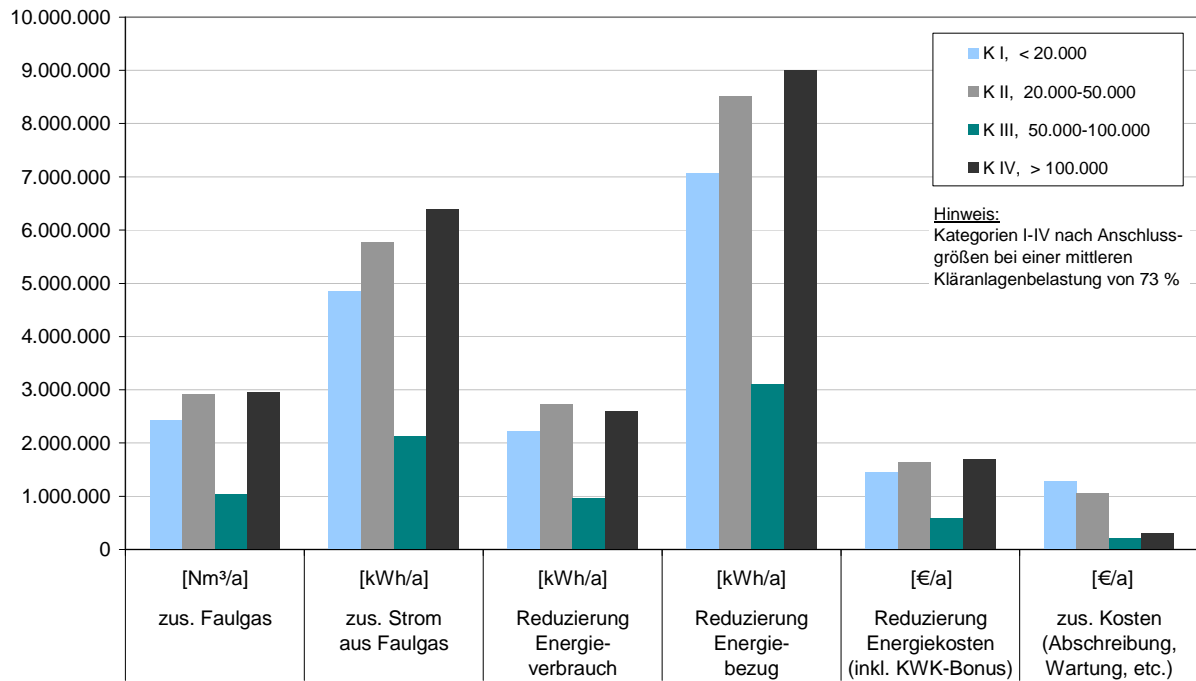


Bild 8.4: Optimierungspotential einer Verfahrensumstellung auf anaerobe Stabilisierung bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße über 20.000 EW für NRW

Durch die Verfahrensumstellung auf den 32 Kläranlagen kann die Faulgasproduktion insgesamt um rund 9,4 Mio. Nm³/a (4,4 %) gesteigert und der Strombezug um ca. 28 GWh/a gesenkt werden. Der Vergleich der Energiekosteneinsparung mit den erforderlichen Kosten zeigt, dass die Verfahrensumstellung bei Anlagen der Kategorie I mit einem Kosten-Nutzenverhältnis von 0,9 nur gerade wirtschaftlich ist, wohingegen sie bei Anlagen der Kategorien III und IV sehr wirtschaftlich erscheint. Ob eine Verfahrensumstellung tatsächlich praktisch und wirtschaftlich umsetzbar ist, hängt von den jeweiligen örtlichen Randbedingungen ab und muss im Einzelfall überprüft werden.

### 8.2.2 Szenario 2: Primärschlammentnahme steigern

Primärschlamm enthält im Vergleich zu Überschussschlamm mehr leichter verfügbares Substrat und weist daher eine höhere Gasausbeute auf. Zusätzlich führt die Entnahme von Primärschlamm zur Entfrachtung der biologischen Reinigungsstufe und damit zu einem verringerten Energiebedarf für die Oxidation der organischen Bestandteile. Allerdings ist auf Grund der Anforderung an die Stickstoffelimination eine ausreichende Kohlenstoffversorgung der Denitrifikation sicherzustellen. Gerade aus diesem Grund wurden in den vergangenen 20 Jahren viele Vorklärbecken verkleinert und damit die Entnahme von Primärschlamm reduziert (Stichwort: Grobentschlammung).

Unter Berücksichtigung der zwischenzeitlich deutlich gestiegenen Preise für Energie, erscheint es heute dagegen sinnvoll, soviel Primärschlamm wie möglich zu entnehmen und nur so wenig Kohlenstoff, wie tatsächlich für die Denitrifikation benötigt wird, in die biologische Stufe einzuleiten. Hierfür könnte entweder die Vorklärung vergrößert oder eine Vorfällung eingesetzt werden, wobei stets ein für die Denitrifikation ausreichendes C/N-Verhältnis im Zulauf der biologischen Stufe sichergestellt sein muss.

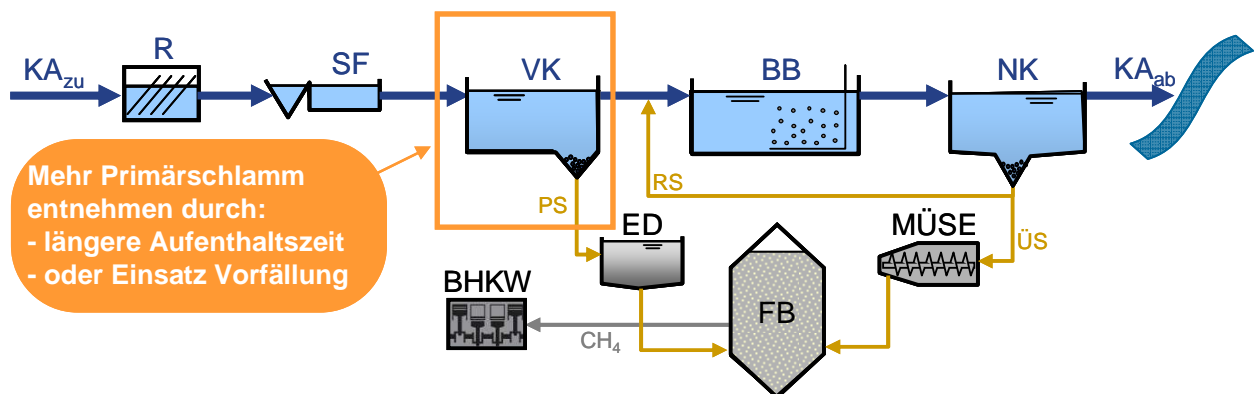


Bild 8.5: Szenario 2: Primärschlammentnahme steigern

Die ausgewerteten Kläranlagen weisen eine mittlere Aufenthaltszeit in der Vorklärung je nach EW-Kategorie von 1,2 bis 1,8 h auf (vgl. Tabelle 3.4). Für die Szenarienbetrachtung wird angenommen, dass die Vorklärzeit auf 2 h erhöht werden kann. Da für Kategorie IV (Kläranlagen mit einer mittleren Anschlussgröße von mehr als 100.000 EW) die Vorklärdauer im Mittel schon bei 1,8 liegt und in diesem Fall eine Erhöhung auf 2,0 Stunden keinen signifikanten Einfluss auf die Primärschlammentnahme hat, wurde dieses Szenario nur für die anderen drei Kategorien berechnet.

Die Auswirkungen der erhöhten Vorklärdauer auf die Faulgas- und Stromproduktion und auf den Stromverbrauch sowie den Schlammanfall werden unter Verwendung des in Kapitel 7 beschriebenen stationären Bilanzmodell für die jeweiligen Referenzkläranlagen berechnet.



Anhand spezifischer Kosten für den Bau zusätzlichen Vorklärvolumens (Tabelle 8.2) werden die notwendigen Investitionen abgeschätzt. Die Ergebnisse sind nach den EW-Kategorien unterschieden in Bild 8.7 dargestellt.

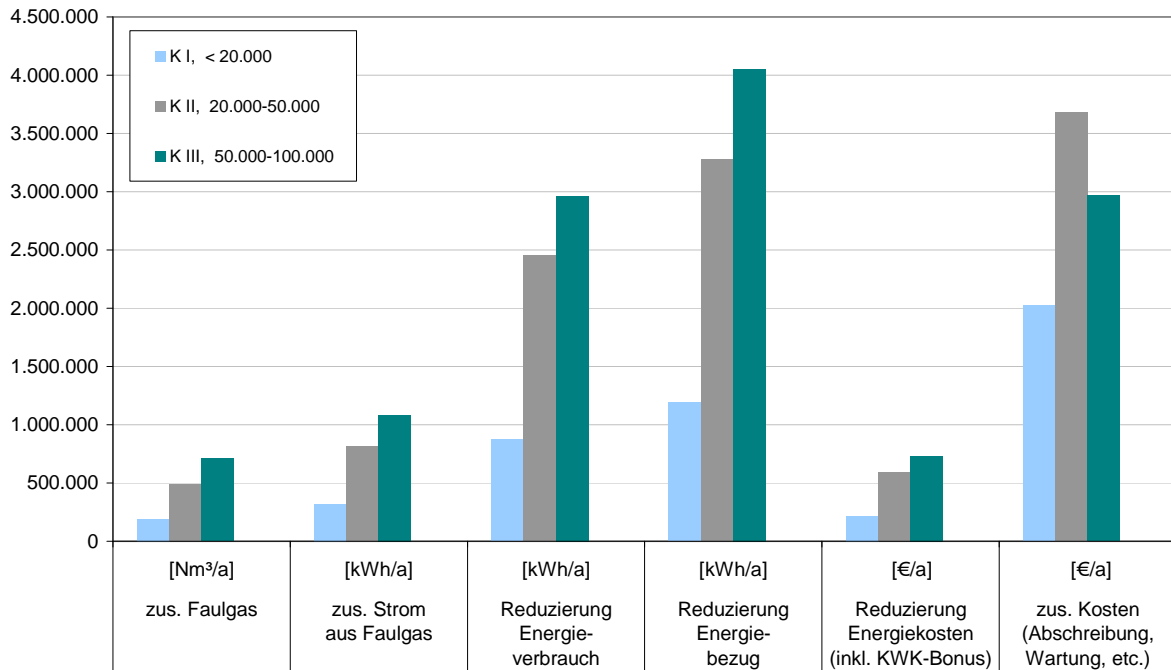


Bild 8.6: Optimierungspotential einer erhöhten Primärschlammmentnahme in NRW

Über alle drei betrachteten Kategorien kann durch die erhöhte Primärschlammmentnahme die Faulgasproduktion in NRW um rund 1,4 Mio. Nm³/a (0,7 %) gesteigert und der Stromfremdbezug um 8,5 GWh/a gesenkt werden. Der Bau von zusätzlichem Vorklärbeckenvolumen ist mit hohen Investitionskosten verbunden, die deutlich die erzielbare Stromkosteneinsparung übertreffen. Durch Umnutzung von freiem Beckenvolumen oder durch den Einsatz einer Vorfällung statt dem Bau einer zusätzlichen Vorklärung ließen sich diese Investitionskosten allerdings senken.

Die Wirtschaftlichkeit der Errichtung von Vorklärbecken stellt sich des weiteren günstiger für Kläranlagen dar, die bislang trotz anaerober Stabilisierung ohne Vorklärung betrieben werden, da sich für diese ein wesentlich größerer Einfluss auf den Faulgasanfall und den Energieverbrauch ergibt. Ob der Bau von (zusätzlichem) Vorklärvolumen für eine Kläranlage sinnvoll ist, muss im Einzelfall überprüft werden.

### 8.2.3 Szenario 3: Schlammalter absenken

Die Datenauswertung hat ergeben, dass das Schlammalter ( $t_{TS}$ ) je nach EW-Kategorie im Mittel zwischen 18 und 20 Tagen beträgt. Dies ist für Kläranlagen mit einer separaten Faulung, bei der das erforderliche Schlammalter unabhängig von der Stabilisierung ist, als relativ hoch einzustufen. Ein derart hohes Schlammalter hat einen erhöhten aeroben Biomasseabbau durch endogene Veratmung im Belebungsbecken zur Folge, was wiederum einen erhöhten Energieverbrauch für die Belüftung sowie einen geringeren Faulgasanfall aus dem Überschussschlamm bewirkt. Daher ist es aus energetischen Gesichtspunkten sinnvoll, das Schlammalter abzusenken, wobei stets das für die Stickstoffelimination erforderliche Schlammalter gewährleistet werden muss.

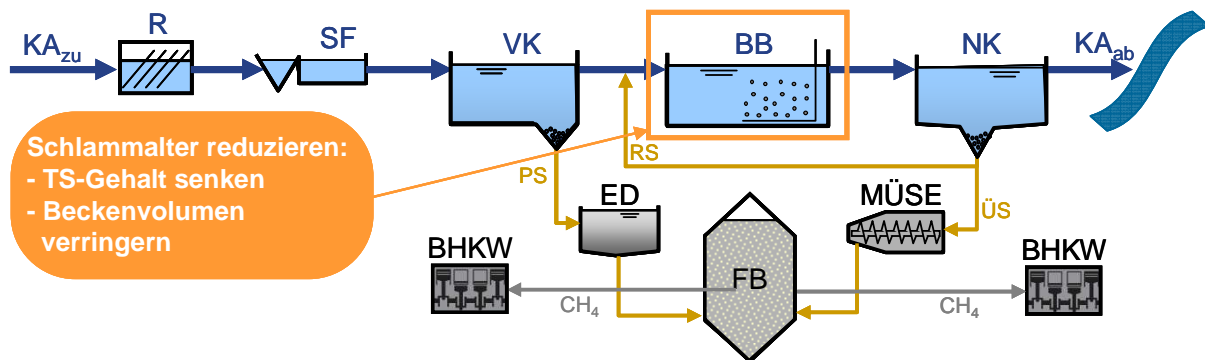


Bild 8.7: Szenario 3: Schlammalter senken

Das erforderliche Schlammalter hängt neben der Abwassertemperatur von dem Verhältnis des Denitrifikationsvolumens zum Gesamtvolumen ab ( $V_D/V_{BB}$ ). Bei einem Verhältnis von 0,4 und einer Abwassertemperatur von 12 °C sollte das Bemessungsschlammalter 13,7 d für Anlagen unter 100.000 EW und 11,0 d für Anlagen über 100.000 EW betragen. Diese Werte liegen damit deutlich niedriger als die vorhandenen Schlammalter der ausgewerteten Kläranlagen. Eine Reduktion des Schlammalters erscheint daher, besonders in der wärmeren Jahreshälfte, unproblematisch und ließe sich auf vielen Anlagen durch einen niedrigeren TS-Gehalt in der Belebung kurzfristig realisieren

Die Auswirkungen eines verringerten Schlammalters auf die Faulgas- und Stromproduktion und auf den Stromverbrauch sowie den Schlammanfall werden unter Verwendung des in Kapitel 7 beschriebenen stationären Bilanzmodell für die jeweiligen Referenzkläranlagen berechnet und anschließend auf die Kläranlagen in NRW übertragen.

Die Aufwendungen für diese Maßnahme, die sich im Wesentlichen auf einen eventuell erhöhten Betreuungsaufwand in der Umstellphase und geringfügig erhöhte Kosten für die Überschussschlammmentnahme beschränken, wurden für die Szenarienbetrachtung vernachlässigt.

Die Ergebnisse der Szenarienbetrachtung für eine Anpassung des Schlammalters sind in Bild 8.8 dargestellt.

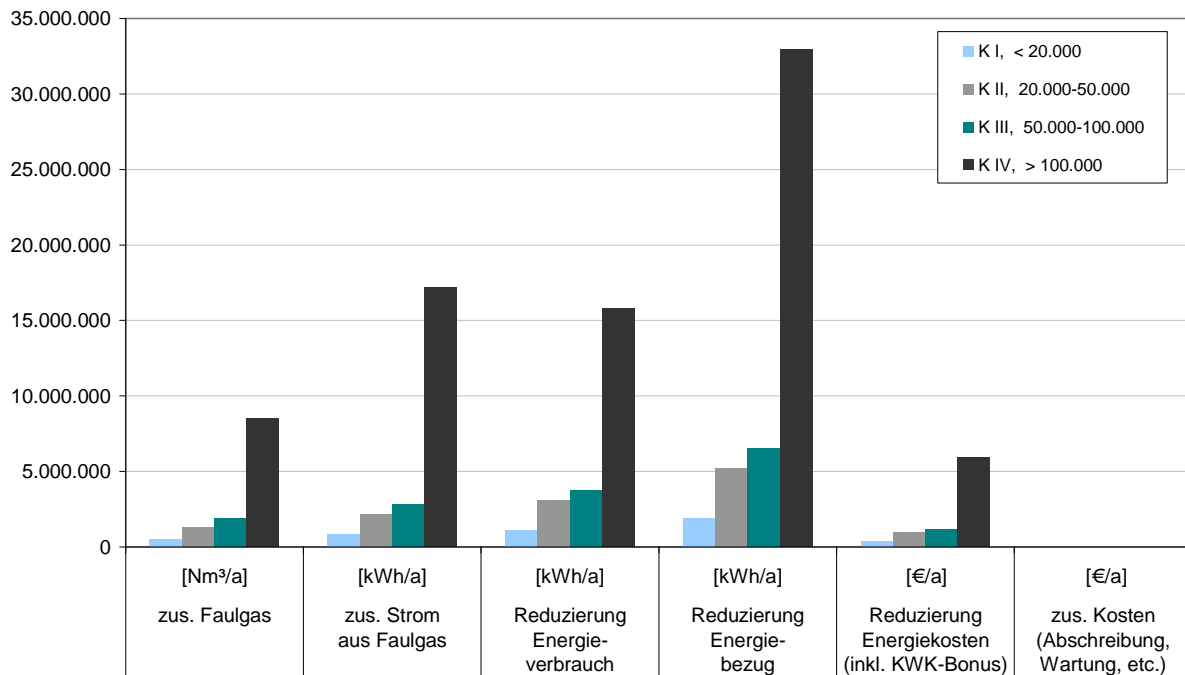


Bild 8.8: Optimierungspotential durch Absenkung des Schlammalters in NRW

Durch eine Absenkung des Schlammalters auf das erforderliche Schlammalter kann auf den Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, die mit einer separaten Faulstufe ausgerüstet sind, insgesamt rund 12 Mio. Nm³/a mehr Faulgas erzeugt und der Stromverbrauch durch den geringeren Luftbedarf in der biologischen Reinigungsstufe überschlägig um 23,7 GWh/a gesenkt werden.

Das größte Einsparpotential liegt bei den Kläranlagen der Kategorie IV, da für sie auf Grund des niedrigeren Sicherheitsfaktors (SF=1,45 nach ATV-DVWK, 2001) eine stärkere Absenkung des Schlammalters möglich ist und diese Kategorie ohnehin die größte Faulgasproduktion aufweist (vgl. Tabelle 8.3).

### 8.2.4 Szenario 4: Alle Faulungsanlagen mit KWK ausrüsten

Die Datenumfrage hat gezeigt, dass auf 21 % der Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung das anfallende Faulgas nicht zur Stromerzeugung genutzt wird, sondern überwiegend zur Wärmeerzeugung verwendet bzw. abgefackelt wird. Für ganz NRW hochgerechnet ergeben sich damit insgesamt 59 Faulungsanlagen mit einer Ausbaugröße von über 3 Mio. EW auf denen das Faulgas nicht verstromt wird (Tabelle 8.4).

Tabelle 8.4: Faulungsanlagen in NRW ohne Faulgasverstromung

Faulungsanlagen ohne Verstromung	[EW]	Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III	Kategorie IV	Gesamt I-IV
		< 20.000	20.000-50.000	50.000-100.000	> 100.000	
Anzahl	[-]	29	18	10	2	59
Ausbaugröße	[EW]	346.440	505.429	700.246	1.448.199	3.000.314
Faulgasanfall	[Nm <sup>3</sup> /a]	2.891.489	3.734.759	7.481.360	10.129.577	24.237.185

Angesichts der weiter steigenden Strompreise und der Möglichkeit, den Wärmebedarf einer Kläranlage auch weitestgehend über die Abwärme eines BHKW oder einer Mikrogesturbinen (Kraftwärmekopplung, KWK) zu decken, erscheint es sinnvoll, das anfallende Faulgas möglichst vollständig in KWK-Aggregaten zu verstromen.

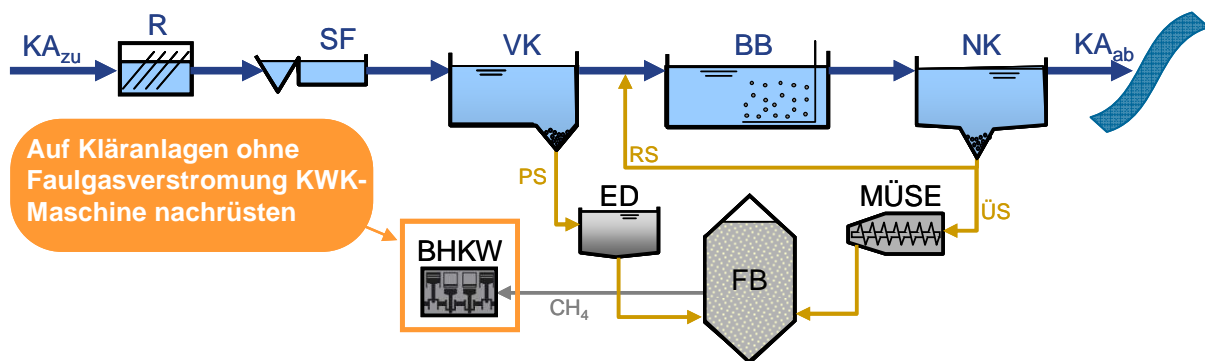


Bild 8.9: Szenario 4: Alle Faulungsanlagen mit KWK ausrüsten

Die sich ergebende zusätzliche Stromproduktion und die notwendigen Investitionen und Betriebsaufwendungen, die sich durch die Nachrüstung von KWK-Aggregaten ergeben, werden unter Verwendung der in Kapitel 5 beschriebenen und in Tabelle 8.2 aufgeführten spezifischen Ansätze für die vier Referenzkläranlagen berechnet und anschließend auf die genannten 59 Faulungsanlagen in NRW übertragen. Tatsächlich wird auf einigen dieser Anlagen auf Grund der örtlichen Gegebenheiten (z.B. vorhandene Trocknung) eine Faulgasverstromung nicht umsetzbar sein. Das Szenario stellt daher eine Grenzbetrachtung

dar, mit der nur das theoretische Optimierungspotential durch Nachrüstung von KWK-Aggregaten aufgezeigt werden soll.

Die Auswirkungen der Nachrüstung von KWK-Aggregaten auf Kläranlagen ohne Faulgasverstromung sind unterschieden nach den Kategorien in Bild 8.10 dargestellt.

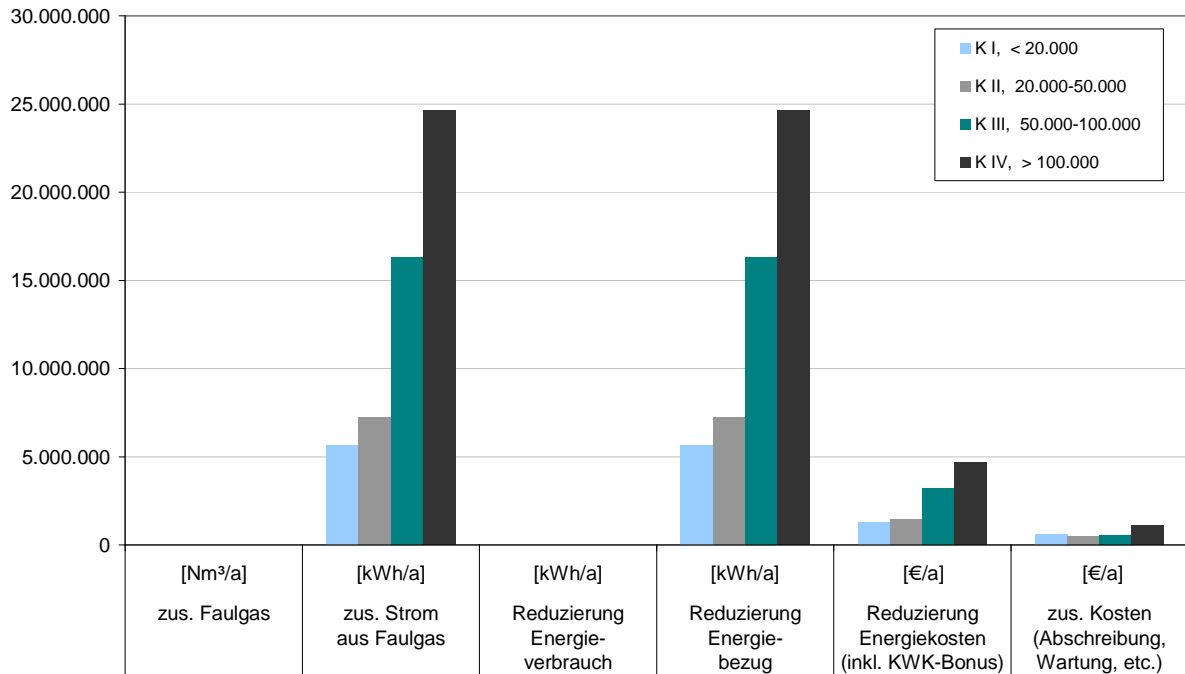


Bild 8.10: Optimierungspotential durch Nachrüstung von KWK-Aggregaten in NRW

Die Nachrüstung von KWK-Aggregaten hat nur Einfluss auf die Stromproduktion und damit den Energiefremdbezug. Die Faulgasmenge und der Energieverbrauch der Kläranlage bleiben davon unberührt. Durch die Ausrüstung aller Faulungsanlagen mit KWK-Aggregaten kann die Stromproduktion in NRW um insgesamt rund 54 GWh/a gesteigert und der Energiefremdbezug entsprechend gesenkt werden.

Bei den derzeitigen Stromkosten übersteigen die erzielbaren Einsparungen deutlich die erforderlichen Kosten, so dass sich die Nachrüstung für die Kläranlagen aller Kategorien als wirtschaftlich darstellt.

### 8.2.5 Szenario 5: Wirkungsgrad der Stromerzeugung steigern

In Nordrhein-Westfalen wird auf 238 Kläranlagen das anfallende Faulgas ganz oder teilweise zur Stromerzeugung eingesetzt. Hierfür stehen insgesamt rund 370 KWK-Aggregate (überwiegend BHKW) zur Verfügung. Die Datenauswertung hat ergeben, dass der mittlere Wirkungsgrad der eingesetzten Maschinen ungefähr 85 % des Nennwirkungsgrades entspricht (Tabelle 8.5). Dies ist voraussichtlich auf den zeitweisen Betrieb der Aggregate in einem energetisch ungünstigen Teillastbereich sowie auf Maschinenverschleiß zurückzuführen.

Tabelle 8.5: Aggregate zur Faulgasverstromung in NRW

Aggregate zur FG-Verstromung		Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III	Kategorie IV	Gesamt I-IV
	[EW]	< 20.000	20.000-50.000	50.000-100.000	> 100.000	
Anzahl	[-]	55	100	90	121	366
Nennwirkungsgrad <sub>IST</sub>	[%]	31,3	31,5	34,0	35,7	33,1
mittlerer Wirkungsgrad <sup>1</sup>	[%]	27,8	27,0	30,2	29,8	28,7
Nennwirkungsgrad <sub>Neu</sub> <sup>2</sup>	[%]	33,6	35,9	37,6	42,3	37,3

<sup>1</sup> = aus Datenerhebung berechnet

<sup>2</sup> = nach ASUE 2011

Durch gezieltes Faulgasmanagement können die Aggregate in einem besseren Lastbereich betrieben werden und dadurch kann der mittlere Wirkungsgrad erhöht werden.

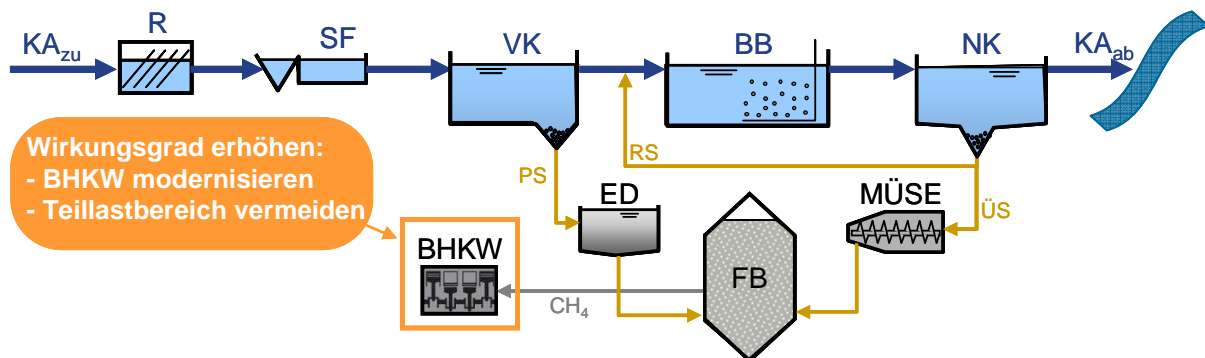


Bild 8.11: Szenario 5: Wirkungsgrad der Stromerzeugung steigern

Eine weitere Option, die Stromausbeute aus Faulgas zu erhöhen, bietet ein Austausch der vorhandenen KWK-Aggregate gegen modernere Maschinen. Durch Weiterentwicklung der Motorentechnologie wurden die elektrischen Wirkungsgrade der Maschinen über die Jahre verbessert (siehe Tabelle 8.5), so dass moderne KWK-Aggregate heute aus der gleichen Faulgasmenge eine größere Strommenge erzeugen können als z.B. 15 Jahre alte Aggregate.

Für das Szenario wird angenommen, dass alle KWK-Anlagen modernisiert und auf den neuesten Stand der Technik gesetzt werden. Die sich daraus ergebende zusätzliche Stromproduktion und die notwendigen Investitionen und Betriebsaufwendungen werden unter Verwendung der in Kapitel 5 beschriebenen und in Tabelle 8.2 aufgeführten spezifischen Ansätze für die vier Referenzkläranlagen berechnet und anschließend auf NRW übertragen. Die Ergebnisse sind für die vier Kläranlagenkategorien in Bild 8.12 dargestellt.

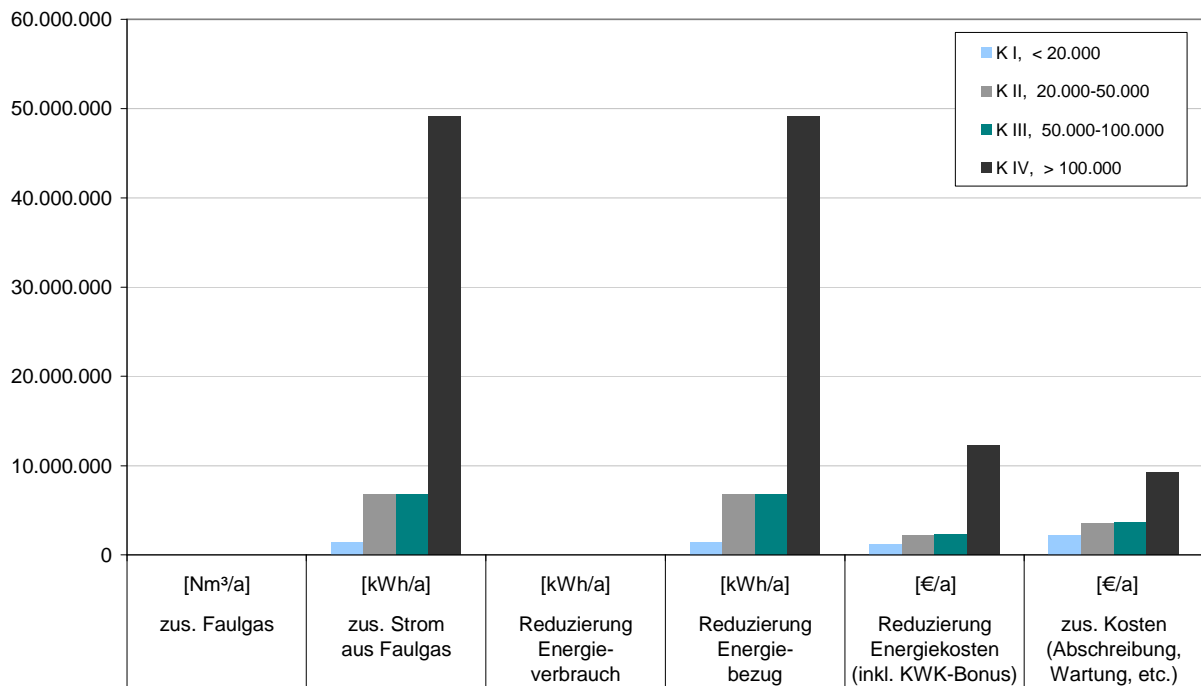


Bild 8.12: Optimierungspotential durch Modernisierung von KWK-Aggregaten in NRW

Genau wie bei Szenario 5 (Nachrüstung) hat die Modernisierung der vorhandenen KWK-Aggregate nur Auswirkungen auf die Stromproduktion und den Stromfremdbezug. Diese können durch die Maßnahme auf allen Kläranlagen in NRW um insgesamt rund 64 GWh gesteigert respektive gesenkt werden, wobei über 75 % auf die Kategorie IV entfallen.

Da die Modernisierung der KWK-Aggregate mit deutlichen Kosten verbunden ist (schätzungsweise 150 Mio. € Investition für alle vorhandenen Aggregate) und diesen nur der Nutzen aus der zusätzlichen Stromproduktion entgegen steht, hängt die Wirtschaftlichkeit entscheidend von der Wirkungsgradverbesserung zwischen vorhandenen und neuen KWK-Aggregaten ab (vgl. Kapitel 5). Der Unterschied zwischen den Wirkungsgraden ist allerdings besonders für die kleineren Kläranlagen (vgl. Tabelle 8.5) nur relativ gering. Die Modernisierung der KWK-Aggregate lässt sich daher nicht generell wirtschaftlich darstellen und hängt bei den momentanen Strompreisen von den jeweils vorhandenen Aggregaten (elektr. Wirkungsgrad, Verschleißzustand, Restbuchwert) ab.

### 8.2.6 Szenario 6: Freie Faulbehälterkapazitäten nutzen

In Nordrhein-Westfalen existieren rund 1,2 Mio. m<sup>3</sup> Faulvolumen auf kommunalen Kläranlagen. Betrachtet man die Faulzeiten und Raumbelastungen, die sich aus der Datenauswertung ergeben haben (vgl. Tabelle 3.4), zeigt sich, dass über alle EW-Kategorien und besonders auf kleineren Anlagen ( $t_{FB,median} = 41$  d für Kategorie I) freie Faulbehälterkapazitäten zur Verfügung stehen, die zur Mitausfaulung von externen Schlämmen anderer Kläranlagen oder von Co-Substraten genutzt werden könnten.

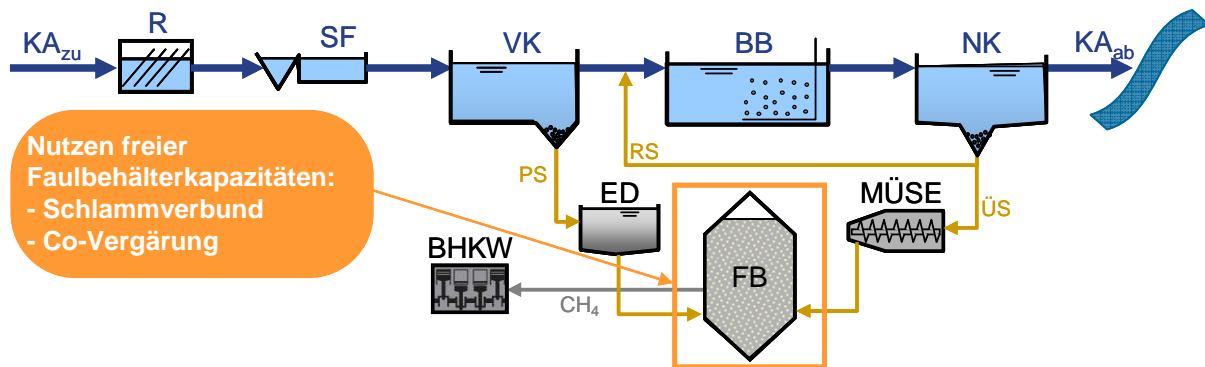


Bild 8.13: Szenario 6: Freie Faulbehälterkapazitäten nutzen

Auf kleineren Kläranlagen (Ausbaugröße < 20.000 EW) lässt sich eine anaerobe Faulstufe wirtschaftlich nicht errichten. Allerdings besteht die Möglichkeit, den Klärschlamm zu einer Kläranlage zu transportieren, auf der noch freie Faulraumkapazität vorhanden ist (Schlammverbund). Dabei sind die rechtlichen Anforderungen an die Schlammbehandlung und -entsorgung zu beachten und das Schlammverbundkonzept ist mit den zuständigen Behörden abzustimmen.

Da der Rohschlamm als eingedickter Nassschlamm (Annahme 4 %TR) transportiert wird und damit das Transportvolumen relativ groß ist, sollten die Transportwege möglichst gering sein. Es wird für die Szenarienbetrachtung eine Transportentfernung von 10 km angenommen.

Die Auswirkungen der Mitausfaulung externer Klärschlämme auf die Faulgas- und Stromproduktion und auf den Stromverbrauch werden unter Verwendung des in Kapitel 7 beschriebenen stationären Bilanzmodell für die jeweiligen Referenzkläranlagen berechnet und anschließend auf die Gesamtsituation in NRW übertragen. Die Aufwendungen für den Klärschlammtransport, die Einsparungen durch eine verringerte Klärschlammmentsorgung infolge der anaeroben Stabilisierung und die notwendigen Investitionen auf den Kläranlagen werden anhand der in Tabelle 8.2 aufgeführten Faktoren abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in Bild 8.14 dargestellt.



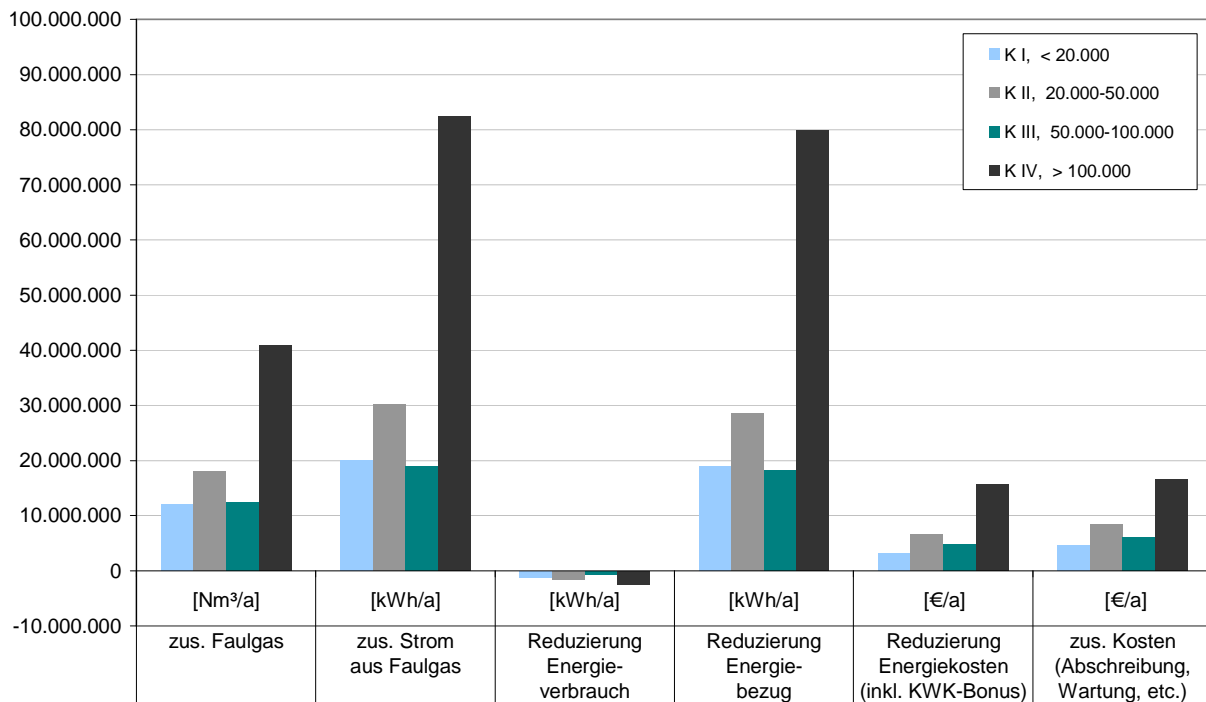


Bild 8.14: Optimierungspotential durch Ausnutzung freier Faulbehälterkapazitäten in NRW

Die in NRW vorhandenen Faulbehälter weisen nach der Datenauswertung freie Kapazitäten für die Mitausfäulung von rund 5 Mio. m<sup>3</sup> Fremdschlamm auf. Würde dieses Potential vollständig ausgenutzt, könnten ca. 83 Mio. m<sup>3</sup> Faulgas und daraus wiederum 152 GWh/a Strom produziert werden. Trotz dieser enormen Strommenge übersteigen bei den getroffenen Annahmen die erforderlichen Kosten für die Mitausfäulung, die von den Kosten für den Schlammtransport dominiert werden, die erzielbaren Einsparungen beim Energiebezug. Dabei ist zu beachten, dass die Transportkosten maßgebend von der Transportentfernung und dem Transportvolumen abhängen. Durch eine verbesserte Eindickung oder bei geringeren Entfernungen zwischen den Kläranlagen können die Transportkosten deutlich reduziert werden. Je nach örtlichen Voraussetzungen (z.B. Transport durch bestehende Druckleitungen statt auf der Straße) lässt sich ein Schlammverbund sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich sinnvoll darstellen, muss jedoch im Einzelfall überprüft werden. Auch besteht die Option, statt externer Schlämme anderer Kläranlagen Co-Substrate mit auszufäulen, was je nach deren Bezugskosten wirtschaftlicher sein kann.

### 8.3 Szenarienvergleich

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Szenarien sind für alle vier Kategorien zusammengefasst in Bild 8.15 einander gegenübergestellt. Neben den jeweiligen Auswirkungen auf den Faulgasanfall und die Energiesituation sind hier auch überschlägig die Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen berechnet, die sich aus dem veränderten Energiebezug und möglichen CO<sub>2</sub>-Emissionen z.B. beim Klärschlammtransport zusammensetzen.

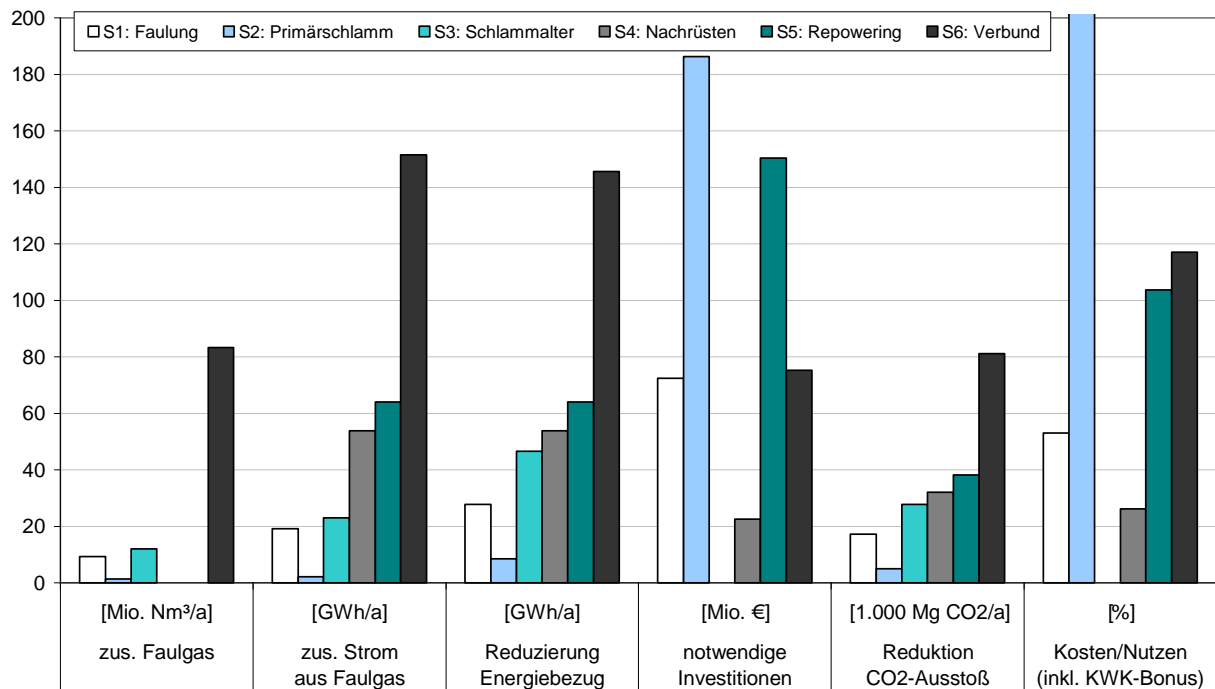


Bild 8.15: Vergleich der verschiedenen Szenarien (Kategorien I – IV)

Es zeigt sich, dass das größte Potential zur Steigerung des Faulgasanfalls und der Energieproduktion aus Faulgas in der Nutzung der freien Faulbehälterkapazitäten (Szenario 6) liegt, dies aber allein durch Schlammverbundkonzepte auf Grund der hohen Transportaufwendungen unter den getroffenen Annahmen nicht wirtschaftlich auszuschöpfen ist. Durch Nachrüstung und Modernisierung von KWK-Aggregaten (Szenarien 4 und 5) lässt sich die Umwandlung der vorhandenen Faulgasmenge in Elektrizität in Summe um 118 GWh/a (entspricht einer Steigerung um 30 %) deutlich steigern. Die hierfür notwendigen Investitionen von rund 175 Mio. € können dabei weitestgehend von den Einsparungen beim Strombezug abgedeckt werden. Ebenfalls kann durch die Reduzierung des Schlammalters auf den Kläranlagen mit anaerober Faulung sowohl die Stromproduktion gesteigert als auch der Stromverbrauch der Kläranlage deutlich reduziert werden. Da dieser Maßnahme nur geringe Kosten gegenüberstehen, stellt sie die wirtschaftlichste Option dar, die kurzfristig umgesetzt werden kann. Die Verfahrensumstellung von aerober auf anaerobe

Schlammstabilisierung bei Anlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als 20.000 EW ist zwar wirtschaftlich, besitzt aber im Vergleich ein geringeres Optimierungspotential, da in Nordrhein-Westfalen bereits die meisten großen Kläranlagen (> 90 % der Ausbaugröße) über eine Faulstufe verfügen. Das geringste Optimierungspotential besitzt das Szenario einer gesteigerten Primärschlammabnahme durch Verlängerung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die Kläranlagen mit Faulung in NRW schon heute im Mittel Aufenthaltszeiten von 1,2 bis 1,8 Stunden in der Vorklärung aufweisen.

Die Wirtschaftlichkeit aller betrachteten Szenarien ist wesentlich von den Preisen für den Stromfremdbezug abhängig. Für die Szenarienrechnung wurde ein mittlerer Strompreis von 18 Ct/kWh angesetzt. Die Auswirkung einer möglichen Veränderung des Strompreises auf die Wirtschaftlichkeit der Szenarien ist in Bild 8.16 für die verschiedenen EW-Kategorien dargestellt.

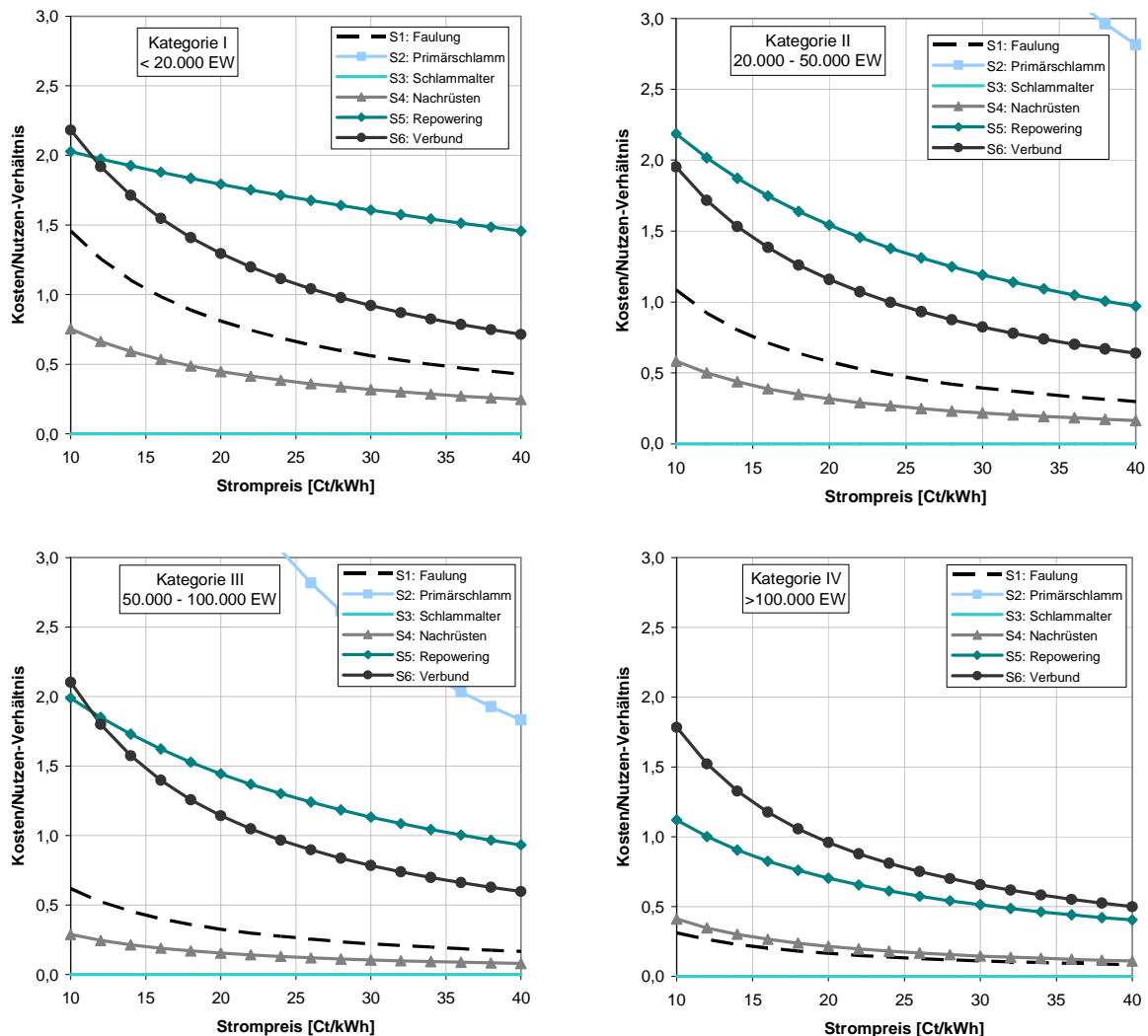


Bild 8.16: Wirtschaftlichkeit der Szenarien in Abhängigkeit des Strombezugspreises (Sensitivitätsanalyse)

---

Das Szenario 6 (Verbund) zeigt die größte Sensitivität gegenüber dem Strompreis. Hiernach wäre je nach EW-Kategorie ab einem Strompreis von 20 bis 25 Ct/kWh ein Schlammverbund unter den getroffenen Annahmen (vgl. Kapitel 8.2.6) wirtschaftlich, vorausgesetzt die Kosten, vor allem für den Klärschlammtransport, blieben unverändert. Für die anderen Szenarien sinkt zwar mit steigendem Strompreis das Kosten/Nutzenverhältnis, die Wirtschaftlichkeitsgrenze ( $K/N=1$ ) wird aber in dem betrachteten Bereich (Strompreis 10 bis 40 Ct/kWh) nur vereinzelt überschritten.

## 9 Beispiele für betriebliche Erfahrungen (KA Steckbrief)

### 9.1 KA Büchel (Schlammverbund)

#### Beschreibung

Auf der Kläranlage Büchel mit einer mittleren Zulaufbelastung von  $20.142 \text{ EW}_{\text{CSB}}$  wird das anfallende Faulgas seit 11 Jahren in einem BHKW mit  $75 \text{ kW}_{\text{el}}$  Nennleistung verstromt. Die jährliche Eigenstromproduktion beträgt ca.  $650.000 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{a}$  (Bezugsjahr 2011), womit ein Eigendeckungsgrad in Höhe von 92 % erreicht wird. Grundlage des geringen Fremdstrombedarfs ist hierbei die Betriebsweise der Anlage im Schlammverbund mit fünf weiteren kommunalen Kläranlagen des gleichen Betreibers (Aggerverband). Der Rohschlamm dieser Anlagen wird auf der Kläranlage Büchen mitbehandelt. Das Verhältnis von Rohschlamm zu externem Schlamm beträgt im Jahresmittel  $1/2$ , der externe Schlamm macht damit 67% des behandelten Schlammes aus. Ein großer Teil des produzierten Faulgases ist damit auf den Schlammverbund zurückzuführen.



Bild 9.1: Schema der Kläranlage Büchel (Aggerverband)

#### Betriebsergebnisse

Das BHKW der Fa. Communa Metall läuft im Mittel fast durchgängig 24 h/d, wobei der Betrieb über zwei Leistungsstufen ( $42$  oder  $53 \text{ m}^3/\text{h}$ ) an den Gasanfall angepasst werden kann. Bild 9.2 zeigt hierzu die mittleren Monatswerte der Eigenproduktion und des Fremdbezugs sowie die erreichten Betriebsstunden im Monatsmittel.

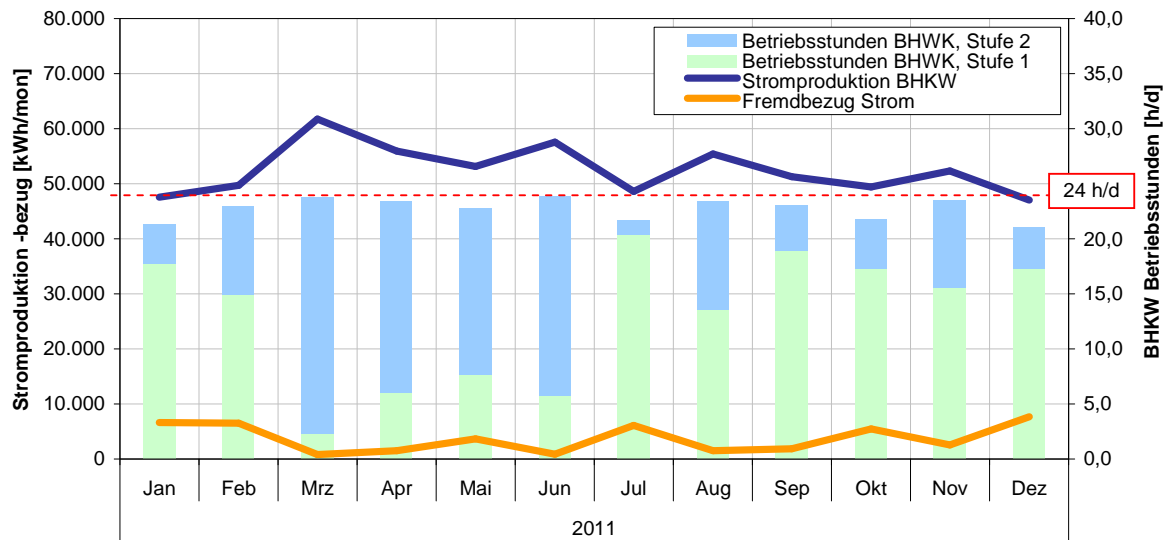


Bild 9.2: Mittlere Monatswerte der Eigenstromproduktion und des Fremdbezugs im Vergleich zu den erreichten Betriebsstunden des BHKWs

### Betriebserfahrungen

Laut Angaben des Betriebspersonals läuft das BHKW sehr betriebsstabil. Da kaum Störungen auftreten ist der Arbeitsaufwand sehr gering. Für die Behebung der Störungen sowie die allgemeine Wartung wurde ein Wartungsvertrag mit der Herstellerfirma geschlossen. Die Erfahrungen hierzu zeigen, dass notwendige Wartungsarbeiten bzw. die Behebung von Störungen durch die Herstellerfirma sehr zeitnah erfolgte, so dass kaum Stillstandszeiten auftraten.



Bild 9.3: BHKW-Modul der Kläranlage Büchel

## 9.2 KA Engelskirchen (BHKW-Repowering)

### Beschreibung

Die Kläranlage Engelskirchen ist eine für 10.000 EW ausgelegte mechanisch - biologische Kläranlage mit einer mittleren Zulaufbelastung von 12.783 EW<sub>CSB</sub>. Die Anlage wird in einem Schlammverbund mit vier weiteren kommunalen Kläranlagen des Aggerverbands betrieben. Bezogen auf die gesamte behandelte Schlammmenge beträgt der Anteil der externen Schlämme dabei allerdings nur etwa 8,5 %. Das BHKW wird je nach Wärmebedarf der Schlamm aufheizung in reinem Klärgasbetrieb oder zusätzlich mit Erdgas betrieben.

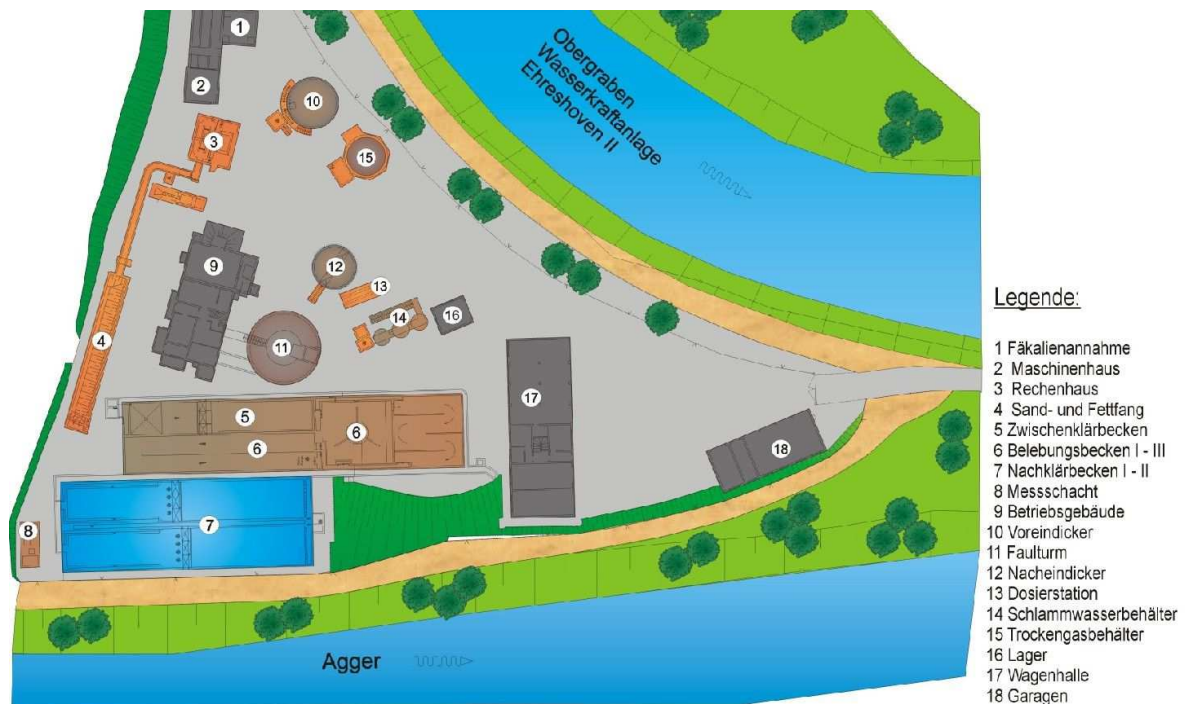


Bild 9.4: Schema der Kläranlage Engelskirchen

Im November 2011 wurde das vorhandene BHKW durch ein neues Aggregat gleicher Leistungsgröße ersetzt. Die Leistungsdaten können Tabelle 9.1 entnommen werden.

Tabelle 9.1: Daten der KWK-Aggregate auf der Kläranlage Engelskirchen

	altes BHKW bis Nov 2011	neues BHKW ab Nov 2011
Hersteller	Comuna Metal	Fa. Kuntschar und Schlüter
Typ	Typ 2725	GTK 50 K
Leistung elektrisch	50 kW <sub>el</sub>	50 kW <sub>el</sub>
Wirkungsgrad elektrisch $\eta_{el}$	28,0 %	34,9 %
Wirkungsgrad thermisch $\eta_{th}$	58,0 %	52,2 %

### Betriebsergebnisse

Je nach Rohschlammmenge bzw. Klärgasanfall sind Laufzeiten bis zu 24 h pro Tag im Klärgasbetrieb möglich. Der Fremdstrombezug hat sich durch Umsetzung der Maßnahme um 31 % reduziert. In Bild 9.5 ist der monatliche Strombezug dargestellt.

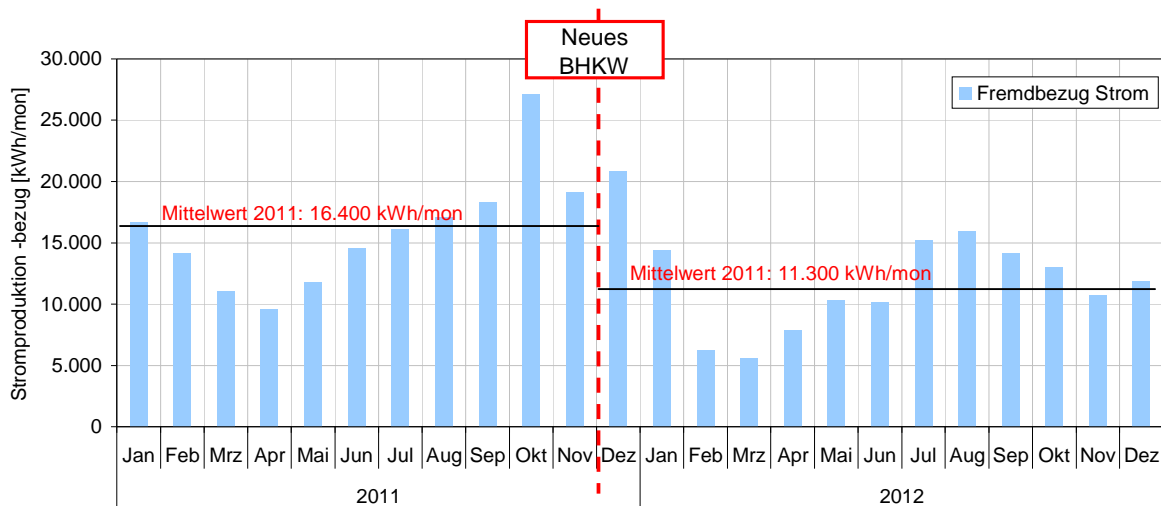


Bild 9.5: Monatlicher Fremdstrombezug vor und nach Austausch des BHKWs

### Betriebserfahrungen

Das neue BHKW läuft zuverlässig und störunanfällig. Der Wartungsaufwand für das KA-Personal beschränkt sich auf das Erfassen der Betriebszählerstände für Wärme- und Stromproduktion, das tägliche Ablassen des Kondensates aus der Abgasleitung, sowie ganz selten auf das Nachfüllen von Wasser.



Bild 9.6: Neues BHKW-Modul der Kläranlage Engelskirchen, Baujahr 2011



### 9.3 KA Warendorf (Mikrogasturbine)

#### Beschreibung

Die Kläranlage Warendorf liegt im Nordwesten der Stadt Warendorf in unmittelbarer Nähe zur Alten Ems, die auch als Vorfluter dient. Die Lage und die Anordnung der Bauwerke auf dem Gelände gehen aus dem Lageplan hervor (Bild 9.7). Die Kläranlage ist in zwei Abschnitte geteilt. Auf dem ursprünglichen Gelände befinden sich die mechanische Stufe, die Dephosphatierung und die Schlammbehandlung. Auf der Erweiterungsfläche wurde die biologische Stufe errichtet.

Zur Nutzung des anfallenden Faulgases mit Kraft-Wärme-Kopplung stehen seit 2007 zwei Mikrogasturbinen zur Verfügung. Jede der Mikrogasturbine erzeugt 65 KW elektrische Leistung und 120 KW thermische Leistung.



Bild 9.7: Schema der Kläranlage Warendorf

#### Betriebsergebnisse

Der gesamte Verbrauch der Kläranlage an elektrischer Energie beträgt ca. 1.874 MWh/a. Davon werden 868 MWh/a durch 2 Mikrogasturbinen gedeckt. Der übrige Teil wird aus dem öffentlichen Netz bezogen. Der Eigendeckungsgrad beträgt somit 46%.

Die bei einer Faulgasmenge von 559.970 Nm<sup>3</sup>/a erzeugte Wärmeenergie beträgt 1.910 MWh/a, welche unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Schwankungen zu einer sehr guten Deckung führt. Ein nicht unerheblicher Anteil ist auf die Zugabe von Co-Substraten zurückzuführen (Seibert-Erling, 2010).

Durch die dem Gasanfall angepasste Betriebsweise der MGT wird das anfallende Faulgas nahezu vollständig genutzt.

### Betriebserfahrungen

Durch die seit 2007 installierten Mikrogasturbinen konnte die Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Wärmeenergie verbessert werden. Die Deckung des Wärmebedarfs durch Faulgas und gleichzeitiger Erzeugung von elektrischer Energie als Nebenziel führte zu einer Optimierung der Gasausnutzung.

Betriebskosten für die Eigenerzeugungsanlage fallen für die Wartung durch die Errichterfirma (VTA) an, die über einen Wartungsvertrag geregelt sind. Ausfallzeiten sind nach Betreiberangabe sehr selten, was sich durch die hohe Verfügbarkeit der Anlage bestätigt. Die Arbeiten des Betriebspersonals reduzieren sich durch die vollständige Integration in das Prozessleitsystem auf die Erfassung der Betriebswerte und Rundgänge mit Sichtkontrolle.



Bild 9.8: Mikrogasturbinen mit Gasaufbereitung (Capstone, 2 x 65kW<sub>el</sub>)

## 9.4 KA Lingen (Desintegration)

### Beschreibung

Die Kläranlage Lingen (Bild 9.9) ist eine für 195.000 EW ausgebaute einstufige Belebungsanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation und biologischer Phosphorelimination. Die mittlere Zulaufbelastung beträgt etwa 150.000 EW<sub>CSB</sub>. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Forschungsvorhabens („Plus-Energie-Kläranlage mit Phosphorrückgewinnung“) untersucht die Stadtentwässerung Lingen derzeit im großtechnischen Maßstab den Einsatz einer Klärschlammvorbehandlung. In Kombination mit weiteren Maßnahmen soll hierdurch ein Überschuss an Strom- und Wärmeproduktion erzielt werden. Gleichzeitig wird eine wirtschaftliche Rückgewinnung von Phosphor (P) angestrebt.



Bild 9.9: Luftbild der Kläranlage Lingen (Hüer, 2013)

Zur Vorbehandlung (Desintegration) des Überschussschlammes wurde auf der KA Lingen in 2012 ein thermisches Hydrolyseverfahren (Lysotherm®) in Betrieb genommen (Tabelle 9.2). Bei diesem Verfahren der Fa. SH+E Group, wird der Überschussschlamm durch indirekte Erhitzung in einem mehrstufigen Wärmetauschersystem auf 145 bis 170 °C erhitzt. Weitere Informationen zu den Vorteilen einer Desintegration liefert Kapitel 4.3.2.

Tabelle 9.2: Betriebsdaten der Lysotherm®-Anlage auf der KA Lingen (Hüer, 2013)

	Einheit	Erreichter Wert
Durchsatz Überschussschlamm (bei 5-6 %TR)	m <sup>3</sup> /h	3,2
Maximaler Durchfluss	m <sup>3</sup> /h	7,5
Hydrolysetemperatur	°C	145 – 170
Aufenthaltszeit	Min.	30 - 60

Die anaerobe Stabilisierung des vorbehandelten Überschussschlammes erfolgt in einer separaten Faulstufe (LysoGest®-Verfahren). Da Phosphor hauptsächlich im Überschussschlamm enthalten ist, wird durch die getrennte Behandlung eine höhere P-Konzentration im ausgefaulten Schlamm erreicht. Dies unterstützt die nachgeschaltete Phosphorrückgewinnung mittels Magnesium-Ammonium-Phosphat-Fällung (AirPrex®-Verfahren). Erhöhte Stickstoffrückbelastungen aus der Schlammmentwässerung können anschließend über eine energetisch effiziente Deammonifikation (DEMON®-Verfahren) reduziert werden. Das in Bild 9.10 dargestellte Schema der geplanten Optimierung der Schlammbehandlung zeigt die Anordnung der genannten Verfahren.

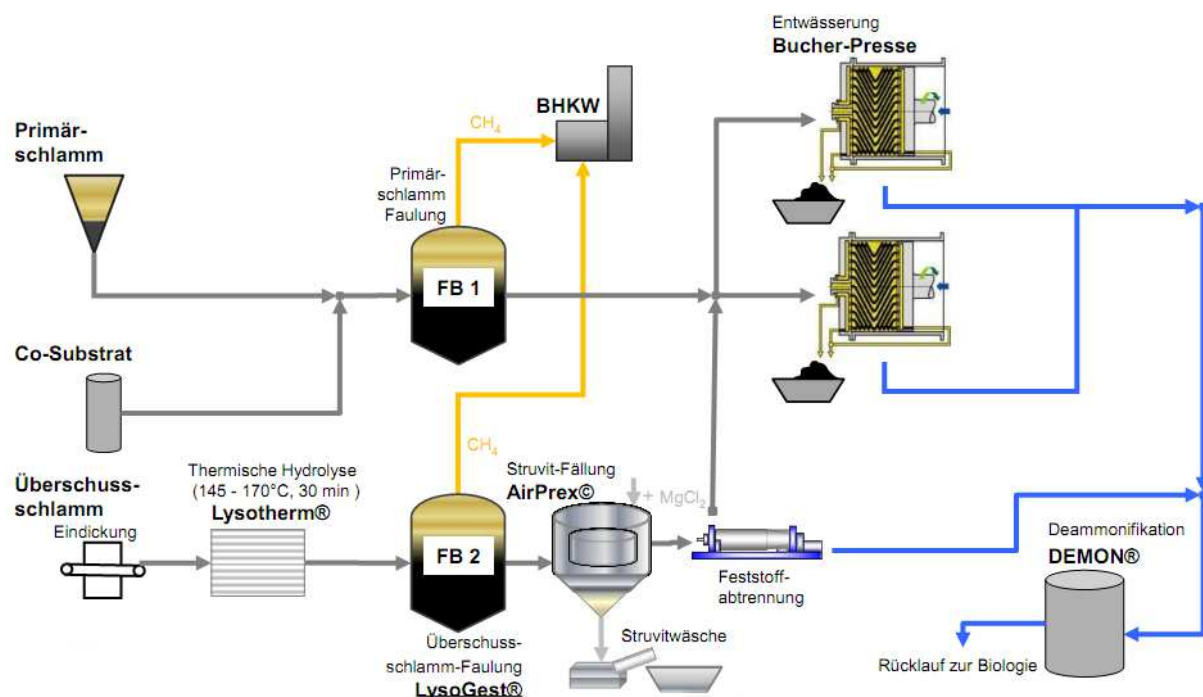


Bild 9.10: Optimierte Schlammbehandlung der KA Lingen (Hüer, 2013)

### Betriebsergebnisse

Das Forschungsprojekt auf der KA Lingen läuft bis Ende 2014. Die ersten Ergebnisse der thermischen Hydrolyse zeigen aber bereits eine Erhöhung der Gasproduktion um 15 %, bezogen auf den gesamten Rohschlammanfall. Zudem hat sich der oTR-Abbaugrad verbessert und der Entwässerungsgrad konnte von 26 auf 27,5% gesteigert werden (Hüer, 2013).

### Betriebserfahrungen

Die Lysotherm®-Anlage läuft betriebsstabil und vollautomatisch. Anfängliche Betriebsstörungen, konnten durch Anpassungen der Hydrolysat-Rückführung und Optimierungen der Schlammumpen behoben werden. Zudem konnte der Hydrolysegrad durch Optimierung der Parameter Temperatur und Druck weiter optimiert werden.

## 10 Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Anstrengungen unternommen, den Energieverbrauch der kommunalen Kläranlagen zu minimieren. In Nordrhein-Westfalen werden hierzu seit 1999 und bis heute Energieanalysen für kommunale Kläranlagen durch das Umweltministerium öffentlich gefördert. Neben einer Verbesserung der Energieeffizienz bei der Maschinen- und der Verfahrenstechnik, gehört zu den Teilschritten einer energetischen Optimierung auch die Steigerung der Klärgasproduktion und die Verbesserung der Eigenstromerzeugung. Anhand einer Betreiberabfrage und der Auswertung von durchgeführten Energieanalysen wurde der IST-Zustand in NRW ermittelt. Die entsprechenden Kennwerte zur Energieausbeute variieren dabei zum Teil erheblich und es ist davon auszugehen, dass für viele Kläranlagen nachwievor Optimierungspotential im Hinblick auf die Ausbeute an nutzbarer Energie besteht.

Die in dem Projekt hierzu aufbereiteten Ansatzpunkte sind vorrangig eine breite Informationsbasis für Betreiber von Faulungsanlagen aller Größenklassen. Es werden Hinweise zu betrieblich und technisch notwendigen Anpassungen für die Umsetzung gegeben wie auch energetische Potenziale und zugehörige Kosten aufgezeigt. Das im Rahmen des Projektes entwickelte stationäre Bilanzmodell ermöglicht dem Betreiber eine erste energetische Einordnung und Potenzialabschätzung seiner Kläranlage.

Für eine optimale Faulgasausbeute und -produktion ist ein energiereicher, im Feststoffgehalt konzentrierter Rohschlamm erforderlich, der in der Schlammfäulung soweit möglich aufzuschließen ist. Unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Abwasserreinigung und Schlammbehandlung ist bei der Entnahme des energiereichen Primärschlammes die Optimierung des C/N-Verhältnis im Zulauf der biologischen Stufe von großer Bedeutung. Die gezielte Rohschlammmentnahme in Verbindung mit einer Deammonifikation von Prozesswässern der Schlammwässerung, stellt hierfür einen der technisch umsetzbaren Verfahrensansätze dar. Der weitergehende Aufschluss der erzeugten organischen Schlammstruktur durch Integration einer Desintegration kann die Klärgasproduktion signifikant steigern, ist aber mit einem zusätzlichen verfahrensabhängigen Energieeigenverbrauch und einer erhöhten Rückbelastung verbunden. Hier ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden. Im Bereich der Schlammfäulung bietet die Umstellung auf eine zweistufige Hochlastfäulung das größte Potential zur Steigerung der Faulgaserzeugung.

Für die Verstromung des produzierten Faulgases in KWK-Anlagen stehen heute Aggregate mit einem gesteigerten elektrischen Wirkungsgrad zur Verfügung. Dieser hängt allerdings stark von der Leistungsgröße ab und erschwert damit insbesondere bei kleineren Anlagengrößen die Wirtschaftlichkeit einer aus energetischer Sicht wünschenswerten

Erneuerung. Die Wirtschaftlichkeit wird in großem Maße durch anlagenspezifische Randbedingungen bestimmt, wodurch in der Praxis nur selten alle theoretischen Annahmen zu Benutzungsstunden und verschleißbedingten Verlusten exakt zutreffen. Die in dieser Studie aufgezeigten Betrachtungen bieten dennoch die Möglichkeit, den Einsatz einer KWK-Anlage oder die Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches für spezifische Anlagensituationen zu bewerten und eine Grundlage der Entscheidungsfindung zu liefern.

Die auf lange Ausbauhorizonte ausgelegten Faulbehälter weisen Reservekapazitäten auf, die in Verbundkonzepten zur zusätzlichen Klärgaserzeugung genutzt werden könnten. Der Wärmeüberschuss, der bei den meisten Anlagen während der Sommermonate besteht, wird hierdurch in der Regel vergrößert. Verbundkonzepte, mit denen sowohl das Eingangssubstrat „Fremdschlamm“ auf die Faulraumkapazitäten optimiert als auch Wärme- und mögliche Stromüberschüsse an externe Nutzer abgegeben werden können, werden maßgeblich durch die Transportaufwendungen, die erforderlichen Leitungsanschlüsse und die erzielbaren Einspeisevergütungen beeinflusst. Durch die mengenmäßige wie auch die zeitliche begrenzte Verfügbarkeit sind sie nur im Einzelfall wirtschaftlich.

Das größte Steigerungspotenzial ergibt sich als wesentliches Ergebnis der Studie bei den bereits bestehenden Faulungsanlagen. Die zu betrachtenden Maßnahmen betreffen dabei die Optimierung der Schlammbereitstellung und verfahrenstechnischen Prozesse. Bei Kläranlagen mit simultaner aerober Schlammstabilisierung hat sich daneben die Grenze für die Wirtschaftlichkeit einer Umstellung auf separate Schlammfäulung in den letzten Jahren deutlich auf etwa 20.000 EW verschoben und eröffnet zusätzliches Potenzial für eine Steigerung der Klärgasproduktion. Schließlich besteht im Land Nordrhein-Westfalen ein nicht unerhebliches Nachrüstungspotenzial bei größeren Kläranlagen, die bisher noch nicht über eine Schlammfäulung bzw. eine Faulgasverstromung verfügen.

## Verzeichnis der Bilder

Bild 1.1:	Organigramm der Berichtsstruktur .....	2
Bild 2.1:	Schema zum elektrischen Energiehaushalt der Abwasserreinigung .....	3
Bild 2.2:	Zusammensetzung von Primär- und Überschussschlamm (Lindholm & Ossiansson, 2008).....	5
Bild 2.3:	CSB-Bilanz bei der simultanen aeroben und der anaeroben Schlammstabilisierung (LU, 2009) .....	8
Bild 2.4:	Energiebedarf für den Sauerstoffeintrag in der biologischen Stufe im Vergleich zu der Stromerzeugung aus dem produzierten Faulgas (LU, 2009) .....	8
Bild 2.5:	Energieausbeute bei der Abwasserreinigung (nach Gretzschel et al, 2012) .....	9
Bild 2.6:	Schema zu den Nutzungswegen bei der Faulgasverwertung.....	10
Bild 2.7:	KWK-Aggregate zur Nutzung des Faulgases.....	11
Bild 3.1:	Verteilung kommunaler Kläranlagen in NRW nach Ausbaugröße (LANUV, 2013) .....	13
Bild 3.2:	Verteilung der Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung in NRW .....	14
Bild 3.3:	Verteilung der Anschlussgrößen, errechnet aus der Belastung im Jahresmittel .....	15
Bild 3.4:	Verteilung der ausgewerteten Kläranlagen mit Faulung nach Größenklassen .....	16
Bild 3.5:	Verteilung der ausgewerteten Kläranlagen mit Faulung nach EW-Kategorien .....	16
Bild 3.6:	Summenlinie der berechneten Aufenthaltszeiten in der Vorklärung bei mittlerem Tageszufluss (nicht auf Trockenwetterzufluss bezogen) .....	18
Bild 3.7:	Spezifischer Schlammanfall je nach Schlammart.....	19
Bild 3.8:	Schlammanfall im Zulauf zur Faulung je nach Anschlussgröße der Anlage .....	20
Bild 3.9:	Spezifischer Primärschlammanfall in Abhängigkeit von der berechneten Aufenthaltszeit in der Vorklärung .....	20
Bild 3.10:	Gemessener Feststoffgehalt (%TR) der Schlammfraktionen .....	21
Bild 3.11:	Gemessener Organikanteil der Schlammfraktionen.....	22
Bild 3.12:	Prozentualer oTR-Abbaugrad in der Faulstufe.....	22
Bild 3.13:	Vorhandenes Faulvolumen in Abhängigkeit der Anschlussgröße .....	23
Bild 3.14:	mittlere Faulzeit in Abhängigkeit der Anschlussgröße.....	23
Bild 3.15:	Mittlere Raumbelastung der Faulstufe in Abhängigkeit der Anschlussgröße.....	24
Bild 3.16:	spezifischer Faulgasanfall (bezogen auf $EW_{CSB}$ inkl. $EW_{extern}$ ).....	25

Bild 3.17:	Spez. Faulgasanfall, bezogen auf zugeführte oTR-Fracht in Abhängigkeit der Anschlussgröße, ohne Anlagen mit Co-Vergärung oder externen Schlämmen .....	26
Bild 3.18:	Spez. Faulgasanfall, bezogen auf abgebaute oTR-Fracht in Abhängigkeit der Anschlussgröße, ohne Anlagen mit Co-Vergärung oder externen Schlämmen .....	26
Bild 3.19:	Statistische Auswertung des Gasertrages in Abhängigkeit der Vorklärzeit.....	27
Bild 3.20:	oTR-spezifische Gasausbeute in Abhängigkeit der Faulzeit .....	28
Bild 3.21:	Verteilung der errechneten Gasspeicherzeiten .....	29
Bild 3.22:	Verteilung des Faulgaseinsatzes je nach Anschlussgröße .....	30
Bild 3.23:	Errechneter Wirkungsgrad der Verstromung in Abhängigkeit der Anlagengröße.....	31
Bild 3.24:	Jahresverbrauch pro Kläranlage in Abhängigkeit der Anschlussgröße auf Basis der Belastung im Jahresmittel.....	32
Bild 3.25:	Spezifischer elektrischer Energieverbrauch in Abhängigkeit der Anlagengröße.....	33
Bild 3.26:	Statistische Auswertung des einwohnerspezifischen Stromverbrauchs .....	33
Bild 3.27:	spezifische Eigenproduktion .....	34
Bild 3.28:	Elektrischer Eigenversorgungsgrad in Abhängigkeit der Kläranlagengröße .....	34
Bild 3.29:	Verteilung der in den untersuchten Energieanalysen verwendeten Bezugsgrößen zur Ermittlung der mittleren Anlagenbelastung bzw. der Anschlussgröße.....	37
Bild 3.30:	Verteilung der Anschlussgrößen gemäß Angaben der Energieanalysen .....	37
Bild 3.31:	Spezifischer Stromverbrauch nach Verfahrensgruppen.....	38
Bild 3.32:	Spezifischer Stromverbrauch nach Verfahrensgruppen und Anschlussgrößen.....	39
Bild 3.33:	Verteilung des Stromverbrauchs auf die Verfahrensschritte der Abwasserbehandlung und Teilschritte der Schlammbehandlung.....	39
Bild 3.34:	Verteilung des einwohnerspezifischen Stromverbrauchs unterteilt nach Teilschritten der Schlammbehandlung.....	40
Bild 3.35:	Faulgasproduktion im IST-Zustand (Energieanalysen der Jahre 2007-2011) .....	41
Bild 3.36:	Summenlinien zur Gasnutzung (links) und Gasumwandlung (rechts) .....	42
Bild 3.37:	Eigenversorgungsgrad für Wärme und Elektrizität im IST-Zustand gemäß Energieanalysen.....	43
Bild 3.38:	Anzahl und Potential der Maßnahmen getrennt nach Verbrauchergruppen.....	44
Bild 3.39:	Faulgasausbeute vor und nach Umsetzung der Maßnahmen .....	45
Bild 3.40:	Grad der Faulgasnutzung vor und nach Umsetzung der Maßnahmen .....	47
Bild 3.41:	Gasumwandlung in Elektrizität vor und nach Umsetzung der Maßnahmen.....	47



Bild 3.42:	Strom-Eigenversorgungsgrad vor und nach Umsetzung der Maßnahmen.....	48
Bild 4.1:	Ansatzpunkte zur Steigerung des Faulgasertrags.....	50
Bild 4.2:	Notwendige Umbaumaßnahmen bei Umstellung der Schlammstabilisierung.....	51
Bild 4.3:	Vergleich der Projektkostenbarwerte von Schlammfäulung und aerober Stabilisierung bei steigenden Betriebskosten (Stromkosten) und einem festen Zinssatz von $i = 4,0 \%$ (Gretzschel et al., 2010).....	53
Bild 4.4:	Vergleich der Energiebilanz einer aeroben und einer anaeroben Schlammstabilisierung.....	54
Bild 4.5:	Untersuchte Einflussfaktoren der Abwasserreinigung auf den Schlammanfall.....	55
Bild 4.6:	Abhängigkeit der Absetzleistung von der Absetzzeit nach Sierp (Imhoff, 1999).....	57
Bild 4.7:	Eliminationsleistung der Vorklärung gemäß DWA-M-368.....	57
Bild 4.8:	Einfluss der Vorklärung auf die Faulgasproduktion ( $t_{TS}=15 \text{ d}$ , $T=15^\circ\text{C}$ ).....	58
Bild 4.9:	Abnahme der CSB-Konzentration bei verschiedenen Flockungsmitteldosierungen bzw. bei verschiedenen Durchflusszeiten (Wolter & Hahn, 2001).....	60
Bild 4.10:	Rechnerisch erreichbarer Gasertrag bei Vorfällung im Vergleich zu den Erträgen bei einfacher Sedimentation mit verschiedenen Aufenthaltszeiten.....	61
Bild 4.11:	Bemessungsschlammalter im Belebungsbecken nach ATV-DVWK-A 131 für eine vorgeschaltete Denitrifikation, $V_{DN}/V_{BB}=0,5$ und unterschiedliche Schwankungsfaktoren.....	63
Bild 4.12:	Auswirkung des Schlammalters auf den Gasertrag ( $t_{VK}=1 \text{ h}$ , $T=15^\circ\text{C}$ ).....	64
Bild 4.13:	Verfahren und Kennwerte einer Prozesswasserbehandlung (Volcke, 2006; Beier et al., 2008).....	65
Bild 4.14:	Einfluss einer Prozesswasserbehandlung auf die rechnerisch zulässige Vorklärdauer und den resultierenden Gasertrag in Abhängigkeit des C/N-Verhältnis im Zulauf zur Kläranlage.....	67
Bild 4.15:	Einflussfaktoren bei der Schlammbehandlung auf die Gasausbeute.....	68
Bild 4.16:	Schlammvolumen in Abhängigkeit des Feststoffgehaltes bei gleich bleibender Trockenmasse.....	69
Bild 4.17:	Gasanfall und Faulzeit in Abhängigkeit der Schlammeindickung. (Annahmen: 100% Gasanfall bei 20 Tagen Aufenthaltszeit, Feststoffgehalt 4% TR, Faulraumvolumen 40 l/EW).....	72
Bild 4.18:	Verfahren der Schlammdesintegration (nach Müller et al., 2001 und 2003).....	75
Bild 4.19:	Ansatzpunkte zur Steigerung der Gasausbeute bei der Schlammbehandlung.....	77
Bild 4.20:	Gasproduktion und Abbaugrad in Abhängigkeit der Faulzeit (Grüning et al., 1997).....	78
Bild 4.21:	Gasausbeute in Abhängigkeit der Faulzeit bezogen auf $oTR_{zu}$ .....	79

Bild 4.22:	Auswirkungen einer unzureichenden Durchmischung des Faulraums (qualitative Darstellung).....	80
Bild 4.23:	Einfluss durch Totzonen infolge Ablagerungen im Faulraum auf den Gasertrag .....	82
Bild 4.24:	Verfahrensvarianten einer einstufigen und mehrstufigen Faulung .....	83
Bild 4.25:	Faulung mit nachträglich integrierter Hochlaststufe (Kempter-Regel et al., 2003) .....	84
Bild 4.26:	Schema einer zweistufigen Hochlastfaulung mit Mikrofiltration (IGB, 2008) .....	84
Bild 4.27:	Vergleich einstufiger und zweistufiger Faulung (Roediger et al., 1990).....	85
Bild 4.28:	Abhängigkeit der Faulzeit zur Erreichung der technischen Faulgrenze von der Temperatur (ATV-DVWK,2003) .....	87
Bild 4.29:	Kläranlage Fischingen (Quelle Bailer, 2009).....	88
Bild 4.30:	Entwicklung des Gasertrags bei Temperaturerhöhung, bezogen auf die Faulzeit.....	89
Bild 4.31:	Wärmebilanz bei einer konstanten Faulraumtemperatur von 37 °C .....	90
Bild 4.32:	Wärmebilanz und resultierende Faultemperatur bei vollständiger Nutzung der Wärmeproduktion .....	91
Bild 4.33:	Schema zum Restgaspotential aus Faulschlamm bei der Nacheindickung.....	92
Bild 4.34:	Nachrüsten eines Schlammstapelbehälters (AVA, 2012) (links: Abdeckung mit Gasfassung, rechts: Einbau eines Rührwerks).....	93
Bild 4.35:	Faulschlamm-Vakuummentgasung (Fa. Pondus Verfahrenstechnik GmbH).....	93
Bild 4.36:	Gasproduktion unterschiedlicher stabilisierter Faulschlämme, bezogen auf die zugeführte organische Trockensubstanz (WiW, 2013) .....	94
Bild 4.37:	Zusätzliches Faulgaspotential durch Ausgasung bzw. Nachfaulung der Restorganik .....	95
Bild 4.38:	Zusammenfassung der Auswirkungen auf den Gasertrag .....	97
Bild 5.1:	Vergleich der elektrischen Nennwirkungsgrade aus der Datenerhebung mit Marktanalysen aus den Jahren 2005 und 2011.....	100
Bild 5.2	Elektrische Wirkungsgrade von Kraftwerken (FIZ, 2010) .....	103
Bild 5.3	100 kW <sub>el</sub> -BHKW-Modul bei Werksabnahme .....	106
Bild 5.4	2 x 65 kW <sub>el</sub> -Mikrogasturbinen auf der KA Warendorf .....	109
Bild 5.5	Brennstoffzellentypen und deren Funktionsweise (EnergieAgentur.NRW)....	110
Bild 5.6	Brennstoffzelle (CFC Solutions, 2005).....	111
Bild 5.7	Schematische Darstellung eines ORC-Prozesses. ....	113
Bild 5.8:	Spezifische Richtpreise von Biogas-BHKW (ASUE, 2011) .....	118
Bild 5.9:	Kostenfunktion Peripherie von Faulgas-BHKW.....	119
Bild 5.10:	Spezifische Richtpreise für Instandhaltungsverträge von Biogas-BHKW (ASUE, 2011) .....	120

Bild 5.11:	Spezifische Richtpreise für die Generalüberholung von Biogas-BHKW (ASUE, 2011) .....	120
Bild 5.12:	Stromgestehungskosten der Gasnutzungsaggregate .....	123
Bild 5.13:	Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 50 kW <sub>el</sub> -BHKW .....	126
Bild 5.14:	Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden einer 65 kW <sub>el</sub> -Mikrogasturbine.....	126
Bild 5.15:	Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 100 kW <sub>el</sub> -BHKW.....	127
Bild 5.16:	Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden einer 200 kW <sub>el</sub> -Mikrogasturbine.....	127
Bild 5.17:	Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 200 kW <sub>el</sub> -BHKW.....	127
Bild 5.18:	Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 400 kW <sub>el</sub> -BHKW.....	128
Bild 5.19:	Summe der Einsparungen und Erlöse in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden eines 1.200 kW <sub>el</sub> -BHKW.....	128
Bild 5.20:	Faulgasbezogene Einsparungen der Gasnutzungsaggregate in Abhängigkeit von den Vollbenutzungsstunden .....	129
Bild 5.21:	Elektrische und thermische Nettowirkungsgrade Bestands- und Repowering-BHKW .....	131
Bild 5.22:	Vergleich der Stromgestehungskosten eines Bestands- und eines Repowering-BHKW mit einer Leistung von 200 kW <sub>el</sub> .....	132
Bild 5.23:	Vergleich der Stromgestehungskosten von Bestands- und Repowering-BHKW bei 7.000 Vollbenutzungsstunden .....	132
Bild 5.24:	Vergleich der faulgasbezogenen Einsparungen eines Bestands- und eines Repowering-BHKW mit einer Leistung von 200 kW <sub>el</sub> .....	133
Bild 5.25:	Vergleich der faulgasbezogenen Einsparungen von Bestands- und Repowering-BHKW bei 4.000 VBh .....	134
Bild 5.26:	Vergleich der faulgasbezogenen Einsparungen von Bestands- und Repowering-BHKW bei 7.000 VBh .....	134
Bild 5.27:	Vermiedene Energiebezugskosten von Repowering-BHKW und Heizkessel bei mittleren Strombezugskosten von 14 ct/kWh. ....	136
Bild 5.28:	Vermiedene Energiebezugskosten von Repowering-BHKW und Heizkessel bei mittleren Strombezugskosten von 18 ct/kWh .....	136
Bild 5.29:	Entscheidung zwischen Heizkessel und Repowering-BHKW in Abhängigkeit von der BHKW-Leistung und den Vollbenutzungsstunden bei mittleren Strombezugskosten zwischen 14 ct/kWh und 18 ct/kWh.....	137
Bild 5.30:	Entscheidung zwischen Heizkessel und Repowering-BHKW in Abhängigkeit von der BHKW-Leistung und den Vollbenutzungsstunden bei mittleren Strombezugskosten zwischen 14 ct/kWh und 18 ct/kWh und 80 % sinnvoller Wärmeerzeugung aus Faulgas.....	138
Bild 5.31:	Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 7.000 VBh und mit 0 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust .....	139

Bild 5.32:	Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 7.000 VBh und mit 15 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust .....	140
Bild 5.33:	Bewertungsdiagramm zur Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 7.000 VBh im Bereich zwischen 0 % mit 15 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust.....	141
Bild 5.34:	Bewertungsdiagramm zur Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 4.000 VBh im Bereich zwischen 0 % mit 15 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust.....	141
Bild 5.35:	Vermiedene CO <sub>2</sub> -Emissionen eines neuen BHKW im Vergleich zur reinen Wärmeerzeugung .....	142
Bild 5.36:	Vermiedene Energiebezugskosten von Repowering-BHKW und Heizkessel bei mittleren Strombezugskosten von 14 ct/kWh. ....	143
Bild 5.37:	Vermiedene CO <sub>2</sub> -Emissionen durch Bestands-BHKW, Repowering-BHKW und Mikrogasturbinen.....	143
Bild 5.38:	Absolute Veränderung der faulgasbezogenen Einsparungen bei einer Veränderung des mittleren Strombezugspreises um 1 ct/kWh.....	144
Bild 5.39:	Elektrische Nettowirkungsgrade von Bestands- und Repowering-BHKW ohne verschleißbedingten Verlust.....	146
Bild 6.1:	Strombedarf und Strombedarfsdeckung aus den BHKW und EVU-Strombezug der Modellanlage .....	150
Bild 6.2:	Wärmebedarf und Wärmebedarfsdeckung aus den BHKW der Modellanlage .....	150
Bild 6.3:	Prinzip des Regenerativverbundes .....	151
Bild 6.4:	Integration einer 200 kWp PV-Anlage in die Modellanlage in der ersten Maiwoche .....	153
Bild 6.5:	Prinzip des Schlammverbundes .....	154
Bild 6.6:	Vergleich von Transportkosten und vermiedenen Energiebezugskosten .....	155
Bild 6.7:	Vergleich transportbedingter CO <sub>2</sub> -Emissionen und vermiedener CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	156
Bild 6.8:	Strombezug vor und nach Integration von Fremdschlamm .....	157
Bild 6.9:	Deckung des Wärmebedarfes auf der Modellanlage .....	158
Bild 6.10:	Prinzip des Wärmeverbundes.....	158
Bild 6.11:	Wärmebereitstellung beim Wärmekunden .....	159
Bild 7.1:	Linke Seite des Arbeitsblatts „Eingabe“ .....	163
Bild 7.2:	Rechte Seite des Arbeitsblatts „Eingabe“.....	164
Bild 7.3:	CSB-Bilanz der Kläranlage A.....	169
Bild 7.4:	CSB-Bilanz der Kläranlage B.....	172
Bild 7.5:	CSB-Bilanz der Kläranlage C.....	175
Bild 8.1:	Übertrag der ausgewerteten Daten auf alle Kläranlagen mit Faulung in NRW.....	181
Bild 8.2:	Szenario 1: Verfahrensumstellung auf anaerobe Stabilisierung .....	182

Bild 8.3:	Investitionskosten für Umstellung einer Kläranlage auf anaerobe Stabilisierung (Kostenfunktion nach Gretzschel et al., 2010) .....	183
Bild 8.4:	Optimierungspotential einer Verfahrensumstellung auf anaerobe Stabilisierung bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße über 20.000 EW für NRW.....	184
Bild 8.5:	Szenario 2: Primärschlammmentnahme steigern.....	185
Bild 8.6:	Optimierungspotential einer erhöhten Primärschlammmentnahme in NRW.....	186
Bild 8.7:	Szenario 3: Schlammalter senken .....	187
Bild 8.8:	Optimierungspotential durch Absenkung des Schlammalters in NRW .....	188
Bild 8.9:	Szenario 4: Alle Faulungsanlagen mit KWK ausrüsten .....	189
Bild 8.10:	Optimierungspotential durch Nachrüstung von KWK-Aggregaten in NRW....	190
Bild 8.11:	Szenario 5: Wirkungsgrad der Stromerzeugung steigern.....	191
Bild 8.12:	Optimierungspotential durch Modernisierung von KWK-Aggregaten in NRW.....	192
Bild 8.13:	Szenario 6: Freie Faulbehälterkapazitäten nutzen .....	193
Bild 8.14:	Optimierungspotential durch Ausnutzung freier Faulbehälterkapazitäten in NRW .....	194
Bild 8.15:	Vergleich der verschiedenen Szenarien (Kategorien I – IV).....	195
Bild 8.16:	Wirtschaftlichkeit der Szenarien in Abhängigkeit des Strombezugpreises (Sensitivitätsanalyse).....	196
Bild 9.1:	Schema der Kläranlage Büchel (Aggerverband).....	198
Bild 9.2:	Mittlere Monatswerte der Eigenstromproduktion und des Fremdbezugs im Vergleich zu den erreichten Betriebsstunden des BHKWs.....	199
Bild 9.3:	Vorhandenes BHKW auf der Kläranlage Büchel (seit X in Betrieb).....	199
Bild 9.4:	Schema der Kläranlage Engelskirchen.....	200
Bild 9.5:	Monatlicher Fremdstrombezug vor und nach Austausch des BHKWs .....	201
Bild 9.6:	Neues BHKW-Modul der Kläranlage Engelskirchen, Baujahr 2011.....	201
Bild 9.7:	Schema der Kläranlage Warendorf.....	202
Bild 9.8:	Mikrogasturbinen mit Gasaufbereitung (Capstone, 2 x 65kW <sub>el</sub> ) .....	203
Bild 9.9:	Luftbild der Kläranlage Lingen (Hüer, 2013) .....	204
Bild 9.10:	Optimierte Schlammbehandlung der KA Lingen (Hüer, 2013).....	205
Bild 10.1:	Verwendeter Fragebogen im Rahmen des Projektes TP2 .....	224

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1: Energiegehalt und Gasertrag der verschiedenen Bestandteile der Organik.....	5
Tabelle 2.2: Schlammmanfall und –beschaffenheit (nach ATV-DVWK , 2003).....	6
Tabelle 2.3: Verfahrensübersicht der Faulgasaufbereitung (Schürig, 2010) .....	12
Tabelle 3.1: Kennwerte bei Einsatz einer Co-Fermentation (MUNLV, 2001).....	24
Tabelle 3.2: Gasertrag in Abhängigkeit der Vorklärzeit im Vergleich zu Literaturwerten .....	27
Tabelle 3.3: Kläranlagen mit Aggregaten zur Verstromung des Faulgases .....	30
Tabelle 3.4: Kennzahlen im Überblick (Median nach Anschlussgröße) .....	35
Tabelle 3.5: Verfahrensbereiche vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen innerhalb der Schlammbehandlung mit Angaben zu Kosten und Nutzen .....	45
Tabelle 3.6: Kosten und Nutzen der Maßnahmen zur Optimierung der Faulgasnutzung.....	46
Tabelle 4.1: Prozentuale Abscheideleistung in der Vorklärung in Abhängigkeit der Vorklärdauer bzw. einer Vorfällung.....	60
Tabelle 4.2: Eingangsdaten zur Bilanzierung einer Prozesswasserbehandlung .....	66
Tabelle 4.3: Einfluss einer Prozesswasserbehandlung auf die Denitrifikationskapazität bei verschiedenen Vorklärzeiten (vorgesaltete Denitrifikation) .....	67
Tabelle 4.4: Austrags-Feststoffgehalt [%TR], FHM-Verbrauch und Energieverbrauch verschiedener Eindick-Systeme (ATV-DVWK, 2003).....	70
Tabelle 4.5: Auswirkung des Feststoffgehaltes auf die Faulzeit und Gasertrag (Annahme: vorhandenes Faulraumvolumen 40 l/EW).....	71
Tabelle 4.6: Literaturlauswertung der Leistungsfähigkeit verschiedener Desintegrationsverfahren.....	76
Tabelle 4.7: Zusammenfassung der untersuchten Maßnahmen.....	96
Tabelle 5.1: Beispiel für Anforderungen an das eingesetzte Faulgas (MWM, 2011).....	105
Tabelle 5.2: NO <sub>x</sub> - und CO-Grenzwerte für Gasmotoren (TA Luft 2002, 2002) .....	108
Tabelle 5.3: Chemische und thermodynamische Grenzwerte für den Einsatz von Brenngasen in verschiedenen Brennstoffzellentypen (Blesl et al., 2004) .....	111
Tabelle 5.4: Abwärmequellen einer BHKW-Anlage zur Nutzung in ORC-Anlagen.....	114
Tabelle 5.5: Wirtschaftliche und technische Grundannahmen der Modellrechnung.....	115
Tabelle 5.6: Technische Eigenschaften und Erzeugungsdaten der betrachteten Gasnutzungsaggregate .....	117
Tabelle 5.7: Investitions- und Betriebskosten der Gasnutzungsaggregate .....	121
Tabelle 5.8: KWK-Zuschlag je Leistungsbestandteil nach §7 Abs. 1 + 2 KWKG 2002.....	125
Tabelle 5.9: Einsparungen und Erlöse aus dem Betrieb der Gasnutzungsaggregate .....	125
Tabelle 5.10: Anlagendaten der Bestands-BHKW .....	131
Tabelle 7.1: Annahmen für die ergänzenden Parameter .....	165
Tabelle 7.2: Ausgangsparameter der Kläranlage A für das Jahr 2012 (Mittelwerte) .....	168

---

Tabelle 7.3: Kennzahlen der Kläranlage A .....	169
Tabelle 7.4: Ausgangsparameter der Kläranlage B für das Jahr 2011 (Mittelwerte) .....	171
Tabelle 7.5: Kennzahlen der Kläranlage B .....	172
Tabelle 7.6: Ausgangsparameter der Kläranlage C für das Jahr 2012 (Mittelwerte) .....	174
Tabelle 7.7: Kennzahlen der Kläranlage C .....	175
Tabelle 7.8: Kennzahlen der Variantenbetrachtung.....	177
Tabelle 8.1: Betrachtete Szenarien .....	179
Tabelle 8.2: Verwendete Ansätze zur Szenarienberechnung .....	180
Tabelle 8.3: Ist-Zustand Faulgasanfall und Faulgasnutzung in NRW (Hochrechnung) .....	181
Tabelle 8.4: Faulungsanlagen in NRW ohne Faulgasverstromung.....	189
Tabelle 8.5: Aggregate zur Faulgasverstromung in NRW.....	191
Tabelle 9.1: Daten der KWK-Aggregate auf der Kläranlage Engelskirchen .....	200

## Literaturverzeichnis

- ASUE (2005): BHKW-Kenndaten 2005. Module, Anbieter, Kosten. ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) und Energiereferat der Stadt Frankfurt, Kaiserslautern und Frankfurt.
- ASUE (2011): BHKW-Kenndaten 2011. Module, Anbieter, Kosten. ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) und Energiereferat der Stadt Frankfurt, Kaiserslautern und Frankfurt.
- ATV-DVWK (2000): *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*, Arbeitsblatt 131, Hennef
- ATV-DVWK (2003): Merkblatt ATV-DVWK-M 368, Biologische Stabilisierung von Klärschlamm, ATV-DVWK-Regelwerk
- AVA (2012): Abwasserverband Altenrhein, Geschäftsbericht 2012, veröffentlicht auf: <http://www.ava-altenrhein.ch/>
- Bailer E. (2011): Wirtschaftlicher Faulraumbetrieb auch bei kleinen Kläranlagen. In: KA-Betriebs-Info, Jg. 41, H. 2, S. 1834–1837.
- Beier, M.; Sander, M.; Schneider Y.; Rosenwinkel K.-H. (2008): Energieeffiziente Stickstoff elimination. Verfahrensüberblick zur Nitritation / Deammonifikation und Auswirkungen auf den Energiebedarf von Kläranlagen. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall, Jg. 55, H. 6, S. 671–678.
- Blesl, M., & Ohl, M. (2006): Entwicklungsstand und Entwicklungsbedarf stationärer Brennstoffzellen. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Blesl, M., Fahl, U., & Ohl, M. (2011): Ganzheitliche Bewertung innovativer mobiler thermischer Energiespeicherkonzepte für Baden-Württemberg auf Basis branche- und betriebspezifischer Wärmebedarfsstrukturen. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Blesl, M., Fahl, U., Keicher, K., Krampe, J., Ohl, M., & Rott, U. (2004): Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen. Baden-Württemberg: Universität Stuttgart.
- BMF (2002): AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter („AV“). Bundesministerium für Finanzen, Berlin, 2002.
- Bormann H.; Sievers, M.; Ewert, W. (2009): Auswirkungen der thermischen Klärschlammhydrolyse und der prozessintegrierten Nährstoffrückgewinnung auf die



- Stoffstrom- und Energiebilanzen auf Kläranlagen. Hrsg. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) - Osnabrück
- Cornel, P. (2006): Potenziale zur Betriebskosteneinsparung bei der Abwasserableitung und -behandlung. In: neue maschinen- und verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Einsparung von Betriebskosten bei der Abwasserbehandlung. In: WAR 176, S. 1-18, Darmstadt, 2006
- DESTATIS (2013): Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2000 bis April 2013. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- DWA (2000): DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3: Rückbelastung aus der Schlammbehandlung. In: KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 47, 8, 1181 – 1187.
- DWA (2009): Merkblatt DWA-M 380, Co-Vergärung in kommunalen Klärschlamm-faulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, e.V.,
- EAWAG (2010): Anaerobe Behandlung kommunaler Abwässer in der Schweiz
- Eckert, F. (2008): Patentnr. DE 20 2007 018 540 U1. Deutschland.
- Ebner C. (2013): In den Faulturm hineinschauen. In: KA-Betriebs-Info, Jg. 43, April 2013, S. 2092–2094
- Faulstich M.; Prechtl S. (2005): Optimierte Durchmischung von Biogasreaktoren. ATZ-Entwicklungszentrum. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. München, 2005
- Fa. Ensole (2013): Niedrig Energie Desintegration. Ensola AG, Datenblatt, [http://www.ensola.com/cms/images/stories/2012\\_inhalte/pdf/datenblatt-ensola-desintegration.pdf](http://www.ensola.com/cms/images/stories/2012_inhalte/pdf/datenblatt-ensola-desintegration.pdf) (zuletzt abgerufen 06/2013)
- Fa. Pondus (2013): Untersuchungen zum thermisch-chemischen Zellaufschluss auf der Kläranlage Gifhorn. Pondus-Verfahrenstechnik GmbH, Broschüre, <http://www.pondus-verfahren.de/zellaufschluss-gifhorn.pdf> (zuletzt abgerufen 06/2013)
- Fa. Süd-Chemie (2013): *Elektrokinetische Desintegration – kostengünstig, einfach, effektiv*, Datenblatt, <http://www.initiative-co2.de/virtuelle-welt/pdf/elektrokinetische-Desintegration.pdf> (zuletzt abgerufen am 06/2013)
- FIZ (2010): Grafik *Elektrische Wirkungsgrade von Kraftwerken*. Abgerufen am 14.05.2013: [http://kraftwerkforschung.info/fileadmin/user\\_upload/Bilder/Peter-QuickInfos/](http://kraftwerkforschung.info/fileadmin/user_upload/Bilder/Peter-QuickInfos/)

- Grundbegriff/Wirkungsgrade\_Kraftwerke.jpg. Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe Gesellschaft für wiss.-technische Information mbH, Karlsruhe.
- Frey, W. (2012): Stand und Trends bei der Faulgasverwertung auf Kläranlagen. Wiener Mitteilungen - Standortbestimmung in der Wassergütwirtschaft , Band 226.
- Görres, J. (2007): Einsatz einer Brennstoffzelle im Klärwerk Stuttgart-Möhringen. In: J. Krampe, & H. Steinmetz, Innovative Energiekonzepte für Kläranlagen. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH.
- Gretzschel, O.; Hansen, J.; Siekmann, K.; Jakob, J.; Schmitt, T.G. (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. Kaiserslautern.
- Gretzschel, O.; Hansen, J.; Siekmann, K.; Jakob, J.; Schmitt, T.G. (2011): Neuberwertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz - NAwaS. Modul 2 - Weitergehende Untersuchungen. Kaiserslautern.
- Grüning H., Orth H., Knollmann J. (1997): Untersuchungen zum Gaspotential von Faulschlämmen *In: Korrespondenz Abwasser 1997, Nr.5*
- Haber Kern, B., Maier, W., & Schneider, U. (2006): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Universitäten Stuttgart und TU Kaiserslautern sowie Ryser Ingenieure Bern. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Horn H.; Günthert F.W.; Bischof F. (2009): Kläranlage der Zukunft – Themenbereiche Faulgasproduktion, Anaerobtechnik und Deammonifikation.
- Hür L. (2013): Förderprojekt „Plus-Energie-Kläranlage mit Phosphorrückgewinnung der Stadt Lingen“. In: Tagungsband zur DWA-Veranstaltung „Energietage – Biogas“, 9.-11.Sept. 2013 in Garching.
- Imhoff, K. u. K. R. (1999): *Taschenbuch der Stadtentwässerung*, Oldenburg Verlag, München
- IGB (2008): Energieeffiziente Kläranlagen – Hochlastfaulung für Klärschlamm, Broschüre, Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, 2008
- Jardin N. (2012): Energieautarkie durch die Deammonifikation von Schlammwasser aus der Entwässerung?, In: Schriftenband Aachen 230

- Keicher, K., Maier, W., & Schneider, U. (2007): ORC-Technologie zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades bei Blockheizkraftwerken. In: J. Krampe, & H. Steinmetz, Innovative Energiekonzepte für Kläranlagen. München: Oldenbourg GmbH.
- Kempton-Regel B., Trösch W., Oehlke M., Weber J. (2003): Integration einer Hochlastfaulung in die herkömmliche Technik, In: Korrespondenz Abwasser 2003(11)
- Kolisch, G. (2011): Aufbereitung und Einspeisung von Faulgas auf kommunalen Kläranlagen. Bezirksregierung Düsseldorf, Düsseldorf.
- Konstantin, Panos (2009): Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt, Springer, Berlin.
- Kristensen G. H., Jörgensen P. E., Strube R., Henze M. (1992): Combined Pre-Precipitation, biological Sludge Hydrolysis and Nitrogen Reduction – a Pilot Demonstration of integrated nutrient removal. In: War. Sci. tech. Vol. 26, No: 5-6, S 1067 – 1066.
- Kunz P. (1989): Nutzung von Faulgas, Technische und strategische Überlegungen, In: Abwassertechnik (1989) Heft 6, Seite 26-31
- LANUV-NRW (2013): Daten des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). Datenquellen: NIKLAS-KOM (kommunales Kläranlagenkataster) und ELWAS (elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem). Datenstand 2012
- LAWA (2012): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- Levy G. A. (2009): Energieoptimierung auf Kläranlagen, In: Gas, Wasser, Abwasser (2009) Heft 6, Seite 453 – 459
- Lindholm, O. & Ossiansson E (2008): Modeling Anaerobic Digestion. Master Thesis, Department of Chemical Engineering, Lund University, 2008
- Locher C. (2012): Anaerobe Behandlung von Abwasserkonzentraten aus der Halbstoffherzeugung von Papierfabriken, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 212
- LU (2009): *Energieeinsatz auf Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern, Leitfaden zur Optimierung*. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin

- MUNLV NRW (2001): *Co-Fermentation von biogenen Abfällen in Faulbehältern von Kläranlagen*. Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- MURL NRW (1999): *Handbuch ‚Energie in Kläranlagen‘*. Ministerium für Umweltschutz, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- Müller, J.; Eder, B.; Günthert, F. W.; Hruschka, H.; Kopp, J.; Kunz, P. M.; Oles, J.; Schmelz, K.-G.; Seiler, K. und Thiem, A. (2001): *Verfahrensvergleich und Ergebnisse der mechanischen Klärschlamm-Desintegration*. 2. Arbeitsbericht der ATV/DVWK Arbeitsgruppe AK-1.6, Hennef
- Müller, J.; Böcker, K.; Eder, B.; Kopp, J.; Kunz, P. M.; Neis, U.; Oles, J.; Otte-Witte, R.; Schmelz, K.-G.; Seiler, K. und Thiem, A. (2003): *Thermische, chemische und biochemische Desintegrationsverfahren*. 3. Arbeitsbericht der ATV/DVWK Arbeitsgruppe AK-1.6, Hennef
- Müller, J.; Böcker, K.; Koplow, O.; Oles, J.; Reipa, A.; Schmelz, K.-G. und Seiler, K. (2009): *Energiebilanz der Desintegration*. 5. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe AK-1.6, Hennef
- Müller, E.A.; Kobel, B.; Schmid, F. et al (2008): *Handbuch Energie in ARA*, Bezug: Verband Schweizerischer Abwasser und Gewässerschutzleute VSA, Zürich.
- Nickel, K. (2005): Was können wir von der Schlamm-Desintegration mit Ultraschall erwarten?  
In: Neis, U. (Ed.) *Ultraschall in der Umwelttechnik III*. TU Hamburg-Harburg Reports on Sanitary Engineering, 50, ISBN 3-930400-69-3: 123-137.
- Roediger, H.; Roediger, M.; Kapp H. (1990): *Anaerobe alkalische Schlammfäulung*. 4. Auflage, München: Oldenbourg.
- Roediger M. (1997): Bemessungsvorschlag für Schlammfäulungsanlagen. *In: Korrespondenz Abwasser 1997 (10)*
- Rosenwinkel, K.-H.; Beier, M. und Sander, M. (2011): *Verbesserung der Energiebilanz durch Deammonifikation*. Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Band 223, Aachen
- Roth M. (2007): *Funktionsstörungen auf Kläranlagen*, Vorlesungsunterlagen Universität Stuttgart
- Saure, T. (2005): *Betriebserfahrung mit der klärgasbetriebenen Brennstoffzelle Köln-Rodenkirchen*. Potsdam.

- Schmellz K-G., Müller J. (2004): Klärschlammdeintegration zur Verbesserung der Faulung – Ergebnisse großtechnischer Parallelversuche. *In: Korrespondenz Abwasser 2004 (51) Nr.6 S. 632-642.*
- Schurig H. & Schäfer A. (2010): Möglichkeiten der Faulgasaufbereitung zu Biomethan. *In: DVGW energie | wasser-praxis 5/2010 S. 51-57*
- UBA (2012a): Daten zum Verkehr. Umweltbundesamt, Dessau.
- UBA (2012b): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau.
- Urban, W. Lohmann, H., Girod, K. (2009): Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und sowie zur Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008. Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen.
- VIK. (1999): Brennstoffzellen. Verband der Industriellen Energie und Kraftwerkswirtschaft e.V. Essen 1999: VIK-Berichte Nr. 214.
- Volcke, E.I.P., van Hulle, S.W.H., Donckels, B.M.R., van Loosdrecht, M.C.M., Vanrolleghem, P.A. (2005). Coupling the SHARON process with Anammox: Model-based scenario analysis with focus on operating costs. *Water Science & Technology 52(4), 107 – 115*
- Waerdt, S. (2006): Biogasnutzung mit ORC-Anlagen und Gasmotoren. Willich: Pro2 Anlagentechnik GmbH.
- Wolff H.-J.; Nickel K.; Houy A.; Lunden A.; Neis U. (2009): *Intensivierung der anaeroben Schlammstabilisierung mit Ultraschall – Langjährige Erfahrungen auf der Kläranlage Bamberg.* *In: Korrespondenz Abwasser 2009 (56) Nr.5 S. 492-498.*
- Wolter, C. und Hahn H. H. (2001): *Absetzvorgänge in Vorklärbecken und deren Einflüsse auf die Leistung der biologischen Stufe,* *In: Korrespondenz Abwasser 2001(32) Nr.3*

## Anhang

# Anhang zu Kapitel 3

**Fragebogen: Klärgasnutzung und Faulraumvolumen in NRW**

Förderschwerpunkt: "Klima und Energie"  
 Teilprojekt 2: "Verbesserung der Klärgasnutzung und Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen"

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

Sehr geehrte Damen und Herren,

der vorliegende Fragebogen dient dazu, die Energieausbeute und die Effizienz der Klärgasnutzung in NRW zu ermitteln und in Referenzwerte zu überführen. Anhand dieser Werte werden Technologien bewertet, die eine Verbesserung der Klärgasnutzung ermöglichen. Es wird ein Bilanzmodell entwickelt, welches allen Betreibern ermöglichen soll, den Einsatz dieser Technologien zu vergleichen und das Potential abzuschätzen.

Wir bedanken uns für Ihre Mitarbeit!

---

**1. Allgemeines**

Kläranlage	Bezeichnung			
	Plz, Ort			
	Betreiber			
	Ausbaugröße			
			[EW]	
Ansprechpartner	Name			
	Telefon			
	Email			
Angegebene Daten	Bezugsjahr		Hinweis: Bitte geben Sie die Daten nachfolgend als Mittelwerte für das Bezugsjahr an.	

**2. Abwasserreinigung**

Zulauf Kläranlage	Wassermenge		[m³/d]
	CSB-Fracht		[kg CSB/d]
	Feststofffracht (AFS)		[kg AFS/d]
	N <sub>ges</sub> -Fracht		[kg N <sub>ges</sub> /d]
Vorklärung	Volumen		[m³]
biologische Reinigung	Schlammalter t <sub>rs</sub>		[d]

**4. Schlammfall**

	m³/a	%TR	%GV
Zulauf Faulstufe	Primärschlamm		
	Überschussschlamm		
	alternativ: Rohschlamm		
	Externe Schlämme		
	Co-Substrate		
Ablauf Faulstufe	Faulschlamm		

**5. Faulstufe**

Anzahl Faulbehälter		[Stk.]		
Gesamtvolumen der Faulstufe		[m³]		
Verfahrensweise	<input type="checkbox"/> einstufig	<input type="checkbox"/> zweistufig		
Umwälzung Faulraum	<input type="checkbox"/> Mischer	<input type="checkbox"/> Umwälzpumpen	<input type="checkbox"/> Gaseinpressung	
Temperatur	<input type="checkbox"/> 30-33 °C	<input type="checkbox"/> 34-37 °C	<input type="checkbox"/> 38-40 °C	<input type="checkbox"/> > 40 °C

**6. Klärgas**

Klärgasanfall		[m³/a]
Methan-Gehalt		[%]
als Normkubikmeter gemessen?	<input type="checkbox"/> [ja]	<input type="checkbox"/> [nein]

**7. Klärgasnutzung**

Aufteilung	Heizung		[m³/a]		
	Stromerzeugung		[m³/a]		
	Fackel		[m³/a]		
	Direktantrieb (Verdichter)		[m³/a]		
Speicherung und Aufbereitung	Gasspeicher		[m³]		
	Gasreinigung	<input type="checkbox"/> Trocknung	<input type="checkbox"/> Schwefel	<input type="checkbox"/> Siloxane	<input type="checkbox"/> CO <sub>2</sub>
	Verstromung	Art (BHKW, Mikrogasturbine etc.)	Typ 1	Typ 2 falls vorhanden	Typ 3 falls vorhanden
		Anzahl			
Nennleistung					
elektr. Nennwirkungsgrad					
therm. Nennwirkungsgrad					
Betriebsweise	<input type="checkbox"/> stromgeführt	<input type="checkbox"/> wärmegeführt	<input type="checkbox"/> gemischt		
Stromfremdbezug der Kläranlage		[kWh/a]			
Stromeigenerzeugung		[kWh/a]			

**8. Sonstiges**

z.B. zusätzliche Verfahren (Vorfällung, Desintegration etc.)

---

Kontakt für Rückfragen: Wuppertal

Wuppertal

Dipl.-Ing. Yannick Taudien  
 Tel.: 0202-583-287  
 Email: ytn@wuppertal.de

Bild 10.1: Verwendeter Fragebogen im Rahmen des Projektes TP2

