

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

## **Nutzung der Anaerobtechnik zur Effizienzsteigerung der kommunalen Abwasserentsorgung Kurzfassung**

Forschungskennzahl [371026319]  
UBA-FB-00

von

Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen  
Technische Hochschule Mittelhessen  
ZEuUS für Kompetenzzentrum Energie- und Umweltsystemtechnik  
Gießen

Dipl.-Ing. (FH) Sabrina Eichenauer M.A.  
Technische Hochschule Mittelhessen  
ZEuUS für Kompetenzzentrum Energie- und Umweltsystemtechnik  
Gießen

Technische Hochschule Mittelhessen  
ZEuUS für Kompetenzzentrum Energie- und Umweltsystemtechnik  
Wiesenstraße 14  
35390 Gießen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Abschlussdatum [Mai 2016]

## Inhaltsverzeichnis

Berichtskennblatt .....	2
Report Cover Sheet.....	3
Abbildungsverzeichnis .....	5
Tabellenverzeichnis .....	6
Abkürzungsverzeichnis .....	7
Zusammenfassung.....	9
Summary.....	10
1 Einleitung .....	11
1.1 Problemstellung und Anwendungsgebiet .....	11
2 Zielsetzung .....	12
3 Stand der Technik .....	14
3.1 Anaerobe Abwasserbehandlung.....	14
3.2 Stickstoffelimination .....	16
4 Ergebnisse - Anwendung auf die Beispielregionen .....	17
4.1 Modellregion Mittelhessen .....	17
4.1.1 Referenzanlage Aerob/Anoxische Belebungsanlage mit anaerober Schlammbehandlung (Faulung) .....	18
4.1.2 Szenario 1: Anaerobe Kommunalabwasserbehandlung .....	19
4.1.3 Szenario 2: Nutzung freier Faulraumkapazitäten .....	21
4.1.3.1 CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	23
4.1.4 Szenario 3: Dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung .....	24
4.1.4.1 CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	29
4.2 Modellregion Frankfurt.....	30
4.2.1 Referenzanlage Aerob / Anoxische Belebungsanlage mit anaerober Schlammbehandlung (Faulung) .....	31
4.2.2 Szenario 1: Anaerobe Kommunalabwasserbehandlung .....	32
4.2.3 Szenario 2: Nutzung freier Faulraumkapazitäten .....	34
4.2.4 Szenario 3: Dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung .....	34
4.2.4.1 CO <sub>2</sub> -Bilanz .....	35
5 Zusammenfassung, Ausblick und Forschungsbedarf.....	36
6 Literatur .....	39

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verfahrenskombination mit anaerober Kommunalabwasserbehandlung im Hauptstrom, Vakuumentgasung, aerobe Nachbehandlung zur Rest-CSB-Elimination sowie Deammonifikation im Hauptstrom (Szenario 1, Variante 2) .....	13
Abbildung 2:	Prinzipielle Veränderung der CSB-Anteile und der abfiltrierbaren Stoffe bei der anaeroben biologischen Behandlung (nach Kayser (2001)) .....	14
Abbildung 3:	Prinzipielle Veränderung der CSB-Anteile und der abfiltrierbaren Stoffe bei der aeroben biologischen Behandlung (nach Kayser (2001)) .....	14
Abbildung 4:	CSB-Abbaugrade bei UASB-Reaktoren zur Behandlung von kommunalem Abwasser in Abhängigkeit der Temperatur und der Aufenthaltszeit (HRT), Zusammenstellung verschiedener Untersuchungen (Elmitwalli et.al., 1999, Lettinga et.al., 1981; Grin et al., 1983; Monroy et al., 1988; Uemura / Harada, 2000; Abdel-Halim, 2005; Tawfik et al., 2006) .....	15
Abbildung 5	Deammonifikation als autotropher Prozess in zwei Schritten .....	17
Abbildung 6:	Schwerpunkt-Region „Marburg“ mit Standorten verschiedener Industriebetriebe, sich ergebender Transportreichweiten sowie einem potentiellen Standort einer dezentralen Anaerobanlage im Stadtgebiet Marburg z.B. auf dem Gelände der KA Marburg .....	26
Abbildung 7:	Schwerpunkt-Region „Gießen“ mit Standorten verschiedener Industriebetriebe, sich ergebender Transportreichweiten sowie einem potentiellen Standort einer dezentralen Anaerobanlage an der Molkerei Hungen oder der Kläranlage Hungen .....	27

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Realisierte Raumbelastungen bei Anaerobanlagen zur Behandlung verschiedener Industrieabwässer; Angaben in [kg CSB/m <sup>3</sup> ·d] (Austermann-Haun, 2011) .....	16
Tabelle 2:	Modellregion Mittelhessen, Zulaufparameter der Kläranlagen der GK 4 und 5 mit einer Anschlussgröße von insgesamt 1.165.000 EW sowie der Modellkläranlage Mittelhessen mit 33.300 EW (RP Gießen, EKVO-Daten 2011) .....	18
Tabelle 3	Modellregion Mittelhessen, Szenario 1: anaerobe Kommunalabwasserbehandlung Stromverbrauch der Varianten 1 u. 2 verglichen mit dem anlagenbezogenen Idealwert der aerob/anoxischen Belebungsanlage als Referenzanlage, bezogen auf 33.300 EW .....	20
Tabelle 4:	Modellregion Mittelhessen, Szenario 1: anaerobe Kommunalabwasserbehandlung; Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz der Varianten 1 und 2 sowie der aerob/anoxischen Belebungsanlage als Referenzanlage, bezogen auf 33.300 EW .....	20
Tabelle 5:	Modellregion Mittelhessen, Szenario 1: anaerobe Kommunalabwasserbehandlung; Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz der Varianten 1 und 2 sowie der aerob/anoxischen Belebungsanlage als Referenz, bezogen auf alle Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 mit insgesamt 1.165.000 EW .....	21
Tabelle 6:	Modellregion Mittelhessen, Szenario 2, Mögliche elektrische und thermische Energieerträge durch die Nutzung von Industrieabwässern als Co-Substrate in den Faulbehältern der Kläranlagen der Region Mittelhessen.....	23
Tabelle 7	Modellregion Mittelhessen, Szenario 3, Abwassermengen, CSB-Werte sowie CSB-Frachten der Industriebetriebe in den o.g. Schwerpunktbereichen, Transportentfernungen zu möglichen Standorten der dezentralen Anaerobanlagen .....	26
Tabelle 8	Modellregion Mittelhessen, Szenario 3, Energiebilanz für die dezentralen anaeroben Abwasserbehandlungsanlagen, Modellregion Mittelhessen .....	28
Tabelle 9:	Zulaufparameter der Modellkläranlage Frankfurt mit 1.000.000 EW .....	31
Tabelle 10:	Energieverbräuche der Kläranlagen Sindlingen und Niederrad (Stadtentwässerung Frankfurt (2011) .....	31
Tabelle 11	Modellregion Frankfurt: Szenario 1: Ergebnisse der Energiebilanz aller Varianten, bezogen auf 1.000.000 EW .....	33
Tabelle 12:	Modellregion Frankfurt: Szenario 1: Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanz aller Varianten, bezogen auf 1.000.000 EW .....	34
Tabelle 13:	Industrielle Indirekteinleiter im Stadtgebiet Frankfurt .....	34
Tabelle 14	Modellregion Frankfurt: Szenario 3: Energiebilanz für die dezentrale anaerobe Abwasserbehandlungsanlage, Standort Frankfurt a. Main.....	35

Tabelle 15: Energiebilanzen bei Nutzung der Anaerobtechnik in der kommunalen Abwasserbehandlung, Vergleich der Szenarien, Modellregionen Mittelhessen und Frankfurt .....38

## Abkürzungsverzeichnis

<b>a</b>	Jahr
<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerk
<b>BM</b>	Biomasse
<b>BSB</b>	Biochemischer Sauerstoffbedarf
<b>C</b>	Konzentration
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>CSB</b>	Chemischer Sauerstoffbedarf
<b>DWA</b>	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
<b>EGSB</b>	Expanded Granular SludgeBed
<b>el</b>	Elektrisch
<b>EW</b>	Einwohnerwert
<b>GK</b>	Größenklasse
<b>GWP</b>	Global Warming Potential GWP <sub>CH<sub>4</sub></sub> = 21, GWP <sub>CO<sub>2</sub></sub> = 1
<b>HRT</b>	Aufenthaltszeit
<b>KA</b>	Kläranlage
<b>GWh</b>	Gigawattstunden
<b>kWh</b>	Kilowattstunden
<b>N</b>	Stickstoff
<b>NKB</b>	Nachklärbecken
<b>Nm<sup>3</sup></b>	Normkubikmeter
<b>NH<sub>4</sub></b>	Ammonium
<b>P</b>	Phosphor
<b>th</b>	Thermisch
<b>TKN</b>	Total Kjeldahl Stickstoff
<b>UASB</b>	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
<b>ÜS</b>	Überschussschlamm
<b>η</b>	Wirkungsgrad



## Zusammenfassung

Organische Abwasserinhaltsstoffe stellen grundsätzlich vergleichbar mit Bioabfällen eine Ressource mit entsprechendem Energieinhalt dar. In der kommunalen Abwasserentsorgung ist bedingt durch die herkömmliche Schwemmkanalisation ein Großteil der energiereichen Stoffe aber so verdünnt, dass bisher eine direkte Nutzung und Umwandlung in nutzbares und speicherbares Biogas nur auf die anaerobe Umsetzung der im Zulauf zur Kläranlage noch ungelösten absetzbaren Stoffe (Primärschlamm) sowie des Überschussschlammes aus der aeroben Abwasserbehandlung beschränkt ist.

Den Standard in der Abwasserbehandlung stellt die aerobe Mineralisierung unter energetisch aufwändiger Sauerstoffzufuhr (Belüftung) dar. Damit gehören Kläranlagen zu den größten Stromverbrauchern in Städten und Gemeinden. Gleichzeitig besteht dort aber auch ein großes Potential zur Energieeinsparung. Bisherige Konzepte zur Effizienzsteigerung und Reduzierung des Energieverbrauchs basieren daher auf der Optimierung der eingesetzten Verfahrenstechnik, vor allem der Belüftung.

Aus thermodynamischer Sicht stellt die aerobe Behandlung eine Entwertung des im Abwasser enthaltenen chemischen Potentials dar. Anaerobe Verfahren mit einer Umsetzung der organischen Abwasserinhaltsstoffe zu Faulgas eignen sich grundsätzlich besser zur Nutzung dieses Potentials und könnten den Eigenversorgungsgrad von Kläranlagen deutlich verbessern.

Anhand von Energie- und Massenbilanzen wurde für zwei Beispielregionen das grundsätzliche Energieeinsparpotential von drei Szenarien untersucht.

1. Szenario: Anaerobe Behandlung des gesamten Kommunalabwassers im Hauptstrom (**Anaerobe Kommunal-Abwasserbehandlung**)
2. Szenario: Getrennte Erfassung organisch hoch belasteter Industrieabwasserströme, die bisher über die Kanalisation der Kläranlage zugeleitet wurden, und anschließende anaerobe Behandlung unter **Nutzung freier Faulbehälterkapazitäten**
3. Szenario: Getrennte Erfassung organisch hoch belasteter Industrieabwasserströme, **Aufbau dezentraler Anaerobanlagen** zur Behandlung, Produktion von Biogas und Nutzung der Energie

Die Ergebnisse zeigen, dass durch Nutzung der Anaerobtechnik der Energiebedarf der kommunalen Abwasserbehandlung deutlich reduziert werden kann. Mit den richtig gewählten und kombinierten Verfahren kann nicht nur eine Energieautarkie erreicht werden, sondern ein Stromüberschuss in das öffentliche Netz eingespeist werden. Die Abwasserbehandlung wird so zum Stromlieferanten.

Die Anaerobe Behandlung des gesamten Kommunalabwassers im Hauptstrom stellt derzeit nicht den Stand der Technik dar. Verschiedene Forschungsvorhaben befassen sich derzeit damit. Bedingt durch die in Mitteleuropa herrschenden niedrigen Abwassertemperaturen sind große Reaktorvolumina sowie eine Vakuumentgasung zur Abtrennung des gelösten Methans erforderlich. Aufgrund der nach der Anaerobstufe deutlich reduzierten organischen Inhaltsstoffe ist eine adaptierte Stickstoffelimination erforderlich, die nicht als herkömmliche Nitrifikation – Denitrifikation sondern z. B. als Deammonifikation ausgeführt werden muss. Auch die Deammonifikation stellt bei niedrigen Abwassertemperaturen bisher nicht den Stand der Technik dar.

Durch die komplexen Strukturen und hohe Anzahl der eingehenden Parameter in der Abwasserbehandlung ist eine allgemeingültige ökologische und ökonomische Bewertung der Verfahren nicht möglich, jede Ausgangssituation muss einzeln geprüft werden.

Dieses Vorhaben wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Umweltforschungsplanes - Förderkennzeichen 3710 26 319 - erstellt und mit Bundesmitteln finanziert.

## Summary

Organic wastewater compounds provide similar to bio-waste a resource with corresponding energy content. In municipal wastewater systems the energy-rich substances due to the conventional water-borne sewage are so diluted that so far a direct usage and transformation into usable and storable bio-gas is limited only for the anaerobic digestion of the primary and surplus sludge.

The standard in wastewater treatment is aerobic mineralization with energetically consuming oxygen supply. Wastewater treatment plants belong to the largest electricity consumers in cities and towns. At the same time there is but also a great potential for energy savings. Current concepts to increase efficiency and reduce energy consumption are based on the optimization of the process technology especially the aeration system.

From a thermodynamic point of view, the aerobic treatment is a devaluation of the chemical potential of the wastewater. Anaerobic processes with a conversion of the organic wastewater components to digester gas are in principle better to exploit this potential and could significantly improve the self-sufficiency of wastewater treatment plants.

On the basis of energy and mass balances the energy-saving potential of three scenarios was investigated for two example regions.

1. Scenario: Anaerobic treatment of the entire municipal waste water in the main stream (**Anaerobic municipal wastewater treatment**)
2. Scenario: Separate collection organically highly loaded industrial wastewater streams that have been sent via the sewerage treatment plant, and subsequent **anaerobic treatment using free digester capacity**
3. Scenario: Separate collection organically highly loaded industrial wastewater streams, creating **decentralized anaerobic plants** for the treatment, production of biogas and use of energy

The results show that the energy requirements of the municipal waste water treatment can be significantly reduced by use of anaerobic technology. With a process combination properly selected and combined not only energy self-sufficiency can be achieved, but excess electricity can be fed into the public grid. The wastewater treatment will change to an electricity supplier.

The anaerobic treatment of the entire municipal waste water in the main stream at the moment does not represent the state of the art. Due to the low wastewater temperatures prevailing in Central Europe large reactor volumes and a vacuum degassing for separating the dissolved methane are required. Due to the significantly reduced organic components by anaerobic digestion an adapted technology for nitrogen removal is required, not as a conventional nitrification – denitrification. A two-stage autotrophic biological nitrogen removal (nitritation + Anammox) (as deammonification) in the mainstream at low temperatures must be implemented. This deammonification process under such conditions does not represent the state of the art, too.

The complex structures and high number of incoming parameters in wastewater treatment a general ecological and economic evaluation of the different scenarios is not possible, each initial situation must be examined individually.

This project was commissioned by UBA German Environment Agency under the Environmental Research Plan - Förderkennzeichen 3710 26 319 - created and financed with federal funds.

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Anwendungsgebiet

Vorhandene Ressourcen müssen effizient genutzt und die Umwelt geschützt werden. Dieses Bestreben drückt sich unter anderem in den Klimaschutzzielen und der Energiepolitik der Bundesrepublik Deutschland aus. Die dadurch angestoßenen Entwicklungen machen sich auch in der kommunalen Abwasserbehandlung bemerkbar.

Das Umweltbundesamt veröffentlichte im Jahr 2008 einen Bericht zur Steigerung der Energieeffizienz auf deutschen Kläranlagen (Haberkern et. al., 2008). Dort wurde auch eine Energiebilanz über kommunale Abwasserbehandlungsanlagen in ganz Deutschland erstellt. Im Ergebnis beträgt deren Stromverbrauch etwa 4.400 GWh/a, Kläranlagen der Größenklasse (GK) 4 und 5 sind für etwa 87 % davon verantwortlich. Bezogen auf den gesamtdeutschen Energieverbrauch entfallen 0,7 % und etwa 3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente auf die kommunale Abwasserentsorgung.

Der spezifische Stromverbrauch von Kläranlagen mit Belebungsverfahren sowie anaerober Schlammstabilisierung (Faulung) beträgt im Median bei Anlagen der Größenklasse 4 (10.000 – 100.000 EW) 33,8 kWh/(EW\*a), bei Anlagen der Größenklasse 5 (> 100.000 EW) 31,9 kWh/(EW\*a). Häufigkeitsverteilungen sind dem DWA-Leistungsvergleich 2012 (DWA 2012) sowie dem DWA-Arbeitsblatt A 216 (DWA 2015) zu entnehmen.

Zahlreiche Publikationen und Leitfäden zur Steigerung der Energieeffizienz in der kommunalen Abwasserreinigung (Müller et. al., 1999; Kolisch / Friedrich, 2009; Theilen / Liebeneiner, 2011) zeigen, dass auch die Bundesländer aktiv waren und sind. Ausgehend von einer Initiative der Bund-Länder-Arbeitsgruppe „Energieeffizienz der kommunalen Abwasserbeseitigung einschließlich Klärschlammbehandlung“ erhielt zudem die DWA das Mandat, ein Arbeitsblatt „Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen“ zu erarbeiten, das als DWA A 216 im Weißdruck veröffentlicht wurde (DWA, 2015).

In vielen Städten und Gemeinden ist die Abwasserentsorgung für etwa 20 % des Stromverbrauchs verantwortlich, oft setzen Energieeinsparungsprogramme auf lokaler Ebene hier an. Eine Aufschlüsselung des Stromverbrauchs von Kläranlagen der GK 4 und 5 nach dem Belebungsverfahren zeigt, dass ein großer Teil der Energie für die Belüftung der Belebungsstufe aufgewendet wird. Mit großem Abstand folgen die weiteren Verbraucher. Dies gilt auch für Anlagen der GK 2 und 3, hier sind die Abstände zu weiteren Verbrauchern allerdings halbiert.

Häufige Energieeinsparmaßnahmen setzen bei der Steigerung der Energieeffizienz der Belüftung, der elektrischen Antriebe sowie der Steuerung an. Im Detail:

- ▶ Einsatz neuer und effektiverer Belüfterelemente.
- ▶ Regelmäßige Wartung und Inspektion der Belüftereinheiten.
- ▶ Installation von Belüftungsaggregaten (Gebläsen, Verdichtern) mit höheren mechanischen und elektrischen Wirkungsgraden.
- ▶ Installation von Pumpen, Rührwerken und Räum- und Fördereinrichtung mit angepassten Leistungen und höheren elektrischen Wirkungsgraden.
- ▶ Einsatz von MSR-Technik und Anwendung neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse (z. B. lastabhängige Belüftung, Steuerung über Fuzzy-Logic-Systeme).
- ▶ Steigerung des Eigenversorgungsgrad durch den Austausch alter BHKW durch neuere mit einem höheren elektrischen Wirkungsgrad.

In einigen Fällen wurde auch die energieaufwändige aerobe Schlammstabilisierung durch eine anaerobe Stabilisierung mit Nutzung des Faulgases ersetzt.

Ansätze zur weitergehenden Nutzung des im Rohabwasser enthaltenen Energiepotentials gibt es bisher kaum. Dieses Energiepotential setzt sich aus den folgenden 3 wesentlichen Komponenten zusammen:

- ▶ die im Abwasser enthaltene organische Substanz enthält chemisch gebundene Energie:  
CSB als Energieeinheit:  $1 \text{ kg CSB} = 3,5 \text{ kWh}$   
pro Einwohner:  $\text{ca. } 0,12 \text{ kg CSB}/(\text{E}^*\text{d}) \Rightarrow 43,8 \text{ kg}/(\text{E}^*\text{a}) \Rightarrow \text{entspr. ca. } 153 \text{ kWh}/(\text{E}^*\text{a})$
- ▶ Ammonium als wesentlicher Düngerbestandteil wird unter hohem Energieeinsatz synthetisiert  
Primärenergieverbrauch:  $1 \text{ kg N}$  erfordert ca.  $10 \text{ kWh}$   
pro Einwohner:  $\text{ca. } 12 \text{ g N}/(\text{E}^*\text{d}) \Rightarrow 4,4 \text{ kg}/(\text{E}^*\text{a}) \Rightarrow \text{entspr. ca. } 44 \text{ kWh}/(\text{E}^*\text{a})$
- ▶ Abwasser enthält physikalisch nutzbare thermische Energie (Abwasserwärmenutzung)  
vielfach im Kanalnetz bzw. aus dem Ablauf von Kläranlagen nutzbare Wärme:  
bei  $\Delta T = 3 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow 3,3 \text{ kWh}/\text{m}^3 \text{ Abwasser}$   
pro Einwohner:  $\text{ca. } 40 \text{ m}^3/(\text{E}^*\text{a}) \Rightarrow \text{entspr. ca. } 130 \text{ kWh}/(\text{E}^*\text{a})$
- ▶ Abwasser enthält physikalisch nutzbare Lageenergie  
in Abhängigkeit der Topografie nutzbare Lageenergie, in der Regel sehr gering  
bei  $\Delta H = 2 \text{ m}$ , pro Einwohner  $\text{ca. } 40 \text{ m}^3$ ,  $\eta_{\text{Turbine}} = 0,6 \Rightarrow \text{entspr. ca. } 0,13 \text{ kWh}/(\text{E}^*\text{a})$

Das im Abwasser vorhandene Energiepotential ist also deutlich größer als der mittlere Energieverbrauch der Kläranlagen der GK 4 und 5 mit ca.  $32 - 33 \text{ kWh}/(\text{EW}^*\text{a})$ . Daher liegen Überlegungen nahe, Kläranlagen von Energie“verbrauchern“ zu Energie“produzenten“ zu machen.

Die Nutzung von Abwasserwärme und Lageenergie ist nicht Thema dieser Arbeit. Der Schwerpunkt liegt auf der Nutzung des in den organischen Abwasserinhaltsstoffen chemisch gebundenen Energiepotentials durch Anaerobtechnik. Dieses wird derzeit bei Anlagen mit einer anaeroben Schlammbehandlung (Faulung) zum Teil durch die Faulung von Primär- und Überschussschlamm genutzt.

## 2 Zielsetzung

Ziel des Vorhabens war es, Möglichkeiten zur Nutzung der Anaerobtechnik für die Effizienzsteigerung in der kommunalen Abwasserbehandlung aufzuzeigen. Die Betrachtungen beschränken sich auf die Energieströme Strom und Wärme sowie auf die  $\text{CO}_2$ -Bilanz.

Die betrachteten Varianten zur Nutzung der Anaerobtechnik werden verglichen mit einer optimierten Standard-Referenzanlage mit aerob / anoxischer Belebungsanlage sowie anaerober Schlammbehandlung (Faulung)

Folgende Szenarien werden in diesem Sinne betrachtet und exemplarisch anhand zweier Beispielregionen (Region Mittelhessen und Stadt Frankfurt) genauer bilanziert und bewertet:

1. Szenario: Anaerobe Behandlung des gesamten Kommunalabwassers im Hauptstrom (Anaerobe Kommunalabwasserbehandlung) in Kombination mit einer aeroben Nachbehandlung zur Rest-CSB-Reduzierung sowie einer Stickstoffelimination als Deammonifikation.

Für diese Verfahrenskombination umfasst die Betrachtung der Energie- und  $\text{CO}_2$ -Bilanz folgende Varianten:

- **Variante 1:** Anaerobe Kommunalabwasserbehandlung im Hauptstrom mit aerober Nachbehandlung des verbleibenden CSB sowie einer Deammonifikation im Hauptstrom, bestehend aus:
  - zweistufiger Anaerobanlage als UASB-Anlage (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)
  - aerobe Belebungsanlage zur Rest-CSB-Elimination mit Phosphorelimination durch Fällung
  - Deammonifikationsstufe zur Stickstoffelimination

- anaerobe Schlammstabilisierung (Faulung) für Primärschlamm aus der Anaerobstufe und Überschussschlamm
- **Variante 2:** Anaerobe Kommunalabwasserbehandlung im Hauptstrom mit Vakuumentgasung zur Abtrennung und Nutzung des im Ablauf gelösten Methans, aerober Nachbehandlung des verbleibenden CSB sowie einer Deammonifikation im Hauptstrom, (siehe Abbildung 1) bestehend aus:
  - zweistufiger Anaerobanlage als UASB-Anlage
  - Vakuumentgasung zur Abtrennung des gelösten Methans
  - aerobe Belebungsanlage zur Rest-CSB-Elimination mit Phosphorelimination durch Fällung
  - Deammonifikationsstufe zur Stickstoffelimination
  - anaerobe Schlammstabilisierung (Faulung) für Primärschlamm aus der Anaerobstufe und Überschussschlamm

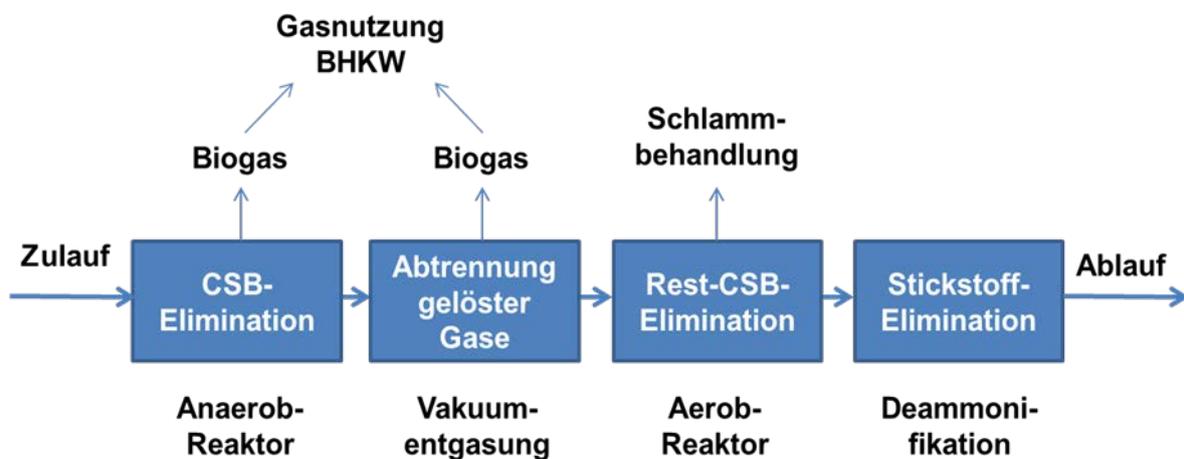


Abbildung 1: Verfahrenskombination mit anaerober Kommunalabwasserbehandlung im Hauptstrom, Vakuumentgasung, aerobe Nachbehandlung zur Rest-CSB-Elimination sowie Deammonifikation im Hauptstrom (Szenario 1, Variante 2)

- ▶ Szenario 2: Nutzung freier Faulbehälterkapazitäten zur Co-Fermentation
  - direkte Erfassung hoch belasteter Abwasserteilströme aus Industriebetrieben, die bisher über die Kanalisation als Indirekteinleiter den Kläranlagen zugeleitet werden,
  - Transport per Lkw zu Kläranlagenstandorten
  - anaerobe Behandlung als Co-Substrate unter Nutzung freier Faulbehälterkapazitäten
  - Reduzierung der CSB-Zulaufkraft der kommunalen Kläranlagen, damit Reduzierung des Stromverbrauchs
- ▶ Szenario 3: Dezentrale Industrieabwasserbehandlung
  - Getrennte Erfassung organisch hoch belasteter Abwasserteilströme aus Industriebetrieben,
  - Transport per Lkw zu einem Standort mit dezentraler anaerober Industrieabwasserbehandlung,
  - dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung
  - Indirekteinleitung des anaerob vorbehandelten Abwassers in ein Kanalnetz und Nachbehandlung gemeinsam mit kommunalem Abwasser.

### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Anaerobe Abwasserbehandlung

Grundsätzlich weist die Anaerobtechnik gegenüber der aeroben Reinigung einige Vorteile auf. Besonders herauszugreifen sind hier die Erzeugung von Biogas mit einer möglichen Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie sowie die geringere Überschussschlammmenge (siehe Abbildung 2). Hauptnachteile der aeroben Abwasserreinigung sind der hohe Energiebedarf für die Belüftung sowie der zu entsorgende Überschussschlamm (siehe Abbildung 3).

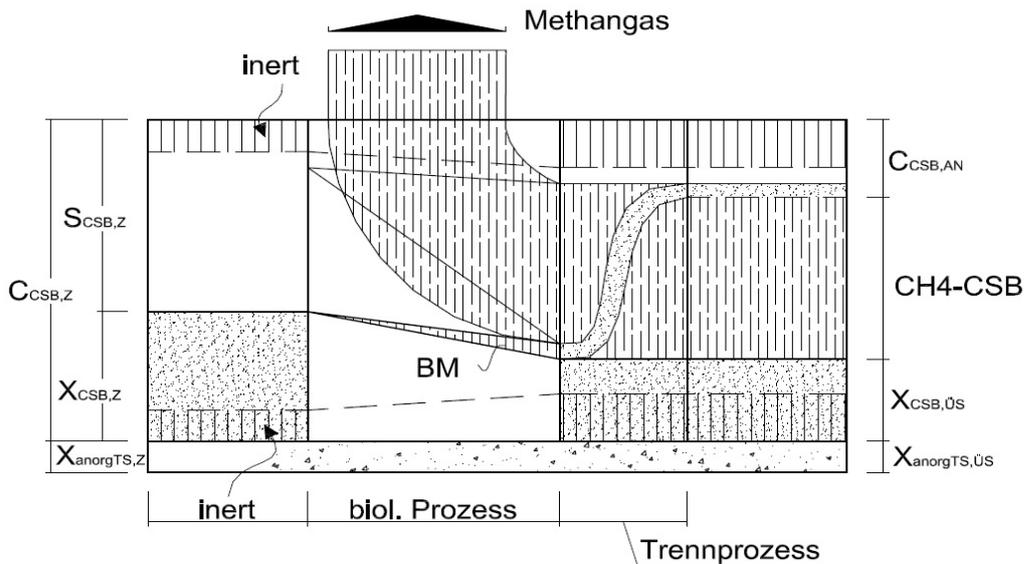


Abbildung 2: Prinzipielle Veränderung der CSB-Anteile und der abfiltrierbaren Stoffe bei der anaeroben biologischen Behandlung (nach Kayser (2001))

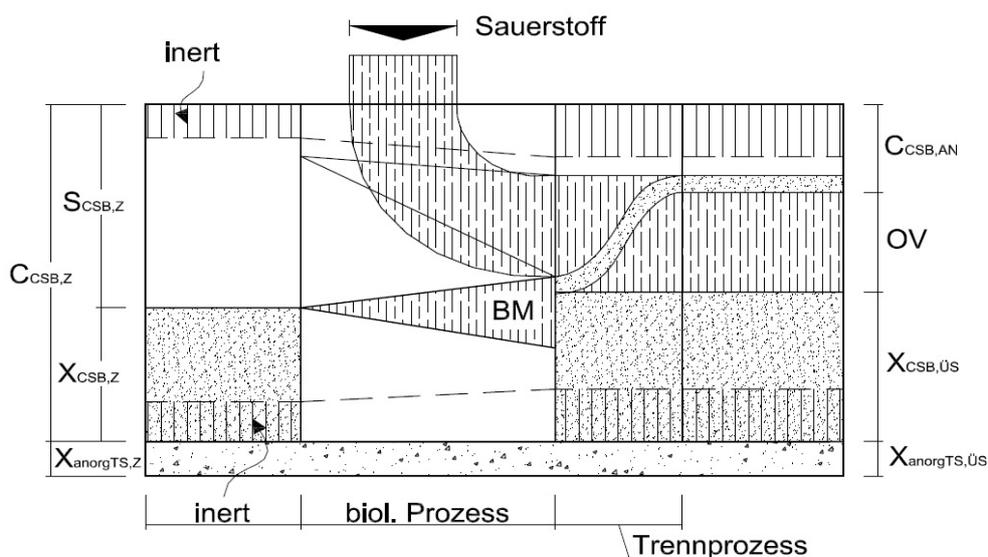


Abbildung 3: Prinzipielle Veränderung der CSB-Anteile und der abfiltrierbaren Stoffe bei der aeroben biologischen Behandlung (nach Kayser (2001))

Als Hauptbehandlungsverfahren für kommunales Abwasser wird die Anaerobtechnik allerdings in Mitteleuropa bisher nicht eingesetzt, da eine gleichzeitige weitgehende Elimination der organischen Inhaltsstoffe (ausgedrückt als CSB) und der Nährstoffe (insbesondere Stickstoff) bei den herrschenden niedrigen Abwassertemperaturen nicht möglich ist. Nachbehandlungsverfahren sind erforderlich. Weiterhin besteht die Notwendigkeit einer Vakuumentgasung aufgrund der hohen Löslichkeit des Methans insbesondere bei niedrigen Temperaturen, um klimarelevante Emissionen in die Atmosphäre zu vermeiden.

Der großtechnische Einsatz der Anaerobtechnik für den Hauptstrom in der kommunalen Abwasserbehandlung ist aber aus tropischen und subtropischen Ländern bekannt, in denen Abwassertemperaturen von i.d.R. > 20 °C vorherrschen (z. B. Indien, Kolumbien, Mexiko, Brasilien). Eingesetzt werden vor allem UASB-Reaktoren (Hinken et. al. (2010)).

Im Rahmen einer Literaturrecherche zur anaeroben Kommunalabwasserbehandlung wurden vor allem Quellen untersucht, die die Anwendung der Anaerobtechnik im psychrophilen Temperaturbereich (Ergebnisse in Temperaturbereichen zwischen 5 und 20 °C) behandeln. Ausgiebige Informationen zu diesem Thema sind rar. Die Ergebnisse sind in der Regel sehr knapp beschrieben. Abbildung zeigt eine Auswertung verschiedener Untersuchungen, insbesondere Laborversuche, zu diesem Thema. Es wurden in den Laborversuchen vorwiegend UASB-Reaktoren eingesetzt.

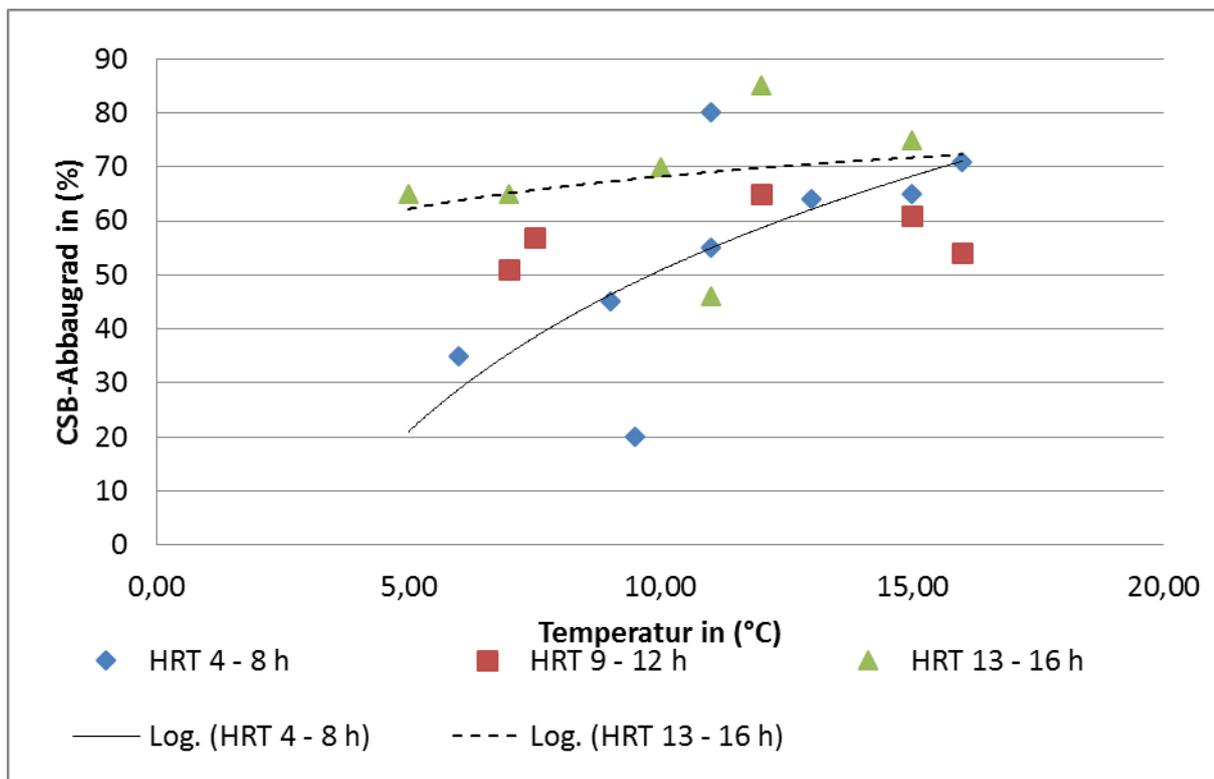


Abbildung 4: CSB-Abbaugrade bei UASB-Reaktoren zur Behandlung von kommunalem Abwasser in Abhängigkeit der Temperatur und der Aufenthaltszeit (HRT), Zusammenstellung verschiedener Untersuchungen (Elmitwalli et.al., 1999, Lettinga et.al., 1981; Grin et al., 1983; Monroy et al., 1988; Uemura / Harada, 2000; Abdel-Halim, 2005; Tawfik et al., 2006)

Es zeigt sich, dass CSB-Abbaugrade von ca. 70 % bei Temperaturen von ca. 10 °C durchaus erreichbar sind, hierfür sind aber Aufenthaltszeiten von > 13 Stunden erforderlich.

Zur Vorbehandlung organisch hochbelasteter Industrieabwässer vor einer aeroben Nachbehandlung oder vor einer Indirekteinleitung in eine aerobe kommunale Kläranlage kommt die Anaerobtechnik aber vielfach zum Einsatz. Mit Stand März 2012 waren in Deutschland 211 industrielle Anaerobanla-

gen in Betrieb (Rosenwinkel et. al., 2015), davon der Großteil für Abwässer aus der Lebensmittel- und Getränkeindustrie aber auch aus der Zellstoff- und Papierindustrie. EGSB-Reaktoren (Expanded Granular Sludge Bed) stellen die am häufigsten eingesetzte Anlagentechnik dar gefolgt von UASB-Reaktoren (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), der anaeroben Belebung (hauptsächlich in der Zuckerindustrie) sowie anaeroben Festbett-Reaktoren. Andere Technologien spielen nur eine untergeordnete Rolle, (Austermann-Haun, 2011). Vor allem der Einsatz von Festbettreaktoren ist in den letzten Jahren aufgrund technischer Probleme stark zurückgegangen.

Die möglichen Raumbelastungen sind je nach eingesetztem Verfahren, Herkunft des Abwassers und Abwassertemperatur unterschiedlich. Tabelle 1 zeigt realisierte Raumbelastungen in verschiedenen Verfahren mit Abwasser unterschiedlicher Herkunft.

Branche	EGSB	UASB	Festbett	Fließbett	anaerobe Belebung	Ausschwemmreaktor
Lebensmittel	19,9	9,1	5,2	35,7	6,0	-
Brennereien	18,8	-	-	-	-	-
Brauereien/ Getränke	19,9	8	14,2	-	-	-
Chemie/Pharma	14,9	-	-	-	-	-
Papier/Pappe	19,3	10,9	-	-	2,9	-
Sonstige	15,9	-	-	-	-	1,25
<b>Mittel</b>	<b>18,1</b>	<b>9,3</b>	<b>9,7</b>	-	<b>4,5</b>	<b>1,25</b>
Anzahl Anlagen	89	46	10	1	25	2

Tabelle 1: Realisierte Raumbelastungen bei Anaerobanlagen zur Behandlung verschiedener Industrieabwässer; Angaben in [kg CSB/m<sup>3</sup>·d] (Austermann-Haun, 2011)

Die Auswertung in Tabelle 1 zeigt, dass EGSB-Reaktoren mit den höchsten Raumbelastungen betrieben werden, gefolgt von Festbett- und UASB-Reaktoren. Beim anaeroben Belebungsverfahren sind tendenziell nicht so hohe Raumbelastungen möglich, jedoch ist dies stark von der Abwasserzusammensetzung abhängig.

### 3.2 Stickstoffelimination

Die übliche Elimination von Stickstoffverbindungen aus Abwässern über Nitrifikation und Denitrifikation erfordert zunächst einen hohen Energieaufwand, der hauptsächlich durch den Sauerstoffeintrag für die Nitrifikation über die Belüftungsaggregate begründet ist. Für die Denitrifikation des Nitrates werden dann leicht abbaubare organische Substrate benötigt, die in der Regel aus dem Rohabwasser verfügbar sind. Bei ungünstigen C:N-Verhältnissen im Abwasser und je nach eingesetzter Verfahrenstechnik muss für die Denitrifikation zusätzlicher Kohlenstoff aus einer externen Quelle, z. B. in Form von Essigsäure oder Methanol, zudosiert werden.

Eine anaerobe Abwasserbehandlung verstärkt dieses Problem zusätzlich. Weil bei der anaeroben Behandlung bereits annähernd alle gut verfügbaren Kohlenstoff-Verbindungen abgebaut werden, sind für eine Stickstoffelimination durch Denitrifikation zu wenige Kohlenstoff-Verbindungen verfügbar. Der Bedarf an externen Kohlenstoffquellen zur Denitrifikation würde entsprechend ansteigen.

Alternativ zur herkömmlichen Stickstoffelimination über die Prozesse der Nitrifikation und der Denitrifikation ist die aerob/anoxische Deammonifikation (im Folgenden vereinfacht als Deammonifikation bezeichnet) grundsätzlich denkbar. Der Begriff Deammonifikation beschreibt den autotrophen Abbau des Ammoniums (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird ein Teil des Ammoniums (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) zu Nitrit oxidiert (Nitritation). In Schritt zwei werden das Nitrit und das verbleibende NH<sub>4</sub><sup>+</sup> anoxisch di-

rekt zu elementarem Stickstoff abgebaut. Dabei wird eine geringe Menge (ca. 11 % der zugeführten Ammoniumfracht) an Nitrat gebildet (siehe Abbildung 5):

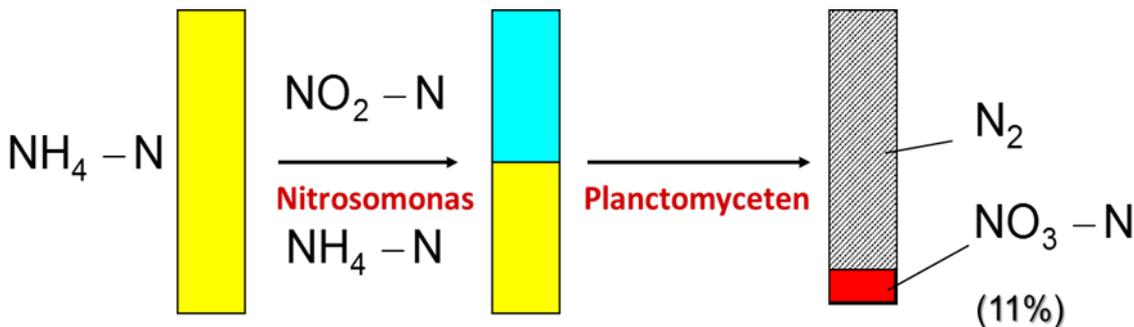


Abbildung 5 Deammonifikation als autotropher Prozess in zwei Schritten

Der katalytische Vorgang der anaeroben Ammoniumoxidation wird von Mikroorganismen der Gattung Planctomycetales durchgeführt. Diese fordern bestimmte Milieubedingungen, auf die der verfahrenstechnische Prozess abgestimmt werden muss. In der Literatur finden sich u.a. Empfindlichkeiten gegen Sauerstoff und Nitrit sowie Hemmwirkungen durch verschiedene organische Verbindungen wie Methanol (Rosenwinkel et. al., 2009, Guven et. al., 2005). Das Temperaturoptimum liegt zwischen 25 und 37 °C (Egli et. al., 2001, Dosta et. al., 2008). In der Praxis kann die Deammonifikation als ein- oder zweistufiger Prozess umgesetzt werden.

Eine praktische Umsetzung des Verfahrens ist grundsätzlich auch im Hauptstrom denkbar, was energetische Einsparungen für kommunale Kläranlagen mit sich bringen würde. Bei der technischen Machbarkeit in Mitteleuropa sowie der Wirtschaftlichkeit müssen allerdings die niedrigen Abwassertemperaturen und die geringen Ammonium-Konzentrationen im kommunalen Abwasser berücksichtigt werden. Aktuell stellt das Verfahren für die Hauptstrombehandlung im kommunalen Abwasser noch nicht den Stand der Technik dar.

## 4 Ergebnisse - Anwendung auf die Beispielregionen

### 4.1 Modellregion Mittelhessen

Die Modellregion Mittelhessen entspricht dem Zuständigkeitsbereich des Regierungspräsidiums Gießen mit den Landkreisen Gießen, Vogelsbergkreis, Landkreis Marburg-Biedenkopf, Landkreis Limburg-Weilburg sowie Lahn-Dill-Kreis. In der Region sind größere Mittelstädte (Gießen ca. 83.000 Einwohner, Marburg ca. 73.000 Einwohner, Wetzlar ca. 51.000 Einwohner) ebenso zu finden wie Kleinstädte mit 10.000 bis 30.000 Einwohnern (Beispiele Hungen, Lollar, Alsfeld, Stadtallendorf) sowie der sog. ländliche Raum mit kleinen Kommunen mit nur wenigen 100 bis einigen 1.000 Einwohnern.

Gewerbe und Industrie sind in unterschiedlichen Größenordnungen vorhanden, von kleinen inhabergeführten Unternehmen der Lebensmittelbranche (Bäckereien, Schlachtereien, Gaststätten etc.) über mittelständische Unternehmen (Großbäckereien, Brauereien) bis hin zu Marktführern in der Lebensmittelbranche (Süßwarenindustrie, Brauereien, Molkereien), die derzeit überwiegend noch indirekt einleiten und deren Abwasser potentiell für eine Anaerobbehandlung des Abwassers in Frage kommen. Beispiele hierfür sind die Molkerei der Hochwaldwerke in Hungen, die ca. 60 % der CSB-Fracht im Zulauf zur Kläranlage Hungen ausmacht, die Fa. Ferrero in Stadtallendorf ebenfalls mit ca. 60 bis 70 % der Zulauffracht der Kläranlage Kirchhain sowie die Brauerei Alsfeld mit ca. 30 % der Zulauffracht der Kläranlage Alsfeld. Alle Abwässer sind hoch organisch, aber nur gering mit Stickstoff belastet. Reine Industriekläranlagen wie die Anlage der Licher Brauerei werden im Weiteren nicht berücksichtigt.

Im Regierungsbezirk Gießen werden insgesamt 222 kommunale Kläranlagen aller Ausbaugrößen betrieben, davon 35 Anlagen der GK 4 und 5 mit Ausbaugrößen zwischen 10.000 und 300.000 Einwoh-

nerwerten (EW) (Ausbaugröße insgesamt ca. 1.425.000 EW) und insgesamt angeschlossenen ca. 1.165.000 EW (RP Gießen, 2011), ermittelt aus einer statistischen Auswertung der Jahres-CSB-Frachten, die den Jahresberichten gemäß Eigenkontrollverordnung (HMUELV, 2011) dieser Kläranlagen entnommen wurden. Hiervon lassen sich 33 Anlagen der GK 4 und zwei Anlagen der GK 5 zuordnen. Von den Kläranlagen der GK 4 und 5 besitzen 20 Anlagen Faulbehälter zur anaeroben Schlammbehandlung, darunter die beiden Kläranlagen der GK 5, Gießen und Marburg.

Als Medianwert der 35 Kläranlagen der GK 4 und 5 in dieser Region ergibt sich also eine Anschlussgröße von ca. 33.300 EW. Aus der statistischen Auswertung der EKVO-Berichte ergeben sich für die Kläranlagen der GK 4 und 5 mit in der Summe 1.165.000 EW sowie für die Modellkläranlage mit 33.300 EW die in Tabelle 17Tabelle 2 zusammengestellten Zulauf-Parameter.

Parameter	Einheit	Zulaufparameter	
		KA der GK 4 u. 5	Modell-KA
Anschlussgröße	EW	1.165.000	33.300
mittlere Abwassermenge	m <sup>3</sup> /d	402.467	11.499
CSB	mg/l	354	
	kg/d	142.325	4.066
BSB <sub>5</sub>	mg/l	171	
	kg/d	68.686	1.962
abfiltrierbare Stoffe, TS <sub>0</sub>	mg/l	199	
	kg/d	80.134	2.290
TKN	mg/l	31	
	kg/d	12.287	351
P <sub>gesamt</sub>	mg/l	5,5	
	kg/d	2.218	63

Tabelle 2: Modellregion Mittelhessen, Zulaufparameter der Kläranlagen der GK 4 und 5 mit einer Anschlussgröße von insgesamt 1.165.000 EW sowie der Modellkläranlage Mittelhessen mit 33.300 EW (RP Gießen, EKVO-Daten 2011)

#### 4.1.1 Referenzanlage Aerob/Anoxische Belebungsanlage mit anaerober Schlammbehandlung (Faulung)

Um die Energiebilanzen der betrachteten Szenarien zur Nutzung der Anaerobtechnik für die Effizienzsteigerung in der kommunalen Abwasserbehandlung bewerten zu können, müssen diese verglichen werden mit einer optimierten Standard-Referenzanlage mit aerob/anoxischer Belebungsanlage sowie anaerober Schlammbehandlung (Faulung).

Für diese aerob/anoxische Standard-Referenzanlage werden folgende Daten zum spezifischen Gesamtstromverbrauch herangezogen:

- ▶ Spezifischer Gesamtstromverbrauch (Medianwert) für Kläranlagen der GK 4 und 5 gemäß DWA-Leistungsvergleich 2012: **32,7 kWh/(EW\*a)**
- ▶ Spezifischer Gesamtstromverbrauch der Kläranlagen der GK 4 und 5 in der Modellregion Mittelhessen (Medianwert ausgewertet anhand der EKVO-Daten des RP Gießen 2011) **26,8 kWh/(EW\*a)**
- ▶ Spezifischer theoretischer Gesamtstromverbrauch der oben erläuterten Modellkläranlage mit 33.000 EW, Berechnung in Anlehnung an die anlagenbezogenen Idealwerte gemäß DWA-Arbeitsblatt 216 (2015) (siehe auch Tabelle 3) **24,1 kWh/(EW\*a)**

Die Stromerzeugung aus der Faulgasnutzung der Kläranlagen in Mittelhessen, die mit einer Faulgasverwertung ausgerüstet sind, lag in 2014 zwischen 2,7 und 27 kWh/(EW\*a), im Mittel bei 13 kWh/(EW\*a).

#### 4.1.2 Szenario 1: Anaerobe Kommunalabwasserbehandlung

Der Energiebedarf der oben beschriebenen Varianten 1 und 2 des Szenarios 1 der anaeroben Kommunalabwasserbehandlung wurde ebenfalls am Beispiel einer Modell-Kläranlage mit einer Belastung von 33.300 Einwohnerwerten (EW) ermittelt. Die Berechnungen orientieren sich auch hier an den Ansätzen zur Berechnung anlagenbezogener Idealwerte gemäß DWA Arbeitsblatt 216.

Bei der anaeroben Behandlung wird ein großer Teil der organischen Abwasserinhaltsstoffe zu Klärgas (Methan CH<sub>4</sub> und Kohlendioxid CO<sub>2</sub>) umgesetzt. Ein Teil des im Anaerobreaktor gebildeten Klärgases kann direkt gefasst werden, ein Teil des Gases löst sich – in Abhängigkeit der Abwassertemperatur – im Abwasser. Dies muss bei der Bewertung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente der Varianten berücksichtigt werden.

In der Variante 1 wird davon ausgegangen, dass das gelöste Klärgas in der nachgeschalteten Belüftungsstufe durch die Belüftung weitgehend ausgetrieben wird. Dadurch wird das im Abwasser gelöste Methan in die Atmosphäre ausgetrieben mit entsprechenden negativen klimaschädlichen Auswirkungen und kann so nicht genutzt werden.

Die Variante 2 sieht hierfür eine Abtrennung des gelöst vorliegenden Methans durch eine Vakuumentgasung vor. Im Rahmen der Bilanzierung wird dann davon ausgegangen, dass das Methan vollständig in die Gasphase überführt wird und genutzt werden kann.

Das Ergebnis der energetischen Bilanzierung der einzelnen Varianten - sowohl der spezifische Energiebedarf jedes Verfahrensschrittes als auch der spezifische Gesamtenergiebedarf (jeweils in kWh/(EW\*a)) - wird für die Modellanlage mit 33.000 EW in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

Bezeichnung	Szenario 1 Variante 1: 33.300 EW Anaerobe Behandlung + Deammonifikation		Szenario 1 Variante 2: 33.300 EW Anaerobe Behandlung + Deammonifikation + Vakuumentgasung		Referenz 33.300 EW Aerob/Anoxische Bele- bungsanlage anlagenbez. Idealwert DWA A 216	
	kWh/ (EW·a)	%	kWh/ (EW·a)	%	kWh/(EW·a)	%
Hebewerk Anlagenzulauf	1,14	6,6	1,14	4,8	1,14	4,7
Rechenanlage	0,06	0,3	0,06	0,3	0,06	0,2
Sandfang/Fettfang	1,17	6,8	1,17	5,0	1,17	4,9
Vorklärbecken	-		-		0,21	0,9
Primärschlammumpfen	0,01	0,1	0,01	0,0	0,01	0,0
Anaerobreaktor	1,14	6,6	1,14	4,8	-	
Vakuumentgasung	-		6,33	26,9	-	
Belebungsanlage	3,44	20,0	3,44	14,6	16,78	69,6
NKB	0,25	1,5	0,25	1,1	0,25	1,0
Deammonifikation	5,5	32,0	5,5	23,4	-	
Schlammbehandlung	0,4	2,3	0,4	1,7	0,4	1,7
Sonstiges	4,1	23,8	4,1	17,4	4,1	17,0
<b>Summe</b>	<b>17,21</b>	<b>100,0</b>	<b>23,54</b>	<b>100,0</b>	<b>24,12</b>	<b>100,0</b>

<b>bei 33.000 EW</b>	<b>567.930 kWh/a</b>	<b>776.820 kWh/a</b>	<b>795.960 kWh/a</b>
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Tabelle 3 Modellregion Mittelhessen, Szenario 1: anaerobe Kommunalabwasserbehandlung Stromverbrauch der Varianten 1 u. 2 verglichen mit dem anlagenbezogenen Idealwert der aerob/anoxischen Belebungsanlage als Referenzanlage, bezogen auf 33.300 EW

In Tabelle 4 sind die Methanausbeuten und -verluste (Einträge in die Atmosphäre) der einzelnen Varianten zusammengetragen. Zusätzlich werden die potentiellen Stromerträge bei Nutzung des Klärgases in einem BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von  $\eta_{el} = 35\%$  dargestellt.

Für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung wird der spezifische CO<sub>2</sub>-Wert für eine kWh Strom mit 565 g CO<sub>2</sub>/kWh angesetzt (Umweltbundesamt, 2012). Nicht berücksichtigt sind ggf. entstehende Emissionen anderer klimaschädlicher Gase wie z. B. Lachgas (N<sub>2</sub>O).

Bezeichnung	Szenario 1 Variante 1: 33.300 EW Anaerobe Behandlung + Deam- monifikation	Szenario 1 Variante 2: 33.300 EW Anaerobe Behandlung + De- ammonifikation + Vakuumentgasung	Referenz 33.300 EW Aerob/ Anoxische Belebungs- anlage anlagenbez. Idealwert DWA A 216
<b>Methanausbeute</b>	608 m <sup>3</sup> /d	810 m <sup>3</sup> /d	410 m <sup>3</sup> /d
	221.920 m <sup>3</sup> /a	295.650 m <sup>3</sup> /a	149.650 m <sup>3</sup> /a
<b>Methanverluste in die Atmosphäre</b>	200 m <sup>3</sup> /d		
	73.000 m <sup>3</sup> /a		
Stromerzeugung BHKW $\eta_{el} = 35\%$	<b>773.613 kWh/a</b>	<b>1.030.636 kWh/a</b>	<b>521.680 kWh/a</b>
<b>Strombedarf</b>	<b>567.930 kWh/a</b>	<b>776.820 kWh/a</b>	<b>795.960 kWh/a</b>
<b>Strombilanz:</b>			
+: positive Bilanz	<b>205.683 kWh/a</b>	<b>253.816 kWh/a</b>	
-: negative Bilanz			-274.280 kWh/a
<b>Eigenversorgungsgrad Strom</b>	136 %	133 %	66 %
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz</b>			
<b>CO<sub>2</sub> (Strom)</b> 565 g CO <sub>2</sub> /kWh	-116,2 t CO <sub>2</sub> /a	-143,4 t CO <sub>2</sub> /a	155,0 t CO <sub>2</sub> /a
<b>CO<sub>2</sub> (GWP<sub>CH4</sub> = 21)</b>	1.103,8 t CO <sub>2</sub> /a	0,0 t CO <sub>2</sub> /a	0,0 t CO <sub>2</sub> /a
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz</b>	<b>987,5 t CO<sub>2</sub>/a</b>	<b>-143,4 t CO<sub>2</sub>/a</b>	<b>155,0 t CO<sub>2</sub>/a</b>

Tabelle 4: Modellregion Mittelhessen, Szenario 1: anaerobe Kommunalabwasserbehandlung; Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz der Varianten 1 und 2 sowie der aerob/anoxischen Belebungsanlage als Referenzanlage, bezogen auf 33.300 EW

In einem weiteren Schritt werden eine Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz für die tatsächlich in Mittelhessen vorhandenen 35 Kläranlagen der GK 4 und 5, mit insgesamt angeschlossenen 1.165.000 EW. Anhand der Stromerträge kann der Eigenversorgungsgrad der Kläranlagen berechnet werden.

Variante 1 weist mit 136 % zwar den höchsten Eigenversorgungsgrad auf. Bei Variante 1 würde man aufgrund des Eigenversorgungsgrades von mehr als 100 % einen negativen CO<sub>2</sub>-Wert erwarten, durch

das sich im Anaerob-Reaktor gebildete gelöste und im Belebungsbecken ausgestrippte Methan ist dies jedoch nicht der Fall. Beim direkten Vergleich der Varianten 1 und 2 fällt auf, dass ein Großteil der gewonnenen chemischen Energie durch den hohen Energieverbrauch der Vakuumentgasung aufgezehrt wird. In Variante 2 macht die Vakuumentgasung 26,8 % des gesamten Strombedarfs aus, dieser kann aber durch die Nutzung des gelösten Methans gedeckt werden.

Bezeichnung	Szenario 1 Variante 1: 1.165.000 EW Anaerobe Behandlung + Deammonifikation	Szenario 1 Variante 2: 1.165.000 EW Anaerobe Behandlung + Deammonifikation + Vakuumentgasung	Referenz 1.165.000 EW Aerob/ Anoxische Belebungs- anlagenbez. Idealwert DWA A 216
<b>Strombilanz Modellregion Mittelhessen (GK 4 und 5)</b>			
Stromerzeugung BHKW $\eta_{el} = 35\%$	27.076.459 kWh/a	36.072.257 kWh/a	18.258.797 kWh/a
<b>Strombedarf</b>	<b>-19.877.550 kWh/a</b>	<b>-27.188.700 kWh/a</b>	<b>-27.858.600 kWh/a</b>
<b>Strombilanz:</b>			
+: positive Bilanz	7.198.909 kWh/a	8.883.557 kWh/a	
-: negative Bilanz			-9.599.804 kWh/a
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz Modellregion Mittelhessen (GK 4 und 5) (negativ: Entlastung, positiv: Belastung)</b>			
<b>CO<sub>2</sub> (Strom)</b> 565 g CO <sub>2</sub> /kWh	-4.067,4 t CO <sub>2</sub> /a	-5.019,2 t CO <sub>2</sub> /a	5.423,9 t CO <sub>2</sub> /a
<b>CO<sub>2</sub> (GWP<sub>CH4</sub> = 21)</b>	38.631,6 t CO <sub>2</sub> /a	0,0 t CO <sub>2</sub> /a	0,0 t CO <sub>2</sub> /a
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz</b>	<b>34.564,2 t CO<sub>2</sub>/a</b>	<b>-5.019,2 t CO<sub>2</sub>/a</b>	<b>5.423,9 t CO<sub>2</sub>/a</b>

Tabelle 5: Modellregion Mittelhessen, Szenario 1: anaerobe Kommunalabwasserbehandlung; Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz der Varianten 1 und 2 sowie der aerob/anoxischen Belebungsanlage als Referenz, bezogen auf alle Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 mit insgesamt 1.165.000 EW

Die obigen Zusammenstellungen zeigen, dass bei konsequentem Einsatz der Anaerobtechnik zur Behandlung des kommunalen Abwassers im Hauptstrom insgesamt eine positive Strombilanz mit möglicher Abgabe elektrischer Energie in das Stromnetz möglich sein kann und sich insgesamt eine deutliche Entlastung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zur herkömmlichen Verfahrenstechnik (Referenz mit aerob/anoxischer Belebungsanlage) ergibt.

#### 4.1.3 Szenario 2: Nutzung freier Faulraumkapazitäten

Vergleichbar einfach umzusetzen ist die getrennte Erfassung organisch hoch belasteter Abwasserströme aus Industrie- und Gewerbebetrieben und Zuführung zu bereits existierenden Faulbehältern. Dies hat folgende Auswirkungen auf die Energiebilanz:

- ▶ Energiebedarf für den Transport der Industrieabwässer zu Kläranlagenstandorten
- ▶ Reduzierung der CSB-Zulaufmenge der kommunalen Kläranlagen, damit Reduzierung des Stromverbrauchs der Belebungsanlage
- ▶ direkte anaerobe Behandlung der Industrieabwässer als Co-Substrate unter Nutzung freier Faulbehälterkapazitäten, Produktion und Verwertung zusätzlich erzeugten Faulgases

Im Rahmen des Vorhabens wurden alle Faulbehälter in der Modellregion Mittelhessen untersucht und geprüft, ob diese bereits mit Schlämmen aus der Abwasserreinigung ausgelastet sind bzw. ob diese noch über Kapazitäten zur Aufnahme organisch hoch belasteter Abwasserströme verfügen.

Die Abschätzung erfolgte ausschließlich über die aktuellen Aufenthaltszeiten in den Faulbehältern im Vergleich zu einer theoretischen Aufenthaltszeit von 20 Tagen. Eine Nachrechnung über oTR-Raubelastungen oder Raumabbauleistungen erfolgte in diesem Rahmen nicht. 15 Kläranlagen verfügen demnach über Reserven zwischen ca. 12 m<sup>3</sup>/d und bis zu ca. 200 m<sup>3</sup>/d. Die Abschätzung für die gesamte Region ergab eine mögliche zusätzliche Gesamt-Co-Substratmenge von ca. 975 m<sup>3</sup>/d oder 355.875 m<sup>3</sup>/a.

In der Region sind aus verschiedenen Industriebetrieben organisch hoch belastete Abwässer mit insgesamt ca. 5.700 m<sup>3</sup>/d verfügbar, die bisher indirekt über das Kanalnetz in den Zulauf der kommunalen Kläranlagen geleitet werden. Dies ist deutlich mehr, als in den Faulbehältern als Co-Substrate verarbeitet werden könnte.

Für jede Kläranlage mit freien Faulraumkapazitäten in der Modellregion Mittelhessen wurden relevante Industriebetriebe im Einzugsgebiet der Anlagen ermittelt. Es wurde angenommen, dass hoch belastete Abwässer von bisherigen Indirekteinleitern zukünftig direkt per Tankwagen zum Standort der Kläranlagen transportiert werden und dort direkt in den Faulbehälter zu dosiert werden. Über die bei den Industriebetrieben verfügbaren Industrieabwassermengen sowie den entsprechenden CSB-Werten wurde jeweils eine Co-Substrat-Fracht zur Vergärung in den Faulbehältern ermittelt.

Auf der Basis der CSB-Frachten wurden potentiell erzeugbare Faulgasmengen sowie über entsprechende Wirkungsgrade von BHKW-Anlagen mögliche elektrische und thermische Energieerträge ermittelt, die bei der Vergärung dieser industriellen Abwässer in dezentralen Anaerobanlagen zu erwarten sind. Folgende Parameter wurden für die Ermittlung herangezogen:

- ▶ CSB-Abbaugrad: 80 %
- ▶ Methanertrag: 0,35 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg CSB abgebaut
- ▶ Heizwert Methan (Primärenergie): 9,97 [kWh/m<sup>3</sup>]
- ▶ Nutzung des Biogases in BHKW mit  $\eta_{el} = 35 \%$  und  $\eta_{th} = 55 \%$

KA	Freie Kapazität	CSB des lokal verfügbaren Industrieabwassers (rechnerischer Mittelwert)	CSB-Fracht	Methan bei 80 % CSB-Abbau	Zusätzliche elektrische Energie	Zusätzliche thermische Energie
	[m <sup>3</sup> /d]	[mg/l]	[kg/d]	0,35 Nm <sup>3</sup> /kg CSBabb	$\eta_{el} = 0,35$	$\eta_{th} = 0,55$
				[m <sup>3</sup> /d]	[kWh <sub>el</sub> /d]	[kWh <sub>th</sub> /d]
1	26	2.286	59,4	16,6	58,0	91,2
2	71	4.138	293,8	82,3	286,8	450,6
3	21	4.138	86,9	24,3	84,8	133,3
4	26	2.283	59,4	16,6	57,9	91,0
5	205	3.888	797,0	223,2	778,0	1.222,5
6	17	1.342	22,8	6,4	22,3	35,0
7	90	7.600	684,0	191,5	667,6	1.049,1
8	88	2.286	201,2	56,3	196,4	308,6
9	180	1.343	241,7	67,7	236,0	370,8
10	27	4.738	127,9	35,8	124,9	196,2
11	49	1.963	96,2	26,9	93,9	147,5
12	13	4.738	61,6	17,2	60,1	94,5
13	12	4.174	50,1	14,0	48,9	76,8

14	28	3.473	97,2	27,2	94,9	149,2
15	122	4.660	568,5	159,2	554,9	872,0
<b>Summe</b>	<b>975,0</b>		<b>3.447,8</b>	<b>965,4</b>	<b>3.365 kWh/d</b> <b>ca. 1,23 Mio.</b> <b>kWh/a</b>	<b>5.288 kWh/d</b> <b>ca. 1,93 Mio.</b> <b>kWh/a</b>

Tabelle 6: Modellregion Mittelhessen, Szenario 2, Mögliche elektrische und thermische Energieerträge durch die Nutzung von Industrieabwässern als Co-Substrate in den Faulbehältern der Kläranlagen der Region Mittelhessen

Insgesamt könnten also durch die Nutzung von Industrieabwässern als Co-Substrate in den vorhandenen Faulbehältern den Kläranlagen der Region Mittelhessen

- ▶ ca. 1,2 Mio. kWh/a elektrische Energie
- ▶ ca. 1,9 Mio. kWh/a thermische Energie

generiert werden. Es wird im Weiteren davon ausgegangen, dass die so zusätzlich gewonnene thermische Energie zur Beheizung der Faulbehälter eingesetzt wird und nicht extern genutzt wird.

Durch diese Verlagerung der Industrieabwässer von der Indirekteinleitung mit Behandlung in einer aeroben Belebungsanlage zur direkten Nutzung in Faulbehältern werden zudem die Belebungsanlagen der Kläranlagen deutlich entlastet. Damit wird der Energieverbrauch der aeroben Stufen deutlich reduziert. Überschlägig kann von einer Entlastung der Belebungsanlagen in der Größenordnung von 375.000 kWh/a ausgegangen werden.

Durch die direkte Nutzung der Industrieabwässer als Co-Substrate in der Faulung und der damit sich reduzierenden CSB-Zulauf Fracht der Kläranlagen reduziert sich der Überschussschlammfall der kommunalen Kläranlagen und damit auch der Biogasenertrag aus dem Überschussschlamm. Dies kann wie folgt abgeschätzt werden:

- ▶ Reduzierung der CSB-Zulauf-Fracht 3.448 kg/d
- ▶ Reduzierung der Überschussschlammmenge ca. 860 kg TS/d  
ca. 560 kg oTS/d
- ▶ Reduzierung der Faulgasmenge: ca. 0,370 m<sup>3</sup>/kg oTS  
ca. 207 m<sup>3</sup>/d
- ▶ CH<sub>4</sub>-Anteil des Faulgases ca. 60 %
- ▶ Reduzierung der CH<sub>4</sub>-Menge ca. 125 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/d
- ▶ Reduzierung der Primärenergie ca. 1.240 kWh/d
- ▶ Reduzierung der Stromproduktion durch BHKW bei  $\eta_{el} = 0,35$  ca. 433 kWh<sub>el</sub>/d  
ca. 158.000 kWh<sub>el</sub>/a

#### 4.1.3.1 CO<sub>2</sub>-Bilanz

Bei Betrachtung einer Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz müssen folgende Anteile berücksichtigt werden:

- ▶ zusätzliche Stromproduktion durch die Zuführung der getrennt erfassten Industrieabwässer zu den Faulbehältern ,
- ▶ Reduzierung des Energieverbrauchs der Belebungsanlagen, in die die Industrieabwässer bisher über die Kanäle zugeleitet wurden,
- ▶ Transport der Industrieabwässer per Lkw zu den Kläranlagen-Standorten

Ausgehend von den ca. 975 m<sup>3</sup>/d, einer Größe der Tank-Lkw von 30 m<sup>3</sup> sowie einer angenommenen mittleren Transportentfernung von 10 km (zzgl. 10 km für die Rückfahrt) sind täglich Transportentfernungen erforderlich von

- ▶ 975 m<sup>3</sup>/d / 30 m<sup>3</sup>/Lkw \* 20 km = 650 km/d

Die CO<sub>2</sub>-Emission für den Transport ergibt sich mit folgenden Ansätzen:

- ▶ Spezifischer Verbrauch des Lkw: i. M. 30 l Diesel / 100 km
- ▶ Gesamtverbrauch 195 l/d  
entspr. 71.175 l/a
- ▶ Spezifische CO<sub>2</sub>-Emission: 2,64 kg CO<sub>2</sub>/l Diesel
- ▶ Gesamt- CO<sub>2</sub>-Emission aus Diesel-Verbrauch: 515 kg CO<sub>2</sub>/d  
entspr. 187,9 t CO<sub>2</sub>/a

Die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Entlastung der Atmosphäre wurde ermittelt aus

- ▶ Entlastung durch Stromproduktion durch die Nutzung von Industrieabwässern als Co-Substrate in freien Faulbehälterkapazitäten:  
1.228.225 kWh/a \* 565 g CO<sub>2</sub>/kWh: 694,0 t CO<sub>2</sub>/a
- ▶ Entlastung durch Reduzierung des Energieverbrauchs der Belebungsanlagen:  
375.000 kWh/a \* 565 g CO<sub>2</sub>/kWh: 211,9 t CO<sub>2</sub>/a
- ▶ Verringerung der Faulgasproduktion durch Reduzierung der Überschussschlammproduktion, dadurch Reduzierung der Stromproduktion aus der Faulgasnutzung  
158.000 kWh/a \* 565 g CO<sub>2</sub>/kWh: -89,3 t CO<sub>2</sub>/a
- ▶ Belastung durch CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Dieserverbrauch der Tank-Lkw -187,9 t CO<sub>2</sub>/a
- CO<sub>2</sub>-Bilanz (Entlastung der Atmosphäre) 628,7 t CO<sub>2</sub>/a

Es ist zudem für jeden Einzelfall zu prüfen, ob die zusätzlichen Stickstofffrachten, die aus den Industrieabwässern über die Rückbelastung aus den Faulbehältern in die Kläranlagen gelangen, dort eliminiert werden können. Eine Elimination der Stickstoffverbindungen aus Schlammwasser über Deammonifikationsverfahren entspricht dem Stand der Technik.

#### 4.1.4 Szenario 3: Dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung des im Abwasser verfügbaren chemischen Potentials und damit zur Reduzierung der Energieverbräuche der kommunalen Kläranlagen ist die getrennte Erfassung organisch hochbelasteter Industrieabwässer, die bisher indirekt in die Kläranlagen eingeleitet wurden, in dezentralen anaeroben Industrieabwasserbehandlungsanlagen.

Für die Bilanzierung müssen folgende Aspekte herangezogen werden:

- ▶ zur Verfügung stehende Industrieabwässer mit
  - Abwassermenge ( m<sup>3</sup>/d, m<sup>3</sup>/a, ggf. jahreszeitliche Schwankungen )
  - CSB-Werte (mg/l) sowie CSB-Frachten (kg/a)
  - Stickstoff-Konzentrationen ( mg/l ) und Stickstoff-Frachten (kg/a)
- ▶ elektrische und thermische Energie aus der Nutzung des produzierten Faulgases
- ▶ Standortfindungen für dezentrale Anaerobanlagen, in denen die Abwässer mehrerer kleinerer oder mittlerer Industriebetriebe behandelt werden können
- ▶ Energieaufwand für den Transport der Abwässer vom Industriebetrieb zur Anaerobanlage

- ▶ Nachbehandlung des Abwassers durch Vakuumentgasung sowie Deammonifikation
- ▶ Einleitung und Nachbehandlung des Industrieabwassers in kommunalen Kläranlagen

Die Verwertung der Industrieabwässer in dezentralen Anaerobanlagen ist energetisch allerdings nur dann sinnvoll, wenn das daraus gewonnene Faulgas energetisch mindestens den Transportaufwand von der Anfallstelle zur Anaerobanlage deckt. Nach diesem Grundsatz wurde eine „Transportreichweite“ definiert, die einen Radius um den Industriestandort definiert, der noch eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz für den Transport der Abwässer aufweist.

Diese „Transportreichweite“ wurde grafisch als Radius um den Standort des Industriebetriebes aufgetragen. Die sich so ergebenden Radien der einzelnen Betriebe ergeben Überschneidungsbereiche, die als potenzielle Standorte für eine dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlungsanlage gelten.

Für die Modellregion Mittelhessen konnten drei Schwerpunkte ermittelt werden, in denen eine dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung Sinn haben könnte:

- ▶ Schwerpunkt 1: Bereich Limburg-Weilburg
- ▶ Schwerpunkt 2: Bereich Gießen
- ▶ Schwerpunkt 3: Bereich Marburg

In allen drei Schwerpunkten sind Industriebetriebe unterschiedlicher Branchen vertreten.

In der Tabelle 7 sind Abwassermengen sowie CSB-Frachten der einzelnen Betriebe sowie die sich ergebende Transportreichweite zusammengestellt.

Branche	Abwassermenge		CSB	CSB-Fracht	maximale rechnerische Transportreichweite	tatsächliche Transportentfernung zum Standort
	[m <sup>3</sup> /d]	[m <sup>3</sup> /a]	[mg/l]	[kg/a]	[km]	[km]
<b>Schwerpunkt 1: Region Limburg-Weilburg</b>						
Brauerei	60,3	22.000	5.200	114.400	70	20
Chemie / Pharma	9,8	3.584	22.800	81.715	305	17
Chemie / Pharma	6,8	2.500	7.016	17.540	94	12
Fruchtsäfte / Erfrischungsgetränke	21,9	8.000	600	4.800	8	8
Fruchtsäfte / Erfrischungsgetränke	27,4	10.000	900	9.000	11	10
Fruchtsäfte / Erfrischungsgetränke	38,4	14.000	425	5.950	6	5
Lackiererei / Beschichtungen	8,8	3.200	560	1.792	7	6
<b>Summe Schwerpunkt 1</b>	<b>173</b>	<b>63.284</b>		<b>235.197</b>		<b>12,4</b>
<b>Schwerpunkt 2: Region Marburg</b>						
Chemie / Pharma	49,3	18.000	2.000	36.000	27	2
Chemie / Pharma	2.466	900.000	600	540.000	8	2
Lebensmittel	1.644	600.000	2.000	1.200.000	27	18
Schlachthof	6,0	2.200	1.200	2.640	16	2

<b>Summe Schwerpunkt 2</b>	<b>4.165</b>	<b>1.520.200</b>		<b>1.778.640</b>		<b>8,3</b>
<b>Schwerpunkt 3: Region Gießen</b>						
Brauerei	65,8	24.000	3.200	76.800	43	37
Brauerei	98,6	36.000	2.500	90.000	34	18
Molkerei	1.233	450.000	1.500	675.000	20	0
Lebensmittel	1,0	350	240.000	84.000	830	18
<b>Summe Schwerpunkt 3</b>	<b>1.398</b>	<b>510.350</b>		<b>925.800</b>		<b>3,0</b>
<b>Summen Region Mittelhessen</b>						
	<b>5.737</b>	<b>2.093.834</b>		<b>2.939.637</b>		<b>7,1</b>

Tabelle 7 Modellregion Mittelhessen, Szenario 3, Abwassermengen, CSB-Werte sowie CSB-Frachten der Industriebetriebe in den o.g. Schwerpunkt-Bereichen, Transportentfernungen zu möglichen Standorten der dezentralen Anaerobanlagen

Die Abbildung 6 und die Abbildung 7 zeigen beispielhaft die Ermittlung der Schwerpunkte „Marburg“ und „Gießen“ anhand der Transportradien sowie jeweils einen möglichen Standort einer dezentralen Anaerobanlage

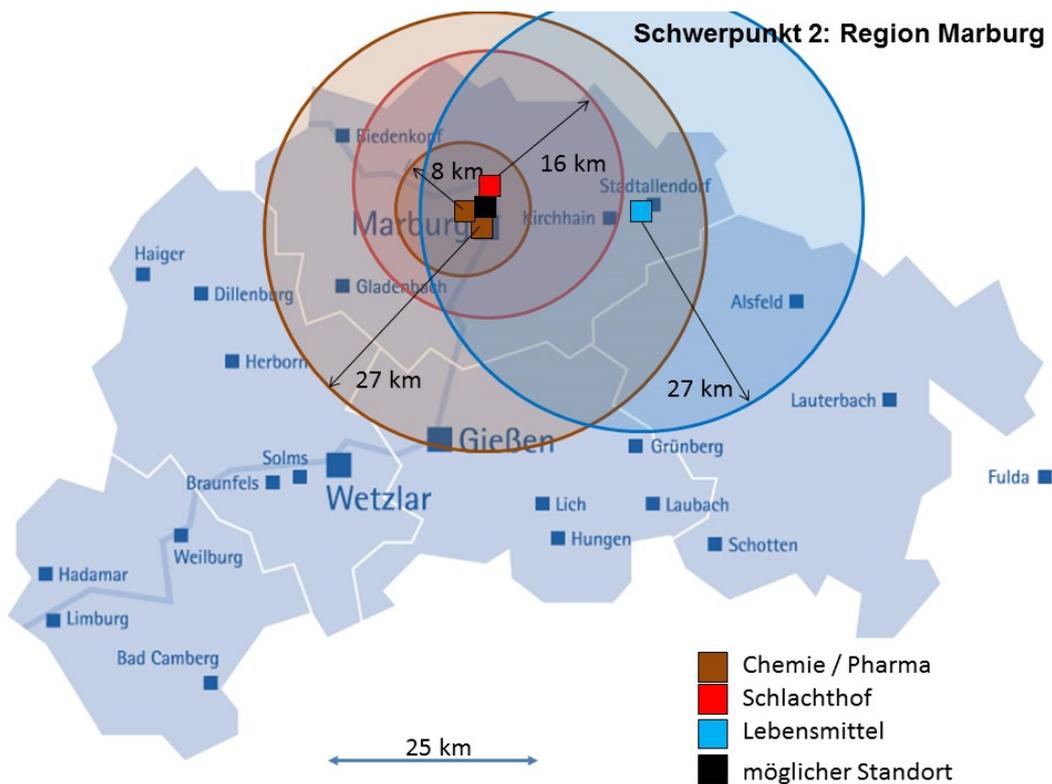


Abbildung 6: Schwerpunkt-Region „Marburg“ mit Standorten verschiedener Industriebetriebe, sich ergebender Transportreichweiten sowie einem potentiellen Standort einer dezentralen Anaerobanlage im Stadtgebiet Marburg z.B. auf dem Gelände der KA Marburg

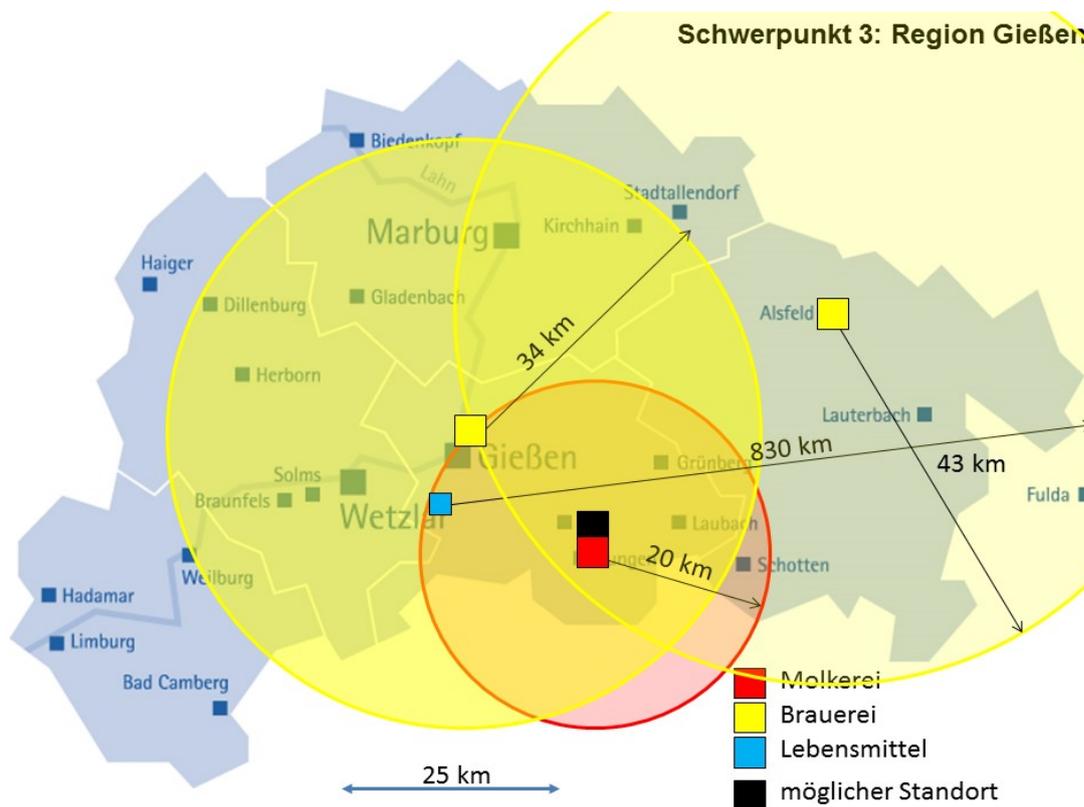


Abbildung 7: Schwerpunkt-Region „Gießen“ mit Standorten verschiedener Industriebetriebe, sich ergebender Transportreichweiten sowie einem potentiellen Standort einer dezentralen Anaerobanlage an der Molkerei Hungen oder der Kläranlage Hungen

Durch den Transport des Abwassers zum entsprechenden Standort der dezentralen Anlage, wird eine weitgehende Auskühlung eintreten, so dass die Zulaufstemperatur zu den Anaerobreaktoren im Jahresmittel nur etwa 12 - 15 °C betragen wird. Die Abwärme der Blockheizkraftwerke kann aufgrund der großen Wassermenge nur geringfügig zur Erwärmung des Abwassers beitragen. Aufgrund der geringen Abwassertemperatur lässt sich auch nur mit einer langen Verweilzeit (angesetzt sind hier 11 bis 12 Stunden) ein CSB-Abbaugrad von ca. 70 % erreichen

Auf der Basis der CSB-Frachten wurden potentielle Energieerträge ermittelt, die bei der Vergärung dieser industriellen Abwässer in dezentralen Anaerobanlagen zu erwarten sind. Folgende Parameter wurden für die Ermittlung herangezogen:

- ▶ CSB-Abbaugrad: 70 %
- ▶ Methanertrag:  $0,35 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg CSB}_{\text{abgebaut}}$
- ▶ Heizwert Methan (Primärenergie):  $9,97 \text{ [kWh/m}^3\text{]}$
- ▶ Nutzung des Biogases in BHKW mit  $\eta_{\text{el}} = 35 \%$  und  $\eta_{\text{th}} = 55 \%$

Der so ermittelten Energie aus der Verstromung des Faulgases steht die benötigte Energie für den Betrieb der Anlagen gegenüber. Hier wurden berücksichtigt:

- ▶ Pumpenergie (Ansatz: Förderhöhe 3 m, Wirkungsgrad der Pumpen  $\eta = 0,7$ )
- ▶ Energiebedarf für die Vakuumentgasung des Ablaufs der Anaerobreaktoren zur Reduzierung der Methanemissionen, Ansatz  $[0,1 \text{ kWh/m}^3]$  (Dünnebeil, 2012)
- ▶ Energiebedarf für die Deammonifikation zur Reduzierung der Stickstoffverbindungen, Ansatz  $[1,5 \text{ kWh/m}^3]$  (Fux & Siegrist, 2004)

In Tabelle 8 ist die Energiebilanz für die Beispielregion Mittelhessen dargestellt. Es ergibt sich als Energiebilanz ein Stromüberschuss von ca. 2,46 Mio. kWh/a, der in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden kann.

		Einheit	Schwerpunkt Region		
			1: Limburg-Weilburg	2: Maburg	3: Gießen
<b>Industrieabwassermenge</b>		[m <sup>3</sup> /a]	63.284	1.520.200	510.350
CSB-Fracht					
Input Anaerobreaktor		[kg/a]	235.197	1.778.640	925.800
Abbau Anaerobreaktor	80	[%]			
		[kg/a]	188.158	1.422.912	740.640
<b>Methanproduktion</b>	0,35	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg CSB <sub>abb.</sub> ]			
		[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /a]	65.855	498.019	259.224
<b>Primärenergie</b>	9,96	[kWh/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ]			
		[kWh/a]	655.918	4.960.271	2.581.871
<b>Energieproduktion BHKW</b>					
<b>thermische Energie</b>					
$\eta_{th}$	55	[%]			
je Schwerpunkt		[kWh/a]	360.755	2.728.149	1.420.029
<b>gesamt Mittelhessen</b>			<b>4.508.933</b>		
<b>elektrische Energie</b>					
$\eta_{el}$	35	[%]			
je Schwerpunkt		[kWh/a]	229.571	1.736.095	903.655
<b>gesamt Mittelhessen</b>			<b>2.869.321</b>		
<b>Strombedarf Industrieabwasserbehandlung</b>					
Pumpwerke	3,85	[Wh/(m <sup>3</sup> *m) $\eta=0,7, h = 3m$			
		[kWh/a]	731	17.558	5.895
Deammonifikation	1,5	[kWh/kg N]			
		[kg N/a]	3.788	78.520	33.663
		[kWh/a]	5.682	117.780	50.494
Vakuumentgasung	0,1	[kWh/m <sup>3</sup> ]			
		[kWh/a]	6.328	152.020	51.035
<b>Summe Strombedarf</b>		[kWh/a]	12.741	287.358	107.423
<b>gesamt Mittelhessen</b>			<b>407.523</b>		
<b>Energieüberschuss (potentielle Stromeinspeisung) aus dezentraler Industrieabwasserbehandlung</b>			<b>2.461.799</b>		

Tabelle 8 Modellregion Mittelhessen, Szenario 3, Energiebilanz für die dezentralen anaeroben Abwasserbehandlungsanlagen, Modellregion Mittelhessen

Durch die Verlagerung der Industrieabwässer von der Indirekteinleitung mit Behandlung in einer aeroben Belebungsanlage zur direkten Nutzung in dezentralen Anaerobanlagen werden zudem die Bele-

bungsanlagen der Kläranlagen deutlich entlastet. Damit wird der Energieverbrauch der aeroben Stufen deutlich reduziert. Überschlägig kann von einer Entlastung der Belebungsanlagen in der Größenordnung von ca. 700.000 kWh/a ausgegangen werden.

Durch die direkte Nutzung der Industrieabwässer in dezentralen Anaerobanlagen und der damit sich reduzierenden CSB-Zulauf-Fracht der Kläranlagen reduziert sich der Überschussschlammanfall der kommunalen Kläranlagen und damit auch der Biogasertag aus dem Überschussschlamm. Dies kann wie folgt abgeschätzt werden:

- |   |   |
|---|---|
| ▶ Reduzierung der CSB-Zulauf-Fracht (zur Belegung):                 | ca. 6.445 kg/d                            |
| ▶ Reduzierung der Überschussschlammmenge                            | ca. 1.711 kg TS/d                         |
|   | ca. 1.110 kg oTS/d                        |
| ▶ Reduzierung der Faulgasmenge:                                     | ca. 0,370 m <sup>3</sup> /kg oTS          |
|   | ca. 415 m <sup>3</sup> /d                 |
| ▶ CH <sub>4</sub> -Anteil des Faulgases                             | ca. 60 %                                  |
| ▶ Reduzierung der CH <sub>4</sub> -Menge                            | ca. 247 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /d |
| ▶ Reduzierung der Primärenergie                                     | ca. 2.460 kWh/d                           |
| ▶ Reduzierung der Stromproduktion durch BHKW bei $\eta_{el} = 0,35$ | ca. 860 kWh <sub>el</sub> /d              |
|   | ca. 314.000 kWh <sub>el</sub> /a          |

#### 4.1.4.1 CO<sub>2</sub>-Bilanz

Bei Betrachtung einer Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz müssen folgende Anteile berücksichtigt werden:

- ▶ Stromproduktion durch dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung,
- ▶ Reduzierung des Energieverbrauchs der Belebungsanlagen, in die die Industrieabwässer bisher über die Kanäle zugeleitet wurden,
- ▶ Transport der Industrieabwässer per Lkw zu den dezentralen Standorten der Anaerobanlagen

In der Tabelle 7 sind die Transportentfernungen der einzelnen Industrieabwässer zu möglichen Standorten der dezentralen Anaerobanlagen aufgelistet. Im gewichteten Mittel ergibt sich eine Transportentfernung von ca. 7,1 km vom Anfallort des Industrieabwassers zum Standort einer Anaerobanlage. Ausgehend von einer zu nutzenden Industrieabwassermenge von ca. 5.737 m<sup>3</sup>/d, einer Größe der Tank-Lkw von 30 m<sup>3</sup> sowie der o.g. mittleren Transportentfernung von 7,1 km (zzgl. 7,1 km für die Rückfahrt) sind täglich Transportentfernungen erforderlich von

- ▶  $5.737 \text{ m}^3/\text{d} / 30 \text{ m}^3/\text{Lkw} * 14,2 \text{ km} = 2.715 \text{ km}/\text{d}$

Die CO<sub>2</sub>-Emission für den Transport ergibt sich mit folgenden Ansätzen:

- |   |  |
|---|--|
| ▶ Spezifischer Verbrauch des Lkw:                         | i. M. 30 l Diesel / 100 km                                 |
| ▶ Gesamtverbrauch   | 815 l/d entspr. 297.350 l/a                                |
| ▶ Spezifische CO <sub>2</sub> -Emission:                  | 2,64 kg CO <sub>2</sub> /l Diesel                          |
| ▶ Gesamt- CO <sub>2</sub> -Emission aus Diesel-Verbrauch: | 2,15 t CO <sub>2</sub> /d entspr. 785 t CO <sub>2</sub> /a |

Die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Entlastung der Atmosphäre wurde ermittelt aus

- ▶ Entlastung durch Stromproduktion durch die Nutzung von Industrieabwässern in dezentralen Anaerobanlagen:  
2.103.133 kWh/a \* 565 g CO<sub>2</sub>/kWh: 1.188 t CO<sub>2</sub>/a
- ▶ Entlastung durch Reduzierung des Energieverbrauchs der Belebungsanlagen:  
ca. 700.000 kWh/a \* 565 g CO<sub>2</sub>/kWh: 396 t CO<sub>2</sub>/a

- ▶ Verringerung der Faulgasproduktion durch Reduzierung der Überschussschlammproduktion, dadurch Reduzierung der Stromproduktion aus der Faulgasnutzung  
314.000 kWh/a \* 565 g CO<sub>2</sub>/kWh: - 193 t CO<sub>2</sub>/a
- ▶ Belastung durch CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Dieserverbrauch der Tank-Lkw - 785 t CO<sub>2</sub>/a
- ▶ CO<sub>2</sub>-Bilanz (Entlastung der Atmosphäre) 606 t CO<sub>2</sub>/a

Der Ablauf der dezentralen anaeroben Industrieabwasserbehandlungsanlagen wird indirekt in das Kanalnetz einer der regionalen Kläranlagen geleitet. Durch die Vorbehandlung der industriellen Abwässer in den dezentralen Anaerobanlagen (inklusive einer Vakuumentgasung sowie Stickstoffelimination durch Deammonifikation) wird der Zulauf der kommunalen Kläranlagen zwar insgesamt deutlich entlastet. Dennoch sind im Rahmen weiterer Projektierungen die Leistungsfähigkeiten der kommunalen Kläranlagen zu überprüfen.

## 4.2 Modellregion Frankfurt

Frankfurt am Main ist mit ca. 717.000 Einwohnern die fünftgrößte Stadt Deutschlands und weist als Großstadt sowohl unterschiedliche Siedlungs- als auch Industrie- und Gewerbestrukturen auf. Wesentliche Industriebetriebe sind in verschiedenen Industrieparks angesiedelt, die u.a. aus ehemaligen Großbetrieben der Chemie- und Pharmaindustrie entstanden sind. Die Industrieparks Höchst und Griesheim sind auch heute noch bedeutende Standorte der chemischen und pharmazeutischen Industrie, allerdings mit einer Vielzahl von Betrieben. Auf beiden Standorten werden eigene Abwasserbehandlungsanlagen mit anaeroben Stufen zur Schlammbehandlung betrieben, das gereinigte Abwasser wird direkt in den Main geleitet. Diese beiden Industriekläranlagen werden im Weiteren nicht berücksichtigt.

Frankfurt betreibt zwei Großklärwerke (Niederrad und Sindlingen), die allerdings trotz ihrer Größenordnung bisher nicht über anaerobe Schlammbehandlungsanlagen (Faulungsanlagen) verfügen (aktuelle Planungen laufen). Die Klärschlämme (Primär- und Überschussschlämme) werden bisher noch in einer Rohschlammverbrennung direkt nach Entwässerung thermisch entsorgt. Die Kläranlage Niederrad hat eine Ausbaugröße von 1.350.000 EW und wird mit ca. 771.000 EW belastet, die Anlage in Sindlingen hat eine Ausbaugröße von 470.000 EW und wird zurzeit mit ca. 225.000 EW belastet. Die Gesamt-Anschlussgröße beider Kläranlagen in Frankfurt liegt also bei ca. 1.000.000 EW.

Der Flughafen Frankfurt besitzt eine eigene Abwasserbehandlungsanlage mit einer Ausbaugröße von 11.000 EW, die Anlage besitzt aufgrund ihrer geringen Größe keine Faulung. Für die folgenden Betrachtungen wird dieser Standort nicht herangezogen.

In der Stadt Frankfurt existiert eine sehr breite Branchenstruktur. Viele größere Industriebetriebe verfügen entweder über eigene Kläranlagen (Es gibt nur wenige größere produzierende Unternehmen ohne eigene Abwasserbehandlungsanlagen).

Zur Berechnung der Einsparpotentiale einer anaeroben Abwasserbehandlung im Hauptstrom wurden analog zur Modellregion Mittelhessen aus den EKVO-Berichten die Abwassermengen und Frachten beider in Frankfurt ansässigen Kläranlagen entnommen und daraus die Belastungen im Jahresmittel ermittelt.

Parameter	Einheit	Zulaufparameter
-----------	---------	-----------------

Anschlussgröße	EW	ca. 1.000.000
Schmutzwassermenge	m <sup>3</sup> /d	ca. 200.000
CSB	mg/l	514
	kg/d	102.800
BSB <sub>5</sub>	mg/l	202
		40.400
abfiltrierbare Stoffe, TS <sub>0</sub>	mg/l	293
		58.596
TKN	mg/l	49,8
		9.960
P <sub>gesamt</sub>	mg/l	9,85
		1.970

Tabelle 9: Zulaufparameter der Modellkläranlage Frankfurt mit 1.000.000 EW

Die einwohnerspezifischen Energieverbräuche der Kläranlagen Niederrad und Sindlingen sind gegenüber einer herkömmlichen aerob/anoxischen Belebungsanlage mit anaerober Schlammstabilisierung überdurchschnittlich hoch (vergl. Tabelle 10). Derzeit sind bereits Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz eingeleitet.

	Einheit	Niederrad	Sindlingen
Einwohnerwerte (Ausbaugröße)	EW	1.350.000	470.000
Einwohnerwerte (tatsächlich)	EW	771.000	225.000
Stromverbrauch (ohne Klärschlammverbrennung)	kWhel/a	32.908.080	17.401.518
Spez. Stromverbrauch	kWh/(EW*a)	42,7	77,3
		i.M. 50,5	
Klärschlammverbrennung	kWhel/a	-	3.497.321
Heizöl (Stützfeuer)	kWhtherm/a	-	28.518.074
Gesamtenergieverbrauch (elektrisch und thermisch)	kWh/a	32.908.080	49.416.913

Tabelle 10: Energieverbräuche der Kläranlagen Sindlingen und Niederrad (Stadtentwässerung Frankfurt (2011))

#### 4.2.1 Referenzanlage Aerob / Anoxische Belebungsanlage mit anaerober Schlammbehandlung (Faulung)

Wie für die Modellregion Mittelhessen werden für die Stadt Frankfurt am Main die theoretischen Stromverbräuche der Varianten 1 und 2 (mit anaerober Kommunalabwasserbehandlung) verglichen mit einer aerob/anoxisch arbeitenden Referenzanlage, berechnet mit anlagenbezogenen Idealwerten gemäß DWA A 216, verglichen. Als Anlagengröße wird die Summe der aktuellen Anschlussgrößen der Kläranlagen Frankfurt-Niederrad und Sindlingen mit ca. 1.000.000 EW gewählt.

Um die Energiebilanzen der Varianten mit anaerober Kommunalabwasserbehandlung bewerten zu können, werden diese im Vergleich zu der Energiebilanz einer herkömmlichen aerob / anoxischen Belebungsanlage mit anaerober Schlammbehandlung als Referenz betrachtet. Folgende Referenzwerte können herangezogen werden:

- ▶ Spezifischer Gesamtstromverbrauch (Medianwert) für die GK 5 gemäß DWA-Leistungsvergleich 2012: 31,9 kWh/(EW\*a)
- ▶ Spezifischer Gesamtstromverbrauch der Kläranlagen Niederrad und Sindlingen (Medianwert) 50,5 kWh/(EW\*a)
- ▶ Spezifischer Gesamtstromverbrauch Berechnung in Anlehnung an die anlagenbezogenen Idealwerte gemäß DWA-Arbeitsblatt 216 (2015) (siehe auch Tabelle 11) 22,5 kWh/(EW\*a)

Die Stromerzeugung aus einer potentiellen Faulgasnutzung kann für die Referenzanlage mit ca. 13,6 kWh/(EW\*a) abgeschätzt werden.

#### **4.2.2 Szenario 1: Anaerobe Kommunalabwasserbehandlung**

Der Energiebedarf der oben beschriebenen Varianten 1 und 2 zur anaeroben Kommunalabwasserbehandlung wurde am Beispiel einer Modell-Kläranlage mit einer Belastung von 1.000.000 Einwohnerwerten (EW) ermittelt. Die Berechnungen orientieren sich an den Ansätzen zur Berechnung anlagenbezogener Idealwerte gemäß DWA Arbeitsblatt 216.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind Tabelle 11 und Tabelle 12 dargestellt.

Bezeichnung	Szenario 1: Variante 1: 1.000.000 EW Anaerobe Behandlung + Deammonifikation		Szenario 1: Variante 2: 1.000.000 EW Anaerobe Behandlung + Deammonifikation + Vakuumentgasung		Referenz 1.000.000 EW Aerob/Anoxische Be- lebungsanlage anlagenbez. Idealwert DWA A 216	
	kWh/(EW·a)	%	kWh/(EW·a)	%	kWh/(EW·a)	%
Hebewerk Anlagenzu- lauf	1,31	7,2	1,31	5,1	1,31	5,8
Rechenanlage	0,07	0,4	0,07	0,3	0,07	0,3
Sandfang/Fettfang	1,34	7,4	1,34	5,2	1,34	5,9
Vorklärbecken		0,0		0,0	0,21	0,9
Primärschlamm-pumpen	0,01	0,1	0,10	0,4	0,10	0,4
Pumpe Anaerobreaktor	1,30	7,1	1,30	5,1	-	
Vakuumentgasung	-		7,38	28,7	-	
Belebungsanlage	5,04	27,7	5,04	19,6	15,87	70,4
NKB	0,14	0,8	0,14	0,5	0,14	0,6
Deammonifikation	5,50	30,2	5,50	21,4		0,0
Schlammbehandlung	0,50	2,7	0,50	1,9	0,50	2,2
Sonstiges	3,00	16,5	3,00	11,7	3,00	13,3
<b>Summe</b>	<b>18,21</b>	<b>100</b>	<b>25,68</b>	<b>100</b>	<b>22,54</b>	<b>100</b>
<b>bei 1.000.000 EW</b>	<b>18.210.000 kWh/a</b>		<b>25.680.000 kWh/a</b>		<b>22.540.000 kWh/a</b>	

Tabelle 11 Modellregion Frankfurt: Szenario 1: Ergebnisse der Energiebilanz aller Varianten, bezogen auf 1.000.000 EW

In Tabelle 12 sind die Methanausbeuten und -verluste (Einträge in die Atmosphäre) der einzelnen Varianten zusammengetragen. Zusätzlich werden die potentiellen Stromerträge bei Nutzung des Klärgases in einem BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von  $\eta_{el} = 35\%$  dargestellt.

Bezeichnung	Szenario 1: Variante 1: 1.000.000 EW Anaerobe Behandlung + Deammonifikation		Szenario 1: Variante 2: 1.000.000 EW Anaerobe Behandlung + Deammonifikation + Vakuumentgasung		Referenz 1.000.000 EW Aerob/Anoxische Be- lebungsanlage anlagenbez. Idealwert DWA A 216	
<b>Methanausbeute</b>	18.837 m <sup>3</sup> /d		23.977 m <sup>3</sup> /d		10.708 m <sup>3</sup> /d	
	6.875.505 m <sup>3</sup> /a		8.751.605 m <sup>3</sup> /a		3.908.420 m <sup>3</sup> /a	
<b>Methanverluste in die Atmosphäre</b>	5.140 m <sup>3</sup> /d					
	1.876.100 m <sup>3</sup> /a					
<b>Stromerzeugung BHKW <math>\eta_{el} = 35\%</math></b>	<b>23.968.010 kWh/a</b>		<b>30.508.095 kWh/a</b>		<b>13.624.752 kWh/a</b>	
<b>Strombedarf</b>	<b>18.210.000 kWh/a</b>		<b>25.680.000 kWh/a</b>		<b>22.540.000 kWh/a</b>	

<b>Strombilanz:</b>			
+: positive Bilanz	<b>5.758.010 kWh/a</b>	<b>4.828.095 kWh/a</b>	
-: negative Bilanz			<b>-8.915.248 kWh/a</b>
<b>Eigenversorgungsgrad Strom</b>	132 %	119 %	60 %
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz</b>			
<b>CO<sub>2</sub> (Strom)</b> 565 g CO <sub>2</sub> /kWh	-3.253 t CO <sub>2</sub> /a	-2.728 t CO <sub>2</sub> /a	5.037 t CO <sub>2</sub> /a
<b>CO<sub>2</sub> (Methan, GWP 21)</b>	28.367 t CO <sub>2</sub> /a	0 t CO <sub>2</sub> /a	0 t CO <sub>2</sub> /a
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz</b>	<b>25.113 t CO<sub>2</sub>/a</b>	<b>-2.728 t CO<sub>2</sub>/a</b>	<b>5.037 t CO<sub>2</sub>/a</b>

Tabelle 12: Modellregion Frankfurt: Szenario 1: Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz aller Varianten, bezogen auf 1.000.000 EW

Tabelle 12 weist für Variante 1 zwar einen Eigenversorgungsgrad von 132 % aus, allerdings weist diese Variante aufgrund der großen im Abwasser gelösten und bei der aeroben Nachbehandlung ausgetriebenen Methanmenge eine sehr ungünstige CO<sub>2</sub>-Bilanz auf. Diese ist deutlich besser in der Variante 2, bei der das gelöste Methan über eine Vakuumentgasung aus dem Abwasser weitgehend entzogen wird. Damit stellt in diesem Fall die Variante 2 die ökologisch sinnvollste Variante dar.

Die Variante 2 weist gegenüber der aerob/anoxischen Referenz-Behandlung eine Gesamt-CO<sub>2</sub>-Entlastung der Atmosphäre auf von

$$5.037 + 2.728 = 7.765 \text{ t CO}_2/\text{a}$$

#### 4.2.3 Szenario 2: Nutzung freier Faulraumkapazitäten

Da die Kläranlagen der Stadt Frankfurt derzeit keine Faulbehälter haben, kann hier aktuell kein Einsparpotenzial erzielt werden. Sollten die Kläranlagen mit Faulbehältern ausgestattet werden, wäre es sinnvoll, die anaerobe Behandlung für industrielle Indirekteinleiter bei der Dimensionierung zu berücksichtigen.

#### 4.2.4 Szenario 3: Dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung

Der Anteil der industriellen Einleiter ohne eigene Abwasserbehandlung beschränkt sich auf wenige Betriebe im engeren Stadtgebiet. Aufgrund Anzahl und räumlicher Nähe wird für das Stadtgebiet Frankfurt nur ein Standort für eine dezentrale Anaerobanlage betrachtet. Eine genaue Standortfestlegung innerhalb des Stadtgebiets ist im Rahmen des Vorhabens nicht durchgeführt worden.

Branche	Abwassermenge		CSB	CSB-Fracht	maximale rechnerische Transportreichweite
	[m <sup>3</sup> /d]	[m <sup>3</sup> /a]	[mg/l]	[kg/a]	[km]
Fleischverarbeitung	27,4	10.000	1115	11.150	15
Brauerei	75,9	27.700	3633	100.634	49
Fruchtsäfte/Erfrischungsgetränke	21,9	8.000	600	4.800	8
Großbäckerei	1.096	400.000	2000	800.000	27
Schlachtbetrieb	7,1	2.600	1200	3.120	16
<b>Summen Schwerpunkt Frankfurt</b>	<b>1.228</b>	<b>448.300</b>		<b>919.704</b>	

Tabelle 13: Industrielle Indirekteinleiter im Stadtgebiet Frankfurt

		Einheit	Schwerpunkt Frankfurt
<b>Industrieabwassermenge</b>		[m <sup>3</sup> /a]	448.300
<b>CSB-Fracht</b>			
Input Anaerobreaktor		[kg/a]	919.704
Abbau Anaerobreaktor	80	[%]	
		[kg/a]	735.763
<b>Methanproduktion</b>	0,35	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg CSB <sub>abb.</sub> ]	
		[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /a]	257.517
<b>Primärenergie</b>	9,96	[kWh/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ]	
		[kWh/a]	2.564.871
<b>Energieproduktion BHKW</b>			
<b>thermische Energie</b> $\eta_{th}$	55	[%]	
		[kWh/a]	1.410.679
<b>elektrische Energie</b> $\eta_{el}$	35	[%]	
		[kWh/a]	897.705
<b>Strombedarf Industrieabwasserbehandlung</b>			
Pumpwerke	3,85	[Wh/(m <sup>3</sup> *m) $\eta=0,7, h = 3m$	
		[kWh/a]	5.178
Deammonifikation	1,5	[kWh/kg N]	
		[kg N/a]	7.906
		[kWh/a]	11.859
Vakuumentgasung	0,1	[kWh/m <sup>3</sup> ]	
		[kWh/a]	44.830
<b>Summe Strombedarf</b>		[kWh/a]	61.867
<b>Energieüberschuss (potentielle Stromeinspeisung) aus dezentraler Industrieabwasserbehandlung</b>			<b>835.838</b>

Tabelle 14 Modellregion Frankfurt: Szenario 3: Energiebilanz für die dezentrale anaerobe Abwasserbehandlungsanlage, Standort Frankfurt a. Main

Wie auch in der Beispielregion Mittelhessen kann durch dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung unter Berücksichtigung des Eigenenergiebedarfs ein Energieüberschuss erzielt werden.

#### 4.2.4.1 CO<sub>2</sub>-Bilanz

Die Berechnung der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz erfolgt analog zu der Berechnung für Mittelhessen.

- ▶ Stromproduktion durch dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung,
- ▶ Reduzierung des Energieverbrauchs der Belebungsanlagen, in die die Industrieabwässer bisher über die Kanäle zugeleitet wurden,
- ▶ Transport der Industrieabwässer per Lkw zum dezentralen Standort der Anaerobanlage

Für den Transport wird eine mittlere Entfernung von dem Industriebetrieb zur Anaerobanlage von 5 km (zzgl. 5 km für die Rückfahrt) angesetzt:

▶  $1.228 \text{ m}^3/\text{d} / 30 \text{ m}^3/\text{Lkw} * 10 \text{ km} = 409 \text{ km}/\text{d}$

Die CO<sub>2</sub>-Emission für den Transport ergibt sich mit folgenden Ansätzen:

▶ Spezifischer Verbrauch des Lkw: i. M.	30 l Diesel / 100 km
▶ Gesamtverbrauch	122,8 l/d entspr. 44.822 l/a
▶ Spezifische CO <sub>2</sub> -Emission:	2,64 kg CO <sub>2</sub> /l Diesel
▶ Gesamt- CO <sub>2</sub> -Emission aus Diesel-Verbrauch:	324 kg CO <sub>2</sub> /d entspr. 118 t CO <sub>2</sub> /a

Die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Entlastung der Atmosphäre wurde ermittelt aus

▶ Entlastung durch Stromproduktion durch die Nutzung von Industrieabwässern in dezentralen Anaerobanlagen: 835.838 kWh/a * 565 g CO <sub>2</sub> /kWh:	472 t CO <sub>2</sub> /a
▶ Entlastung durch Reduzierung des Energieverbrauchs der Belebungsanlagen: ca. 272.000 kWh/a * 565 g CO <sub>2</sub> /kWh:	154 t CO <sub>2</sub> /a
▶ Belastung durch CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Dieserverbrauch <u>der Tank-Lkw</u>	- 118 t CO <sub>2</sub> /a
CO <sub>2</sub> -Bilanz (Entlastung der Atmosphäre)	508 t CO <sub>2</sub> /a

Der Ablauf der dezentralen anaeroben Industrieabwasserbehandlungsanlage wird indirekt in das Kanalnetz der städtischen Kläranlagen geleitet. Durch die Vorbehandlung der industriellen Abwässer in der dezentralen Anaerobanlage (inklusive einer Vakuumentgasung sowie Stickstoffelimination durch Deammonifikation) wird der Zulauf der kommunalen Kläranlagen zwar insgesamt deutlich entlastet. Dennoch sind im Rahmen weiterer Projektierungen die Leistungsfähigkeiten der kommunalen Kläranlagen zu überprüfen.

## 5 Zusammenfassung, Ausblick und Forschungsbedarf

Es wurde gezeigt, dass durch konsequenten Einsatz der Anaerobtechnik eine deutliche Reduzierung des Energiebedarfs der kommunalen Abwasserreinigung mit Wandlung der Abwasserbehandlung vom großen Energieverbraucher hin zum Energieproduzenten möglich ist.

Durch eine getrennte Erfassung organisch hoch belasteter Abwasserströme aus Industrie und Gewerbe und damit Abtrennung aus der herkömmlichen Schmutzwasserableitung ist die Nutzung des Energieinhalts in Anaerobanlagen möglich. Die ohne großen zusätzlichen Aufwand machbare Zuführung als Co-Substrate in die kommunalen Faulbehälter sollte seitens der Betreiber der Kläranlagen aktiv initiiert werden. Die kommunalen Faulbehälter in der Region Mittelhessen verfügen zwar fast alle über Reserven zur Aufnahme der Industrieabwässer, allerdings ist es nicht möglich, alle in der Region anfallenden Industrieabwässer als Co-Substrate zu nutzen.

Um dies zu erreichen wäre der Bau dezentraler Anaerobanlagen zur Verwertung der Industrieabwässer erforderlich. Für die Region Mittelhessen wurden 3 mögliche Standorte ermittelt, an denen sinnvoll UASB-Reaktoren mit Vakuumentgasung und BHKW-Anlagen zur Nutzung des Biogases sowie Anlagen zur Deammonifikation zur weitgehenden Stickstoffelimination realisiert werden könnten. Die Abwässer würden dann per Lkw zu diesen Standorten transportiert. Das elektrische Energiepotential allein aus den Industrieabwässern in der Region Mittelhessen liegt bei ca. 1,5 Mio. kWh/a. Für die Stadt Frankfurt wurde ein elektrisches Energiepotential von ca. 835.000 kWh/a errechnet; der geringere Wert ist begründet durch die bereits erfolgte weitgehende Erfassung von Industrieabwasserströmen in den im Stadtgebiet vorhandenen Industrieparks, die über eigene Abwasserbehandlungsanlagen verfügen.

Durch die getrennte Erfassung von Industrieabwässern wird aber nur ein geringer Teil der organischen Inhaltsstoffe der gesamten Abwässer genutzt; das Potential der häuslichen und kleingewerblichen Abwässer bleibt ungenutzt.

Eine sehr weitgehende Nutzung des chemischen Energiepotentials der gesamten Abwässer wäre durch konsequente Umstellung von der aktuellen herkömmlichen Abwasserreinigung – in der Regel in aerob / anoxischen Belebungsanlagen mit Klärschlammfäulung – hin zu einer anaeroben Behandlung der gesamten kommunalen Abwasserströme im Hauptstrom möglich. Die grundsätzliche Machbarkeit wurde in verschiedenen Forschungsvorhaben in den vergangenen Jahren auch für kommunale Abwässer mit niedrigen Abwassertemperaturen nachgewiesen. Die technische Umsetzung wäre aber mit erheblichem Aufwand verbunden. Erforderlich wären

- ▶ Anaerob-Reaktoren bemessen für große Wassermengen (sinnvoll wäre natürlich eine Umstellung vom Mischsystem zum Trennsystem) sowie geringe Abwassertemperaturen
- ▶ Vakuumentgasungsanlagen zur Abtrennung des bei niedrigen Abwassertemperaturen gelösten Biogases (insbesondere des klimaschädlichen Methans)
- ▶ Anlagen zur weitgehenden Stickstoffelimination ohne leicht verfügbaren organischen Kohlenstoff (z.B. Deammonifikationsanlagen)
- ▶ aerobe Nachbehandlung zur Rest-CSB-Elimination

Durch eine derartige Verfahrenskombination der anaeroben Kommunalabwasserbehandlung könnten Kläranlagen nicht nur energieautark betrieben werden, sondern als Stromproduzenten elektrische Energie ins öffentliche Stromnetz abgeben.

Für die Region Mittelhessen ergibt sich rechnerisch eine Stromeinspeisung ins öffentliche Netz von ca. 8,9 Mio. kWh/a entsprechend ca. 7,6 kWh/(EW\*a).

Sowohl bei der Umsetzung der Anaerobtechnik mit Vakuumentgasung als auch bei der Deammonifikation besteht insbesondere in Bezug auf geringe Konzentrationen sowie geringe Abwassertemperaturen noch erheblicher Forschungsbedarf.

In Tabelle 15 sind die Energiebilanzen der oben erläuterten Varianten der Nutzung der Anaerobtechnik zusammengestellt.

		Region Mittel-hessen	Stadt Frankfurt
<b>angeschlossene Einwohnerwerte</b>	[EW]	1.165.000	1.000.000
<b>elektrischer Energiebedarf</b>			
<b>Bestand</b>			
Stromverbrauch der Kläranlagen (Bestand) (ermittelt aus EKVO-Berichten 2011)	[kWh/a]	31.222.000	50.309.598
	[kWh/EW*a]	26,8	50,3
Stromproduktion aus Biogas, Klärschlammfäulung	[kWh/a]	-11.450.000	keine Faulbehälter vorhanden
Bilanz	[kWh/a]	19.772.000	50.309.598
	[kWh/EW*a]	17,0	50,3
<b>aerob/anoxische Referenzanlage (optimiert, anlagenbezogener Idealwert)</b>			
Stromverbrauch der Kläranlagen (ermittelt nach DWA A 216)	[kWh/a]	27.858.600	22.540.000
	[kWh/EW*a]	23,9	22,5

Stromproduktion aus Biogas, Klärschlammfäulung	[kWh/a]	-18.258.797	-13.624.752
Bilanz	[kWh/a]	9.599.804	8.915.248
	[kWh/EW*a]	8,2	8,9
<b>Szenario 1: Anaerobe Kommunalabwasserbehandlung im Hauptstrom</b>			
Stromverbrauch der Kläranlagen	[kWh/a]	27.188.700	25.680.000
Stromproduktion aus Biogas	[kWh/a]	-36.072.257	-30.508.095
Bilanz	[kWh/a]	-8.883.557	-4.828.095
	[kWh/EW*a]	-7,6	-4,8
<b>Szenario 2: Nutzung freier Faulbehälterkapazitäten</b>			
Stromverbrauch der Kläranlagen (Bestand) abzgl. CSB-Belastung Industrie	[kWh/a]	30.847.000	nicht möglich, da keine Faulbehälter vorhanden
Stromproduktion aus Biogas, Klärschlammfäulung (reduzierte ÜS-Menge)	[kWh/a]	-18.100.797	
Stromproduktion aus Biogas, produziert aus Industrieabwasser als Co-Substrat	[kWh/a]	-1.228.225	
Bilanz	[kWh/a]	11.517.979	
	[kWh/EW*a]	9,9	
<b>Szenario 3: Dezentrale anaerobe Industrieabwasserbehandlung</b>			
Stromverbrauch der Kläranlagen (Bestand) abzgl. CSB-Belastung Industrie	[kWh/a]	30.522.000	50.309.598
Stromproduktion aus Biogas, Klärschlammfäulung (reduzierte ÜS-Menge)	[kWh/a]	-17.944.797	keine Faulbehälter vorhanden
Stromproduktion aus Biogas, produziert aus Industrieabwasser in dezentralen Anaerobanlagen	[kWh/a]	-2.461.799	-835.838
Bilanz	[kWh/a]	10.115.405	49.473.760
	[kWh/EW*a]	8,7	49,5

Tabelle 15: Energiebilanzen bei Nutzung der Anaerobtechnik in der kommunalen Abwasserbehandlung, Vergleich der Szenarien, Modellregionen Mittelhessen und Frankfurt

Zur Nutzung freier Faulraumkapazitäten sollten die Potentiale aller Anlagen mit Fäulung untersucht werden. Erfahrungen in aktuell diskutierten Projekten zeigen aber auch den erheblichen Wettbewerb um das energetische Potential, das in hochkonzentrierten Abwasserströmen steckt.

Langfristig sollten Verfahrenskombinationen mit anaerober Behandlung der kommunalen Abwässer im Hauptstrom sowie einer Stickstoffelimination durch Deammonifikation weiterentwickelt werden. Zum einen, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich zu senken und zum anderen, um das chemische Potenzial des Abwassers für die Bereitstellung von elektrischer Energie zu nutzen. Ob aber die mikrobiologischen Randbedingungen dies zulassen, müssen weitere Untersuchungen im labor-, halb- und großtechnischen Maßstab zeigen.

## 6 Literatur

- Abdel – Halim (2005) :Anaerobic Municipal Wastewater Treatment. Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover, Heft 133
- Austermann-Haun, Ute (2011): Persönliche Mitteilung
- Dosta, J., Fernandez, I., Vázquez-Padin, J.R., Mosquera-Corrol, A., Campos, J.L., Mata-Álvarez, J., Mendez, R. (2008) Short- and long-term effects of temperature on the anammox process. *Journal of Hazardous Materials* 154, S 688–693
- Dünnebeil, Andreas (2012): Faulschlamm-Vakuumentgasung zur Ertüchtigung der Nacheindickung. persönliche Mitteilung,
- DWA IG-5.1 (2009) 7. Arbeitsbericht: Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern. *Korrespondenz Abwasser Abfall* 56(11):1147-1152
- DWA (2012) 25. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen, Hennef, 2012
- DWA (2015), Arbeitsblatt 216, Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, Verlag DWA, Hennef, ISBN 978-3-88721-276-6
- Egli, K., Fanger, U., Alvarez, P.J.J. (2001) Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate. *Arch. Microbiol.* 175, S 198–207
- Elmitwalli, T., Zandvoort, M., Zeeman, G., Bruning, H., Lettinga, G., (1999) Low temperature treatment of domestic sewage in up-flow anaerobic sludge blanket and anaerobic hybrid reactors, *Water Science and Technology* 39 (5) 177-185;
- Elmitwalli T., Zeeman Gr., Lettinga G., (2001) Anaerobic treatment of domestic sewage at low temperature, *Water Science and Technology*, 44 (4) 33-40;
- Fux,C.; Siegrist,H. (2004): Nitrogen removal from sludge digester liquids by nitrification/denitrification or partial nitrification/anammox: environmental and economical considerations. *Water Science and Technology* Vol. 50, Nr. 10 S. 19-26
- Grin, P.C.;Roersma, R.E.;Lettinga, G. (1983): Anaerobic treatment of raw sewage at lower temperature. In *Proceeding of the European Symposium on Anaerobic Wastewater*
- Haberkern, Bernd; Maier, Werner Dr.; Schneider, Ursula (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Hrsg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, Texte 11/08
- Hinken, L., Urban, I., Weichgrebe, D., Dai, X., Rosenwinkel, K.-H. Anaerobe Kommunalabwasserbehandlung unter außereuropäischen Randbedingungen, in Ruhruniversität Bochum (Hrsg.) (2010): Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und Abwasserentsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung, Band 2: Leitfaden zur Abwassertechnologie in anderen Ländern, ISBN 3-9810255-5-5, Bochum 2010
- HMUELV 2010, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Abwassereigenkontrollverordnung, GVBl. I 2010, 257
- Kayser, Rolf (2001): Abwasserreinigungstechnologie – Einführung -, in Wagner, W. *Abwassertechnik und Gewässerschutz* Band 3 (Nr. 7100), C.F. Müller Verlagsgruppe Heidelberg
- Kolisch, Gerd; Friedrich, Michael (2009): Energieeinsatz auf Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern: Leitfaden zur Optimierung. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.), 08/2009
- Lettinga G. et al. (1981): Anaerobic treatment of sewage and low strength waste waters. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Anaerobic Digestion*, pp. 271–291
- Monroy, O.; Noyola, A.;Ramirez, F.; Guiot, J.P. (1988): Anaerobic digestion of water hyacinth as a highly efficient treatment process for developing countries. *Proceedings of the 5th. International symposium on Anaerobic Digestion*, Bologna S. 747 – 757
- Müller, E. A.; Kobel, B; Pinnekamp, J.; Böcker, K. (1999): Energie in Kläranlagen. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW (Hrsg.)
- Rosenwinkel, K. H., Beier, M., Phan, L. C., & Hartwig, P. (2009). Conventional and advanced technologies for biological nitrogen removal in Europe. *Water Practice & Technology*, 4(1).

- Rosenwinkel, K.-H., Beier, M., Sander, M. (2011) Verbesserung der Energiebilanz von Kläranlagen durch Deammonifikation. 44. In: Tagungsband zur Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, 23.3.–25.3.2011 in Aachen
- Rosenwinkel, K.-H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F., Weiland, P. (Hrsg.), (2015): Anaerobtechnik. 3. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-24895-5
- RP Gießen (2011), EKVO-Daten 2010, persönliche Mitteilung
- Tawfik, A.; Ohashi, A.; Harada, H. (2006): Sewage treatment in a combined up-flow anaerobic sludge blanket (UASB)-down-flow hanging sponge (DHS) system. *BiochemicalEngineeringJournal* 29, S. 210–219
- Theilen, Ulf; Liebeneiner, Rolf (2011): Arbeitshilfe zur Verbesserung der Energieeffizienz von Abwasserbehandlungsanlagen: Anforderungen an die Planung und Durchführung. Herausgegeben vom Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz HMUELV, 08/2011
- Uemura S., Harada H. (2000): Treatment of sewage by a UASB reactor under moderate to low temperature conditions. *Bioresource Technology* 72(3), S. 275–83.