

Ökobilanz Klärgasverstromung

Projekt 41863 Verfügung 83688

Ausgearbeitet durch

Claudio Ronchetti, Peter Bienz, Roland Pridal

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Bericht November 2002

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Gruppe Energie in ARA

Auftragnehmer:

Swiss TS Technical Services AG
CH-3601 Thun
www.swissts.ch

Autoren:

Claudio Ronchetti, Peter Bienz, Roland Pridal

Critical Review:

Dr. Arthur Wellinger, Nova Energie GmbH, CH-8355 Aadorf

Begleitgruppe:

Ernst A. Müller, Büro eam, CH-8001 Zürich
Beat Kobel, Ryser Ingenieure AG, CH-3000 Bern

Dieses Dokument ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie erarbeitet worden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind alleine die Autoren verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern
www.admin.ch/bfe

Ökobilanz Klärgasverstromung

Inhalt

1. Zusammenfassung
2. Zielsetzung und Untersuchungsrahmen
 - 2.1 Zielsetzung
 - 2.2 Untersuchungsrahmen
 - 2.3 Festlegung
3. Beschreibung der Systeme
 - 3.1 Variante A: aerobe Stabilisierung (ohne Klärgasproduktion)
 - 3.2 Variante B: anaerobe Stabilisierung (mit Klärgasproduktion)
4. Sachbilanz
 - 4.1 Variante A: aerobe Stabilisierung
 - 4.2 Variante B: anaerobe Stabilisierung
5. Wirkungsabschätzung und Bewertung
6. Schlussfolgerung

Anhang A: Klärgasnutzung mit Wärme-Kraft-Kopplung

Anhang B: Begriffe und Abkürzungen

Anhang C: Kennwertmodell

Anhang D: Literaturverzeichnis

1. Zusammenfassung

Aus Klärgas erzeugter Strom soll als Ökostrom mit dem Label *naturemade star* des Vereins für umweltgerechte Elektrizität VUE zertifiziert werden. Die dazu notwendigen Entscheidungsgrundlagen werden in dieser Ökobilanz erarbeitet.

Bei der Reinigung des Abwassers in Kläranlagen entsteht durch biochemische Prozesse Rohschlamm. Zur weiteren Nutzung muss dieser Schlamm in einen stabilen Zustand gebracht werden, in dem keine weiteren Um- und Abbaureaktionen mehr stattfinden und die geruchsbildenden Inhaltsstoffe verringert werden. Diese Umwandlung kann mit zwei Verfahren, der aeroben und der anaeroben Stabilisierung realisiert werden. Bei der aeroben Stabilisierung erfolgt dies durch die energieintensive Zuführung von Sauerstoff in das Stabilisierungsbecken. Bei der anaeroben-mesophilen Stabilisierung (Faulung) erfolgt der Umwandlungsprozess bei Temperaturen von 33-38°C unter Ausschluss von Sauerstoff im Faulturm. Dabei entsteht Klärgas das zu rund 2/3 aus Methan und zu 1/3 aus Kohlendioxid besteht. Der Heizwert dieses Gases ist mit 6,4 kWh/Nm³ nur 1/3 tiefer als jener von Erdgas. Das Klärgas eignet sich sehr gut für die Wärmekraftkoppelung. Die durch das Blockheizkraftwerk BHKW erzeugte Wärme reicht für die Aufrechterhaltung des Faulprozesses und versorgt die anderen thermischen Verbraucher einer ARA. Bei der aeroben Stabilisierung entsteht kein Klärgas.

Der VUE fordert, dass nur ARA mit *naturemade star* zertifiziert werden, die im Vergleich zu einer hypothetischen Referenzanlage (Stand 1995) einen ökologischen Mehrwert von mindestens 14 Eco-Indicator 99 Punkten ausweisen können.

Der Unterschied von ARA mit aerobem zu ARA mit anaerobem Verfahren liegt nur in der Behandlung des Rohschlammes. Bei der aeroben Stabilisierung sind es die Systemelemente Stabilisierungsbecken mit Belüftungsgebläsen, bei der anaeroben

Stabilisierung die Faultürme, Gasometer und BHKW. Deshalb werden die ökologischen Auswirkungen dieser Anlagenteile bei modernen und älteren Anlagen untersucht und die Differenz bewertet.

Moderne ARA mit anaerober Stabilisierung sind verfahrenstechnisch und energetisch optimiert. Dazu gehört eine maximale Reinigungsleistung bei minimalem Einsatz von Betriebsstoffen und Energie. Gebäude und Faultürme sind gut isoliert. Der Antrieb von Lüfter und Pumpen erfolgt über Frequenzumformer oder Pumpengruppen und können deshalb im energetisch optimalen Arbeitspunkt gefahren werden. Es wird möglichst viel Klärgas erzeugt und dieses mit möglichst hohem Wirkungsgrad mit BHKW in Strom und Wärme umgewandelt.

Die Ergebnisse zeigen die Dominanz des Energieverbrauches bzw. der zugeführten Energie aus nicht erneuerbaren Quellen und der Emissionen. Die Belastungen durch den Bau der Infrastruktur sind sekundär. Bei den Emissionen wurde das Treibhausgas Kohlendioxid als neutral betrachtet, da nur soviel CO₂ emittiert wird, wie einige Monate zuvor in der Biomasse assimiliert wurde.

Der Vergleich einer typischen neuen ARA für 100'000 Einwohnerwerte (Variante 1 in Tabelle 0) zu einer typischen älteren Anlage (Variante 4 in Tabelle 0) ergibt eine Differenz von 43 Eco-Indicaor 99 Punkten. Die ökologischen Verbesserungen der letzten sieben Jahre sind also wesentlich besser als die zulässige Belastung von 14 Eco-Indicator 99 Punkten pro erzeugter MWh Strom. Trotz des höheren Infrastrukturaufwandes und benötigter Wärme für die Aufrechterhaltung des Faulprozesses, schneiden ARA mit anaerober Stabilisierung ökologisch besser ab. Hauptgrund ist die Verstromung des Klärgases in möglichst grossen, auf die anfallende Klärgasmenge optimierten BHKW. Diese Stromproduktion deckt bei gut konzipierten Anlagen 50 - 60% des elektrischen Energieverbrauches der ARA. Die Abwärme des BHKW reicht zur Versorgung der gesamten ARA. Hinzu kommt die Senkung des elektrischen Energieverbrauches von 41 MWh pro 1000 Einwohnerwerte pro Jahr auf 34 MWh/1000 EW a.

Tabelle 0: Wichtigste Einflussgrössen und Bewertung der untersuchten ARA

ARA Stand der Technik		TOP	NEU	ALT	
Variante		0	1	3	4
BHKW Typ		2x 150 kW el Mager	2x 120 kW el Mager	2x 70 kW el Mager	1x 70 kW el kat
Abfackelung	%	2	5	20	31
BHKW elektr. Wirkungsgrad	%	35	32	30	30
Methanverluste	%	0.5	0.75	1	1
Stromerzeugung BHKW	MWh/1000EW a	20	18	9	4
Stromverbrauch ARA total	MWh/1000EW a	34	34	41	41
Elektr. Eigenversorgungsgrad	%	59	52	22	11
Umweltbelastung pro MWh Stromerzeugung	EI-99 Punkte/kWh	-3	-1	14	42
Delta zu Variante 1	EI-99 Punkte/kWh	-2	0	15	43

Ebenfalls wurden alternative Klärgasnutzungen untersucht, nämlich die Klärgaseinspeisung ins Erdgasnetz oder der direkte Verkauf an Dritte, v.a. als Treibstoff für Fahrzeuge. Auch bei diesem Vergleich hat sich die Verstromung als vorteilhafter erwiesen.

Die Erzeugung von Strom aus Klärgas ist energetisch und ökologisch sinnvoll.

2. Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

2.1 Zielsetzung

Der Vorstand des VUE Verein für umweltgerechte Elektrizität hat am 30.8.2001 beschlossen, Strom, der aus Klärgas von Abwasserreinigungsanlagen (ARA) erzeugt wird, mit dem Label „naturemade star“ zu zertifizieren ¹⁾.

Um mit diesem Label ausgezeichnet zu werden, müssen lokale und globale Kriterien erfüllt werden²⁾. Die Beurteilung der globalen Auswirkungen der Stromerzeugung erfolgt auf der Basis einer Ökobilanz, d.h. einer Zusammenstellung und Bewertung von Stoff- und Energieflüssen. Die Bewertung der globalen ökologischen Belastung erfolgt in EI-99 Punkten nach der Eco-Indicator 99 Methode. Dabei muss die Energieerzeugung den vom VUE festgelegten Grenzwert von 14 EI-99 Punkten pro erzeugter MWh Strom einhalten. Mit Hilfe eines Kennwertmodells kann die Zielgruppe den Erfüllungsgrad dieser Forderung für eine naturemade star Zertifizierung rasch bestimmen. Ökonomische Aspekte werden in der Ökobilanz nicht berücksichtigt.

Diese Ökobilanz wurde im Auftrag der Gruppe Energie in ARA und des Bundesamtes für Energie BFE erstellt.

2.2 Untersuchungsrahmen

Untersucht wird eine Abwasserreinigungsanlage, bei der die Möglichkeiten der Energienutzung ausgeschöpft werden. Das zu bilanzierende System wird, gemäss Beschluss VUE¹⁾, in einer sogenannten Differenzbetrachtung zu einer (hypothetischen) Referenz-Abwasserreinigungsanlage Baujahr 1995 (Definition nach eam/Ryser) bilanziert. Vorschläge für die Festlegung der Systemgrenzen wurden von R. Frischknecht und N. Jungbluth erarbeitet ³⁾. Da der Unterschied von ARA mit aerobem zu ARA mit anaerobem Verfahren nur in der Behandlung des Rohschlammes liegt und nur der zusätzliche Aufwand für die Stromerzeugung zu betrachten ist, ist es zulässig, die Untersuchung auf diesen Anlagenteil zu konzentrieren.

2.2.1 Abgrenzung technologisch

Bei der Reinigung des Abwassers in Kläranlagen entsteht durch biochemische Prozesse Rohschlamm. Zur weiteren Nutzung muss dieser Schlamm in einen stabilen Zustand gebracht werden, in dem keine weiteren Um- und Abbaureaktionen mehr stattfinden und die geruchsbildenden Inhaltsstoffe verringert werden. Diese Umwandlung kann mit zwei Verfahren, der aeroben und der anaeroben Stabilisierung realisiert werden.

A: Variante aerobe Stabilisierung ohne Klärgasproduktion (Bild 1)

Der aus der mechanischen und biologischen Reinigung stammende Rohschlamm wird aerob, d.h. unter Zuführung von Sauerstoff, stabilisiert. Der daraus entstehende, geruchsfreie Klärschlamm wird der weiteren Schlammbehandlung zugeführt. Bei diesem Verfahren kann keine nutzbare elektrische Energie aus dem Prozess erzeugt werden, die Energiebilanz ist negativ. Deshalb werden aerobe Verfahren bei mittleren und grösseren ARA selten eingesetzt.

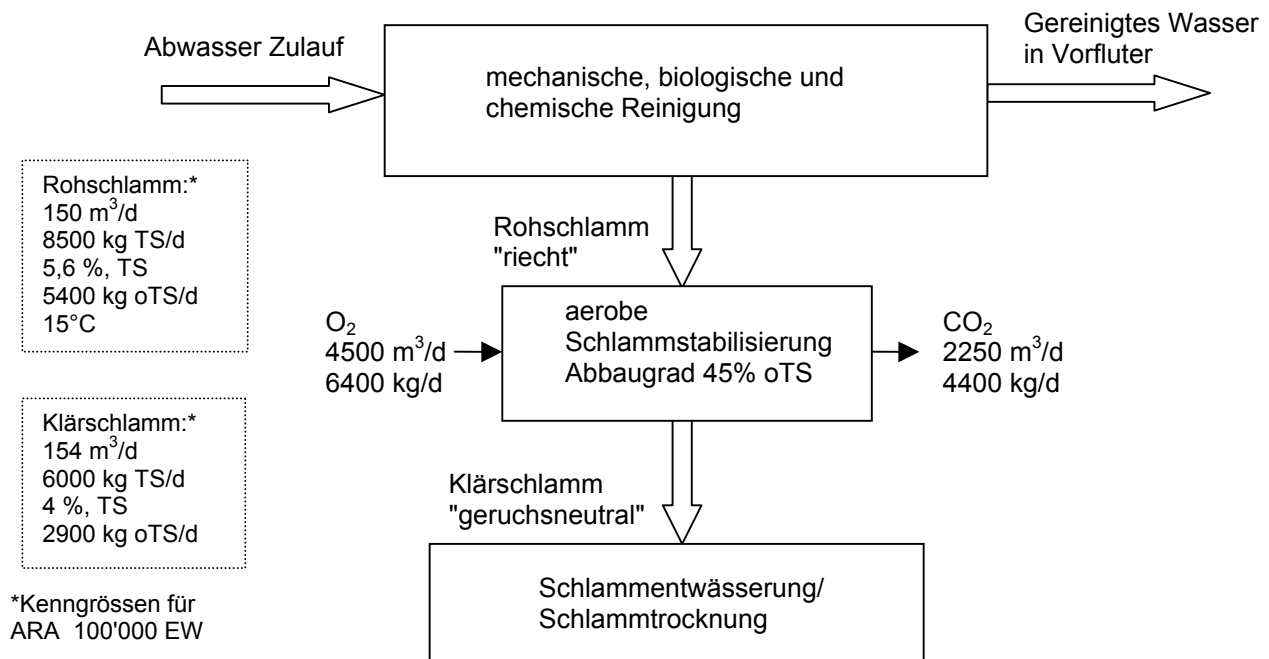


Bild 1: Variante ohne Klärgasproduktion

B: Variante anaerobe Stabilisierung mit Klärgasproduktion (Bild 2)

Der aus der mechanischen und biologischen Reinigung stammende Rohschlamm wird für die anaerob-mesophile Klärgaserzeugung genutzt.

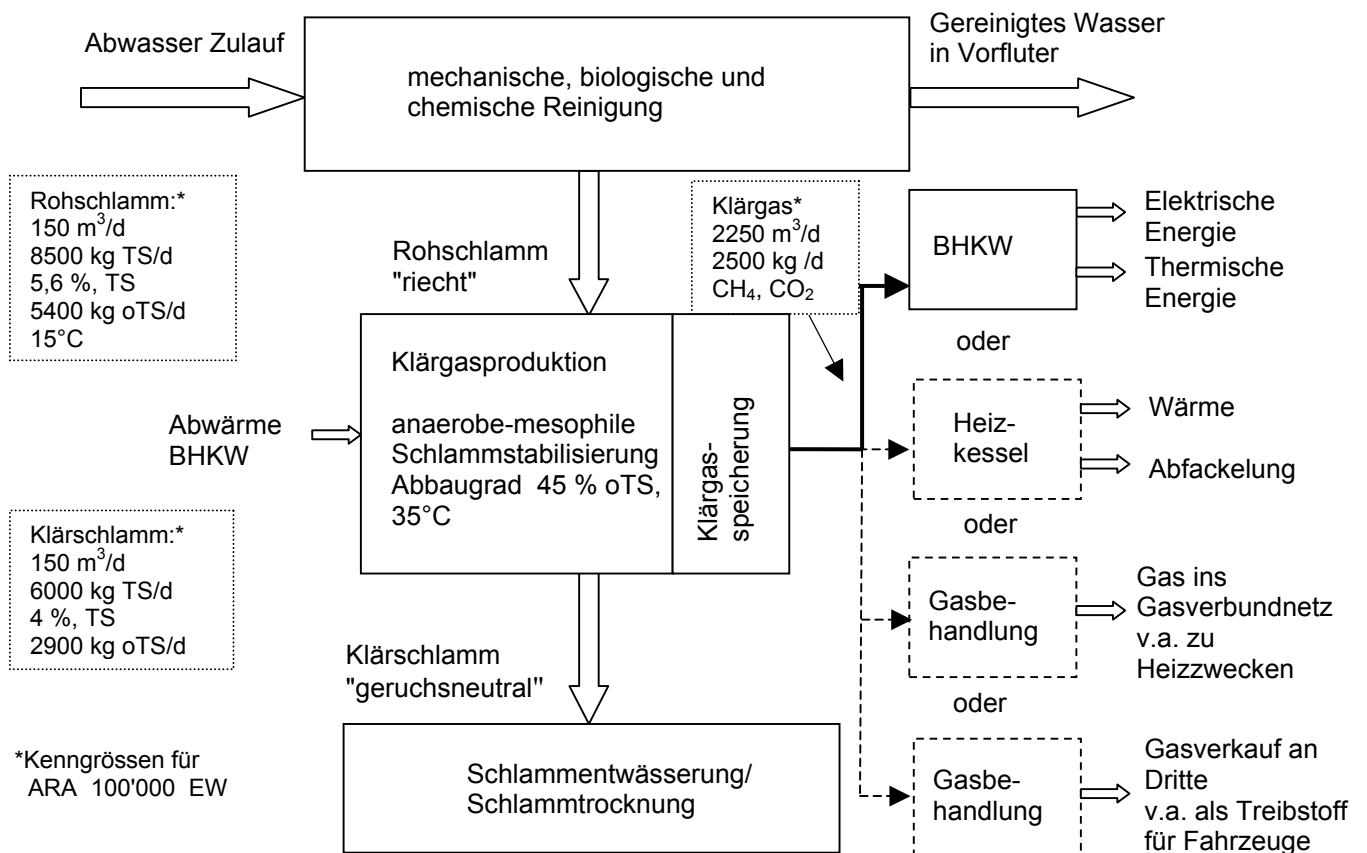


Bild 2: Variante mit Klärgasproduktion

Bei der anaeroben-mesophilen Stabilisierung (Faulung) erfolgt der Umwandlungsprozess bei Temperaturen von 33-38°C unter Ausschluss von Sauerstoff im Faulturm. Dabei entsteht Klärgas, das zu rund 2/3 aus Methan und zu 1/3 aus Kohlendioxid besteht. Der Heizwert dieses Gases ist mit 6,4 kWh/Nm³ nur 1/3 tiefer als jener von Erdgas. Das Klärgas eignet sich sehr gut für die Wärmekraftkoppelung. Die durch das Blockheizkraftwerk BHKW erzeugte Wärme reicht für die Aufrechterhaltung des Faulprozesses und versorgt die anderen thermischen Verbraucher einer ARA. Bei der aeroben Stabilisierung entsteht kein Klärgas.

Neben der Verstromung des Klärgases in einem BHKW, kann das Gas auch nur zu Heizzwecken in der ARA genutzt werden, wobei ein grösserer Teil abgefackelt werden muss, in ein Gasnetz eingespiesen oder an Dritte, vor allem als Treibstoff für Fahrzeuge verkauft werden.

Der bei der Faulung entstehende, geruchsfreie Klärschlamm wird der weiteren Schlammbehandlung zugeführt.

Die mechanische und biologische Reinigung des Abwassers sowie die Vor-/Nacheindickung und Entsorgung des Klärschlammes, ist für beide Varianten identisch. Bei der aeroben Stabilisierung ist der Wassergehalt des Klärschlammes knapp 3% höher.

Rund 40 % des Klärschlammanfalls in der Schweiz werden heute als Dünger eingesetzt. Bis 2003 soll der Austrag auf Futter- und Gemüseflächen verboten werden, bis 2005 auch auf Äcker. Wir gehen davon aus, dass der gesamte, anfallende Klärschlamm ab diesen Zeitpunkten entwässert und dann der Entsorgung zugeführt wird.

2.2.2 Abgrenzung nach ARA Grössen

Tabelle 1: Struktur der ARA in der Schweiz. Basis ⁴⁾.

ARA Klasse	Einwohnerwerte	Gesamte Einwohnerwerte	Anzahl ARA	Anzahl ARA mit BHKW	Gesamte installierte BHKW Leistung [kW]
1	> 100'000	7'839'960	32	20	8'627
2	> 50'000 ≤ 100'000	3'301'934	47	31	5'400
3	> 10'000 ≤ 50'000	4'991'175	206	126	6'655
4	> 2000 ≤ 10'00	1'324'754	251	65	1'462
5	> 200* ≤ 2000	297'150	337	1	13
	Klasse unbekannt		15		
	Total	17'754'973	888	243	22'157

Von den Total 888 ARA's haben 624 eine Faulung mit anaerober Stabilisierung. Da diese v.a bei den grossen Kläranlagen vorherrscht, nehmen sie gewichtet, z.B. mit Einwohnerwerten, den überwiegenden Anteil des Anlagenbestandes ein. Von den 624 ARA's wiederum haben 236 ein BHKW³⁾. Vom gesamten BHKW Bestand der Schweiz entfällt der grösste Teil der installierten elektrischen Leistung auf Kläranlagen, gefolgt von Bürogebäuden und Wohngebäuden.⁶⁾

* Erfassungsgrenze

Die ARA Klassen 1, 2 und 3 decken ca. 90% der Einwohnerwerte EW ab und erzeugen über 90 % der elektrischen Energie.

Tabelle 2: Evaluierte ARA Typen und Standard-BHKW

	Einheit	ARA Klasse 1	ARA Klasse 2	ARA Klasse 3
Einwohnerwerte typisch		100'000	50'000	10'000
Rohschlamm eingedickt 5,6% TS	m ³ /a	55'000	28'000	5'500
Klärgasmenge	Nm ³ /a	912'500	456'250	91'250
Theoretische elektrische Leistung BHKW bei 6667 Vollaststunden / a	kW	280	140	28
Praktische Auslegung BHKW Elektrische Leistung	kW	2 x 120	2 x 70	1 x 25
Praktische Auslegung BHKW Thermische Leistung	kW	2 x 213	2 x 123	1 x 50
Wirkungsgrad elektrisch	%	32	32	28
Wirkungsgrad thermisch	%	57	57	56
Elektrische Leistung	kW	2x120	2x70	1x25
Elektr. Energieproduktion	MWh	1600	933	166
Thermische Energieproduktion	MWh	2840	1640	333
Grundstückfläche (Gebäude)	m ²	107	99	43

Berechnung der Klärgasmenge und der elektrischen Leistung nach ⁵⁾

P_{el}: Elektrische Wirkleistung, Q_{th}: Thermische Leistung

Standard BHKW nach Werkangaben Firmen Dimag und Avesco

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass sich die spezifischen Werte dieser drei ARA Klassen nicht wesentlich unterscheiden.

2.2.3 Abgrenzung nach modernen und älteren ARA

Der VUE fordert, dass nur ARA mit *naturemade star* zertifiziert werden, die im Vergleich zu älteren Anlagen einen ökologischen Mehrwert ausweisen können.

Der wesentliche Unterschied von ARA mit aerobem zu ARA mit anaerobem Verfahren liegt nur in der Behandlung des Rohschlammes. Bei der aeroben Stabilisierung sind es die Systemelemente Stabilisierungsbecken mit Belüftungsgebläsen, bei der anaeroben Stabilisierung die Faultürme, Gasometer und BHKW. Deshalb werden die ökologischen Auswirkungen dieser Anlagenteile bei modernen und älteren Anlagen untersucht und die Differenz bewertet.

2.3 Festlegung

Das zu bilanzierende System umfasst also die Stromerzeugung mit Klärgas für moderne und ältere Anlagen. 6 Varianten die sich vor allem in der Stromproduktion und im Stromverbrauch unterscheiden werden bewertet. Für die jeweiligen Varianten wird der Aufwand für die Verstromung durch eine Differenzbetrachtung ermittelt. Dabei wird die Prozessstufe anaerobe Stabilisierung mit Faulturm, Gasometer und BHKW mit der Prozessstufe aerobe Stabilisierung mit Stabilisierungsbecken und Gebläse verglichen. Die Bewertung erfolgt mit der Eco-Indicator 99 Methode aus der Sicht des Hierarchisten (Kapitel 5). Da sich die spezifischen Werte der ARA-Klassen nicht wesentlich unterscheiden, wird mit Werten bezogen auf 1000 Einwohnerwerte pro Jahr gerechnet.

Zusätzlich werden die Varianten Klärgaseinspeisung ins Gasnetz und Verkauf an Dritte vor allem als Treibstoff für Fahrzeuge untersucht.

3. Beschreibung der Systeme

3.1 Variante A: aerobe Stabilisierung (ohne Klärgasproduktion)

Aerobe Verfahren sind einfach im Betrieb haben aber eine negative Energiebilanz. Sie laufen unter Einsatz grosser Mengen von Sauerstoff ab. Die Belüftung des Stabilisierungsbeckens erfolgt durch Druckbelüfter oder Umwälzbelüfter.

Als Vergleich betrachten wir die aerobe Stabilisierung in getrennten Anlagen, d.h. nicht in der mechanisch-biologischen Reinigungsstufe, bis zur vollständigen praktischen Stabilisierung, da dieses Verfahren nicht nur in kleinen, sondern auch in mittelgrossen Anlagen realisiert wird.

Für die Berechnung werden die Werte gemäss Tabelle 3 verwendet.

Tabelle 3: Kennwerte Stabilisierungsbecken aerobe Stabilisierung.

Aerobe Stabilisierung	Einheit	100'000 EW	50'000 EW	10'000 EW
Grundstückfläche	m ²	440	230	50
2 Stabilisierungsbecken aus Beton Nutzvolumen	m ³	2700	1400	300

3.2 Variante B: anaerobe Stabilisierung (mit Klärgasproduktion)

Die nachfolgenden, für das Verständnis dieser Studie notwendigen Beschreibungen sind im Wesentlichen ein Auszug aus dem Handbuch Energie in Kläranlagen ⁴⁾.

3.2.1 Klärgaserzeugung

Bei der anaeroben-mesophilen Schlammbehandlung fällt als Produkt des biologischen Abbaus der hochwertige erneuerbare Energieträger Klärgas an, der aus energetischen und nicht zuletzt auch aus finanziellen Gründen für die Elektrizitätserzeugung genutzt wird. Das Klärgas wird in Faultürmen erzeugt und in Gasspeichern zwischengespeichert. Die Zusammensetzung des Klärgases geht aus Tabelle 4 hervor.

Tabelle 4: Zusammensetzung Klärgas aus anaerober Stabilisierung

	Werte für die Berechnung	Richtwerte	Richtwerte	Zum Vergleich. Erdgas H
Methan CH ₄	62,5 Vol %	60 – 70 Vol %	59.8 Vol %	89,2 - 95 Vol %
Kohlendioxid CO ₂	33,6 Vol %	30 - 40 Vol %	40 Vol %	0,6 - 1,3 Vol %
Stickstoff N ₂	3,4 Vol %	< 4 Vol %	-	1,6 - 4,6 Vol %
Sauerstoff O ₂	-	< 1 Vol %	-	-
Schwefelwasserstoff H ₂ S	-	in Spuren	0.2 Vol %	0,05 Vol %
Chlor	-	in Spuren	-	-
Fluor	-	in Spuren	-	-
Dichte	1.164 kg/Nm ³	-	-	0.828 kg/Nm ³
Heizwert Hu	Hu = 6,4 kWh/Nm ³ (23 MJ/N m ³)	Hu = 6,4 kWh/Nm ³ (23 MJ/N m ³)	Hu = 6,46 kWh/N m ³ (23.24 MJ/N m ³)	Hu = 10,09 kWh/N m ³ (36.3 MJ/N m ³)
Quelle:	Merkblatt TISG 0137d ¹⁰⁾	Handbuch Energie in Kläranlagen ⁵⁾	Uni Osnabrück Studie Umberto ¹²⁾	Merkblatt TISG 0137d ¹⁰⁾

Entscheidende Faktoren für den Klärgasanfall sind die dem Faulbehälter mit dem Rohschlamm zugeführte Fracht an organischer Trockensubstanz, eventuelle Mitausfäulung von Fremdsubstraten wie z. B. Fettabscheiderinhalten oder Fäkalschlämmen, der prozentuale Anteil des organischen Trockenrückstandes, der zu Klärgas abgebaut wird (Abbaurate) und die Klärgasausbeute pro kg abgebautem organischen Trockenrückstand.

Abbaurate und Klärgasausbeute sind ausser vom Ausgangssubstrat vor allem abhängig von der Aufenthaltszeit im Faulbehälter und der Faulbehältertemperatur. Die Klärgasausbeute steigt mit der Aufenthaltszeit. Bei einer Halbierung der Faulzeit von 30 auf 15 Tage ist mit einer Verringerung des Klärgasanfalls um etwa 10 % zu rechnen.

Der aus einwohnerspezifischen oTS-Frachten und den Abbauraten errechnete Klärgasanfall je Einwohnerwert und Tag bei 35°C und 30 Tagen Faulzeit ist in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Klärgasanfall bei 30 d Faulzeit

	Einwohnerspezifischer Klärgasanfall (l/EW d)			
Aufenthaltszeit Vorklämung bei max. Trockenwetter-Tagesspitze	ohne Vorklämung	ca. 0,5 h	ca. 1,0 h	ca. 2,0 h
nur Kohlenstoff-Elimination		23-26	25-29	27-31
Nitrifikation+Denitrifikation; Schlammalter im Belebungsbecken ca. 13 Tage	13-15	19-22	22-25	25-29
Nitrifikation+Denitrifikation; Schlammalter im Belebungsbecken ca. 25 Tage	10-13	18-21	20-23	23-26

Bei Anlagen mit Stickstoffelimination ist mit Werten zwischen 18 und 25 l/EW d zu rechnen. Anlagen mit Teilnitrifikation werden zwischen diesen Werten liegen. Die aufgeführten Werte gelten für Anlagen ab etwa 100'000 EW mit einer Faulzeit von ca. 30 Tagen. Bei kleineren Anlagen bzw. niedrigeren Faulzeiten ist ein geringfügig niedrigerer, bei toxischen Einflüssen ein deutlich niedrigerer Klärgasanfall zu erwarten. Der Verzicht auf eine Vorklämung kann durch den niedrigen Klärgasanfall eine Klärgasnutzung unwirtschaftlich machen. Für die Modellberechnungen wird mit einem spezifischen Klärgasanfall von **25 l /EW d** gerechnet.

3.2.2 Klärgasspeicherung

In den Kläranlagen mit Klärgasproduktion stehen üblicherweise Gasspeicher zur Verfügung. Die Schwankungen in der Klärgasproduktion sind vor allem vom Beschickungsregime des Faulraumes mit Frischschlamm abhängig. Wird dem Faulraum, was häufig der Fall ist, die gesamte Frischschlammmenge in einer einzigen täglichen Charge zugegeben, so steigt die Gasproduktion rasch und massiv an. Der Spitzenwert erreicht nach wenigen Stunden der Beschickung einen Wert, der bis 150 % der mittleren Produktion sein kann. Für den Ausgleich dieser Tagesspitze wird ein Speichervolumen von 15 - 20 % der Tagesproduktion benötigt.

Wird der Faulraum über 24 Stunden kontinuierlich oder quasi-kontinuierlich (Vielzahl von Chargen) beschickt, so fällt das Klärgas auch dementsprechend gleichmässig an. Schwankungen kommen zwar immer noch vor, hingegen wird in den meisten Fällen ein Speichervolumen von etwa 10% der Tagesproduktion ausreichend sein.

Speichervolumen sind hingegen auch nützlich, wenn bei der Gasverwertung Schwankungen auftreten. Solche Schwankungen treten durch veränderlichen Wärmebedarf (Schlammmenge, Raumwärme) sowie durch bevorzugten WKK-Betrieb während der Hochtarifzeit auf. Die erforderlichen Speichervolumina bewegen sich mit WKK-Betrieb im Bereich der zweifachen Tagesproduktion.

Aus diesen Überlegungen geht hervor, dass die vorgängig aufgeführten Speichervolumina für den täglichen Ausgleich der Gasproduktion sowie der Gasverwertung genügend gross sind. Hingegen sind sie für den Ausgleich in einem grösseren Zeitrahmen nicht geeignet. Bestenfalls ist ein Wochenausgleich (Werktag/Sonntag) möglich. Saisonale Schwankungen in der Gasproduktion können z. B. durch grosse industrielle Betriebe (Gemüse-, Fruchteverarbeitung) auftreten. Diese Schwankungen müssen, sofern von Bedeutung, durch höhere Leistungen der Klärgasverwertungsanlagen und der Speicher aufgefangen werden.

Für die Berechnungen werden die in Tabelle 6 festgelegten Volumina verwendet.

Tabelle 6: Typische Kennwerte Klärgasbehälter und Gasspeicher

Anaerobe Stabilisierung	Einheit	100'000 EW	50'000 EW	10'000 EW
Grundstückfläche	m ²	1140	600	130
Volumen Faulbehälter (2 Behälter)	m ³	2700	1400	300
Volumen Gasspeicher (1 Speicher)	m ³	4000	2100	450

3.2.3 Klärgasnutzungskonzept

Vorrangiges Ziel bei einem modernen Klärgasnutzungskonzept ist die vollständige Verwertung des Klärgases im Wärme-Kraft-Kopplungsprozess (WKK), da gleichzeitig hochwertiger Strom und Wärme für die Faulturn- und Gebäudeheizung produziert und tatsächlich genutzt werden kann.

Konzept I - WKK mit Heizkessel zur Spitzenlastdeckung (Bild 3)

Die WKK-Einheit erzeugt Strom und parallel dazu auch Wärme. Damit kann nicht nur eine beachtliche Strommenge produziert werden, sondern in der Regel auch der gesamte Wärmebedarf der ARA abgedeckt werden. Belastungsspitzen oder Ausfälle der WKK Einheit werden durch den Heizkessel überbrückt. Belastungsspitzen treten in den kältesten Wintermonaten auf, während denen die tiefsten

Schlammtemperaturen vorkommen. Eine spezielle Aufbereitung des Klärgases ist für den BHKW Betrieb nicht notwendig.

Kläranlagen sind für den Einsatz von Blockheizkraftwerken sehr geeignet, kann doch das gesamte Klärgas sinnvoll genutzt werden. Einerseits kann der grösste Teil der anfallenden Wärme verwertet, andererseits kann zusätzlich hochwertiger Strom produziert werden.

Die Leistung des Heizkessels muss den gesamten Wärmebedarf der Kläranlage bei einem Ausfall einer BHKW-Einheit abdecken können. Diese Forderung ist besonders dort wichtig, wo für ein garantiertes Prozessergebnis (z. B. Hygienisierung) Wärme erforderlich ist.

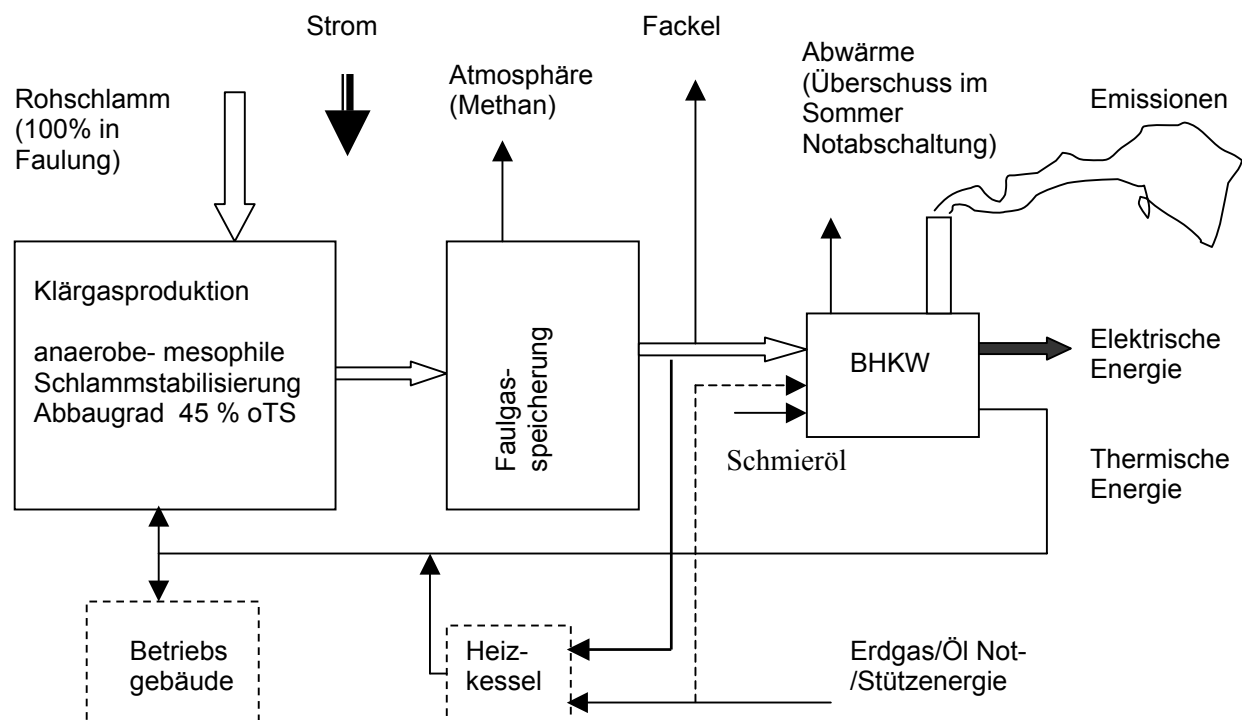


Bild 3: Prinzip der Klärgasverstromung mit BHKW

Konzept II - Heizkessel als alleiniger Klärgasverwerter

Bei dieser Variante wird das Klärgas energetisch nicht optimal ausgenutzt; in der Regel müssen auch grössere Mengen Klärgas abgefackelt werden, da nicht alles Klärgas fortwährend über das Jahr genutzt werden kann.

Konzept III - Vernichtung mit Gasfackel

Auf allen Kläranlagen mit Gasproduktion ist das Klärgas aus Kostengründen, aber auch aus Gründen des Umweltschutzes (Methan) vollständig zu nutzen. Auf eine Fackel darf jedoch nicht verzichtet werden, da im Notfall, z. B. bei einem Ausfall des BHKW, das Klärgas vernichtet werden muss. Gasometer besitzen für solche Fälle eine zu begrenzte Speicherkapazität, eine grössere Dimensionierung lohnt sich aus Kosten-/ Nutzengründen kaum.

Konzept IV Einspeisung ins Erdgasnetz (Bild 4)

Die Zusammensetzung von Klärgas unterscheidet sich von der des Erdgases (Tabelle 4). Damit Klärgas ins öffentliche Erdgasnetz eingespeisen werden kann, sind die vom Technischen Inspektorat des Schweizerischen Gasfaches TISG vorgegeben Bedingungen einzuhalten. In der dafür notwendigen Gasaufbereitung wird das Klärgas gefiltert, getrocknet, odorisiert und der Methangehalt durch CO₂ Entfernung erhöht. Zudem muss der Druck des Gases von 20 mbar auf die Erdgasnetzdrücke von 100 mbar, 1 bar oder 5 bar erhöht werden.

Mit teilweiser Aufbereitung, z.B. nur Trocknung, darf Klärgas bis zu 5 % dem im einzuspeisenden Erdgasnetz vorhandenen Volumenstrom beigemischt werden.

Konzept V Verkauf an Dritte (Bild 4)

Bei dieser Variante handelt es sich in erster Linie um die Verwendung zu Heizzwecken, neuerdings auch als Treibstoff für Fahrzeuge. Im letzteren Fall muss das Klärgas, wie im Konzept IV auf Ergasqualität gebracht werden. Für die Tanksäule muss das Gas auf einen Druck von auf 250 bar komprimiert und bei diesem Druck in einem Speicher zwischengelagert werden.

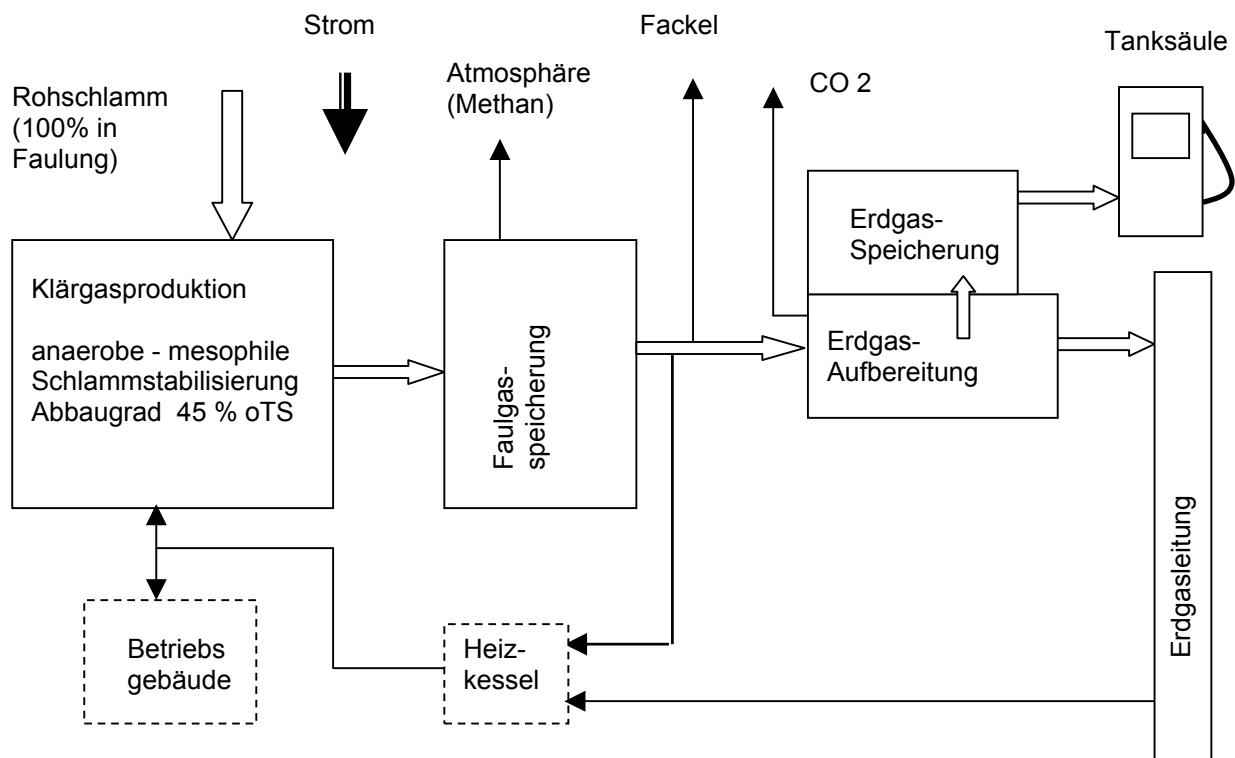


Bild 4: Prinzip Einspeisung in Erdgasnetz und/oder Abgabe an Tankstelle

Vergleich Konzept I (WKK) und Konzept II (alleiniger Heizkessel)

Beim Konzept II mit alleinigem Heizkessel kann der genutzte Wärmeanteil gegenüber dem Konzept I mit BHKW kaum noch deutlich erhöht werden. Hingegen kann mit dem BHKW zusätzlich Strom produziert werden. Mit dieser Stromerzeugung kann konventionell erzeugter Strom substituiert und die CO₂ Belastung verringert werden. Strom ist eine hochwertige Energie, was sich auch in den höheren Marktpreisen gegenüber anderen Energieträgern widerspiegelt.

Fazit Klärgasnutzung:

- Klärgas ist vollständig im BHKW zu nutzen.
- Kläranlagen mit alleinigem Heizkessel: Einsatz BHKW prüfen
- Abfackelung vermeiden

4. Sachbilanz

Wie bereits erwähnt wird der Aufwand für die Stromerzeugung durch den Vergleich der aeroben Stabilisierung mit der anaeroben Klärgaserzeugung untersucht.

Die sogenannte funktionale Einheit, d.h. die Bezugsgrösse auf die sich alle Material- und Energieflüsse beziehen, wird wie folgt definiert:

Behandlung des Rohschlammanfalles mit einer TS von 4-6 % zu Klärschlamm von 3-5% TS für jeweils 1000 EW. Als Betrachtungszeitraum wird ein Jahr festgelegt, d.h. neben der Energie und den Emissionen werden auch die Infrastrukturaufwendungen auf ein Jahr umgerechnet.

Für die Beurteilung der Umweltbelastung gemäss dem VUE Globalkriterium, wird die Belastung pro MWh erzeugter elektrischer Energie ausgewiesen. Der einzuhaltende Grenzwert liegt bei 14 EI-99 Punkten pro erzeugter MWh Strom.

Für Bauten wird, analog zu den ökonomischen Gepflogenheiten eine Lebensdauer von 25 Jahren, für stationäre Maschinen inkl. BHKW eine von 10 Jahren angenommen.

Beim Landverbrauch wird die Bauzeit von 1 Jahr, der Rückbau von 1 Jahr und die Rekultivierung von 5 Jahren berücksichtigt. Diese zusätzlichen 7 Jahre erhöhen den Landverbrauch pro Jahr um 28%. Für den Transport von Baumaterialien wird eine durchschnittliche Transportdistanz von 100 km und 28 to Lastwagen angenommen.

4.1 Variante A: aerobe Stabilisierung

Das Stabilisierungsbecken besteht aus einem nicht isolierten Betonbehälter. Wendelbelüfter sorgen für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr, Schaumschneider bauen die Schaumschicht ab. Da der Klärschlamm aber ab 2003 nicht mehr als Dünger verwendet werden darf, muss er auch nicht mehr hygienisiert werden, deshalb wird die energieverbrauchende Hygienisierung ausgeschlossen.

Ein Biofilter für die Reaktorabluft ist nicht üblich und wurde deshalb nicht berechnet.

Tabelle 7: Eingabedaten Stabilisierungsbecken aerobe Stabilisierung. Alle Werte bezogen auf die Behandlung vom Primärschlamm für 1000 EW pro Jahr.

Aerobe Stabilisierung	Einheit	Eingabewert
Stabilisierungsbecken Herstellung / Entsorgung		
Landverbrauch	m ²	0.225
Fundamente, Beton	kg	50.5
Stabilisierungsbecken, Beton	kg	89.6
Gebäudegebäude, Beton	kg	23.8
Tragkonstruktionen, Stahl	kg	0.056
Tragkonstruktionen, Stahl verzinkt	kg	0.14
Pumpen, Stahlguss	kg	0.168
Gebäude, Stahl	kg	0.28
Rohrleitungen, Stahl	kg	0.14
Rohrleitungen, Stahl verzinkt	kg	0.14
Transportverpackung Holz	kg	5.6
Transport	tkm	19.2
Stabilisierungsbecken Betrieb		
Stromverbrauch	kWh	8940
Wärmeverbrauch	kWh	0
Schmiermittelverbrauch	kg	2.6
CO ₂ Emissionen	kg	16000

Für die Entsorgung der Baustoffe wurden für alle Varianten die Werte gemäss Tabelle 8 verwendet.

Tabelle 8: Eingabedaten für die Entsorgung der Baustoffe.

Entsorgung	Einheit	Recycling	KVA	Inertstoff-deponie
Beton	%	-	-	100
Holz	%	-	100	-
Kunststoff	%	50	50	-
Eisen, Stahl, Nichteisenmetalle	%	90	10	-

4.2 Variante B: anaerobe Stabilisierung

4.2.1 Klärgaserzeugung

Die Faulbehälter bestehen aus einem geschlossenen, isoliertem Betonbehälter. Durch Rohrleitungen gelangt das Klärgas in den Klärgasspeicher (Gasometer). Das dort, mit einem Druck von ca. 20mbar gespeicherte Klärgas, wird der weiteren Nutzung zugeführt.

Der Betrieb des Faulbehälters erfordert Rührwerke. Pumpen und Rohrleitungen können wegen der Differenzbetrachtung weggelassen werden.

Die Beheizung des Faulbehälters erfolgt mit der Abwärme der BHKW.

Tabelle 9: Eingabedaten für den Faulbehälter und den Gasspeicher für die anaerobe Stabilisierung. Alle Werte bezogen auf die Behandlung vom Primärschlamm für 1000 EW pro Jahr.

Anaerobe Stabilisierung	Einheit	Eingabewert
Faulbehälter + Gasometer Herstellung / Entsorgung		
Landverbrauch	m ²	0.582
Fundamente, Beton	kg	164
Faulbehälter, Beton	kg	431
Gasspeicherunterteil, Beton	kg	79
Gasspeicheroberteil, Stahl	kg	15
Tragkonstruktion, Stahl	kg	0.112
Tragkonstruktion, Stahl verzinkt	kg	0.196
Pumpen, Stahlguss	kg	0.336
Rohrleitungen, Stahl	kg	1.12
Rohrleitungen, Stahl verzinkt	kg	1.12
Nebengebäude, Beton	kg	75
Transportverpackungen	kg	22.4
Transport	tkm	81
Faulbehälter + Gasometer Betrieb		
Stromverbrauch	kWh	2300
Wärmeverbrauch	kWh	10200
Schmiermittelverbrauch	kg	2.6
Methanverluste	%	0.75 - 1

4.2.2 Klärgasnutzung mit BHKW

Tabelle 10: Eingabedaten Heizzentrale mit BHKW. Alle Werte bezogen auf die Behandlung vom Primärschlamm für 1000 EW pro Jahr.

Modul BHKW	Einheit	2 x120 kW	2 x 70 kW	1 x 25 kW
Heizzentrale Gebäude Bau / Rückbau				
Landverbrauch	m ³	0.055	0.051	0.002
Gebäudevolumen Beton	kg	46.8	43.2	23.2
BHKW Module* Herstellung / Entsorgung				
Motorblock, Generator, Stahl	kg	7.2	5.0	2.3
Generatorwicklung, Leiter, Kupfer	kg	0.64	0.448	0.208
Isolationen, Apparategehäuse, Kunststoff	kg	0.16	0.112	0.052
Schalldämpfer, Stahl rostfrei	kg	0.144	0.084	0.015
Kamin Stahl, rostfrei	kg	0.072	0.042	0.008
Notkühler, Stahl verzinkt	kg	0.1	0.1	0.04
Transportverpackung Holz	kg	0.5	0.4	0.1
Transport LKW 28to	tkm	12.9	11.7	6.3
BHKW Betrieb				
Schmierölverbrauch	kg	6.72	2.99	1.14

(Fortsetzung Tabelle 10)	Einheit	2 x120 kW	2 x 70 kW	1 x 25 kW
Emissionen:				
CO ₂	kg	16115	9306	1861
CO	kg	10.10	5.83	1.13
NO _x als NO ₂	kg	7.50	4.33	0.45
SO _x als SO ₂	kg	5.93	3.42	0.68
CH ₄	kg	0.49	0.28	0.06
NM VOC	kg	0.49	0.28	0.06

* Werte für jeweils 2 BHKW Module. BHKW mit Magermotor als montagefertige Module. Daten nach Firmenangaben Dimag und Avesco. Ein hydraulischer Speicher wird nicht gerechnet, da dieser i.d.R. auch bei konventionellen Gasheizung verwendet wird.

Tabelle 11: Spezifische Emissionswerte bezogen auf Gasinput BHKW.

	Einheit	Emissionsfaktoren für die Berechnungen		Kläranlage Osnabrück (zum Vergleich)	Erdgas (zum Vergleich)
		Mager-Motor 60kW	Kat. Motor 160kW		
Methan CH ₄	kg/TJ	2.48		0	2.5
Kohlendioxid CO ₂	kg/TJ	81308		91700	56000
Stickoxide NO _x als NO ₂	kg/TJ	37.85	19.63	74	19.4
CO	kg/TJ	50.93	49.53		49.5
Schwefeloxide SO _x als SO ₂	kg/TJ	29.91		184	0.55
NM VOC	kg/TJ	2.48			2.5
Quelle:		Abgeleitet aus Ökobilanz Stromgewinnung aus landw. Biogas ⁸⁾		Uni Osnabrück Studie Umberto ¹²⁾	Ökoinventar von Energiesystemen ⁸⁾

4.2.3 Stoffbilanz

Für die Stoffbilanz wurden die theoretischen Werte aus der Klärgasmenge von 9'125 Nm³/1000 EW a mit der Zusammensetzung gemäss Tabelle 4 bestimmt und mit den Emissionswerten des BHKW's Typ 2x120 kW elektrisch verglichen.

Tabelle 12: Kohlenstoffbilanz für Variante 1 gemäss Tabelle 13. Alle Werte bezogen auf die Behandlung vom Primärschlamm für 1000 EW pro Jahr.

C-Gehalt im Klärgas			
CH ₄ im Klärgas =	4095 kg	=	256 kmol C
CO ₂ im Klärgas =	6054 kg	=	138 kmol C
Total			394 kmol C
C-Emissionen BHKW (gemäss Tabelle 10)			
CO ₂	16115 kg	=	366 kmol C
CO	9 kg	=	0.32 kmol C
CH ₄	0.49 kg	=	0.03 kmol C
Total			367 kmol C
C-Emissionen Klärgaskessel			
	0 der Klärgasmenge		
CO ₂ aus Verbrennung Klärgas	- kg	=	- kmol C
CO ₂ direkt aus Klärgas	- kg	=	- kmol C
Total			- kmol C
C-Emissionen Fackel			
	5% der Klärgasmenge		
CO ₂ aus Verbrennung Klärgas	563 kg	=	13 kmol C
CO ₂ direkt aus Klärgas	303 kg	=	7 kmol C
Total			20 kmol C
C-Emissionen durch Leakage			
	0.75% der Klärgasmenge		
CH ₄ direkt aus Klärgas	31 kg	=	2 kmol C
CO ₂ direkt aus Klärgas	45 kg	=	1 kmol C
Total			3 kmol C
Totale C - Emissionen			389 kmol C
Differenzbetrag			
	-4 kmol C	=	-190 kg CO₂
		oder	-69 kg CH₄
diese Differenz entspricht rund			1% der gesamten Kohlenstoffmenge

Der im Klärgas enthaltene Kohlenstoff (als Methan und Kohlendioxid vorliegend) wird durch die verschiedenen Prozesse wie folgt in die Atmosphäre emittiert:

Der weitaus grösste Anteil (94 %) gelangen mit den Verbrennungsgasen (Abgas) des BHKW's als Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und einem Anteil unverbranntem Methan in die Luft. Die durch Abfackelung (5 %) und durch Leckverluste (< 1 %) freigesetzten Mengen sind unbedeutend. Im Heizkessel entstehen keine Emissionen, weil in der Variante 1 die Abwärme des BHKW für die Versorgung der ARA ausreicht und deshalb kein Klärgas zusätzlich verbrannt werden muss. Die Verbrennung auf der Fackel wird näherungsweise als vollständig betrachtet.

Zwischen dem C-Gehalt im Klärgas und dem durch die Verbrennung freigesetzten C ergibt sich eine Differenz von 1%. Diese Abweichung liegt im Toleranzbereich.

ARA setzen bei verschiedenen Prozessen, im Belebungsbecken, in der Faulung und bei der Verbrennung des Klärgases Kohlendioxid CO₂ frei; bei der aeroben wie auch bei der anaeroben Stabilisierung etwa gleichviel.

Da das CO₂ aber aus den Stoffwechselprodukten des Menschen stammt und ursprünglich der Atmosphäre entzogen wurde, und sich auf dem Weg über das Abwasser, den Klärschlamm und das Klärgas sich dann in den Abgasen der BHKW wieder findet, betrachten wir das Kohlendioxid als CO₂-Neutral; d.h. es wird kein CO₂ freigesetzt, das über Millionen von Jahren in fossilen Brennstoffen gebunden wurde. CO₂ wird deshalb als neutral betrachtet. Zudem wird beim Verbrennungsprozess von Klärgas das Methan zu CO₂ und Wasser zersetzt. CH₄ ist ebenfalls ein Treibhausgas, dass übrigens 30 mal stärker als CO₂ wirkt ¹⁴⁾.

4.2.4 Energiebilanz

Der Vergleich heutiger ARA zu ARA die in den Jahren 1990 bis 1995 gebaut wurden zeigt, dass vor allem beim Stromverbrauch und der Stromproduktion mit BHKW enorme Fortschritte gemacht wurden. Der Stromverbrauch konnte von 41 auf 34MWh/ 1000 EW a gesenkt werden. Das anfallende Klärgas von 58,4 MWh/ 1000 EW a wird heute mit grösseren BHKW mit besseren Wirkungsgraden viel besser genutzt. (Tabelle 13). Dadurch stieg der elektrische Eigenversorgungsgrad einer typischen alten Anlage von 11% (Variante 4) auf 52 % bei einer typischen modernen ARA (Variante 1).

Der Wärmeverbrauch ist vermutlich bei neuen Anlagen ebenfalls tiefer. Da diesbezüglich aber keine verlässlichen Daten vorliegen, wurde ein Gesamtwärmeverbrauch von 30 MWh/1000EW a für alle Varianten angenommen. Das erzeugte Klärgas reicht aber immer aus, um den Wärmebedarf zu decken, bei neueren Anlagen genügt im störungsfreien Betrieb die Abwärme des BHKW, d.h. es muss kein Klärgas in einem Klärgaskessel verbrannt werden. Zum Anfahren der Anlage und zum Überbrücken bei Störungen wurde eine Heizölmenge von jährlich 5000 Liter angenommen.

Tabelle 13: EI-99 Punkte für verschiedene BHKW Baugrössen. Alle Werte bezogen auf die Behandlung vom Primärschlamm für 1000 EW pro Jahr.

		Typische neue ARA		Hypo- thetische ARA 1995			
Stand der Technik	TOP	NEU		ALT			
Variante	0	1	2	3	4	5	
BHKW Baugrösse	2 x 150 kW	2 x 120 kW	2 x 120 kW	2 x 70 kW	1 x 70 kW kat	1 x 50 kW kat.	
BHKW inst. elektr. Leistung	kW	320	239	224	130	65	43
BHKW inst. therm. Leistung	kW	530	426	411	239	119	95
BHKW Wirkungsgrad elektr.	%	35	32	30	30	30	25
BHKW Wirkungsgrad therm.	%	58	57	55	55	55	55
Klärgasanfall brutto	MWh	58.4	58.4	58.4	58.4	58.4	58.4
Methanverlust (wie Klärgas)	%	0.5	0.75	0.75	1	1	1
Methanverlust (wie Klärgas)	MWh	0.29	0.44	0.44	0.58	0.58	0.58
Klärgas nach Methanverlust	MWh	58.11	57.96	57.96	57.82	57.82	57.82
Abfackelung	%	2	5	5	20	31	33
Abfackelung	MWh	1.16	2.90	2.90	11.64	18.02	19.08
Produktion Strom BHKW	MWh	19.93	17.62	16.52	9.54	4.34	2.89
Betriebsstunden	h/a	6237	7361	7361	7327	6661	6723
Klärgasverbrauch BHKW	MWh	56.95	55.06	55.06	31.80	14.45	11.56
Stromverbrauch tot.	MWh	34.00	34.00	34.00	41.00	41.00	41.00

(Fortsetzung Tabelle 13)			0	1	2	3	4	5
Produktion Wärme BHKW	MWh		33.03	31.39	30.29	17.49	7.95	6.36
Wärmeverbrauch	MWh		30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Wärmeerzeugung in Klärgaskessel	MWh		0.00	0.00	0.00	12.51	22.05	23.64
Klärgasverbrauch im Klärgaskessel	MWh		0.00	0.00	0.00	14.38	25.35	27.17
Wärmezukauf	HEL	MWh	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Stromzukauf	CH-Mix	MWh	14.07	16.38	17.48	31.46	36.66	38.11

4.2.4 Gaseinspeisung in Erdgasnetz oder direkter Verkauf an Dritte

Gaskonditionierung

Die verschiedenen Komponenten werden in einem separaten Raum untergebracht. Die Anlage besteht aus einem Kompressor (1-6 bar), Gasfiltern, dem Entfeuchter, der Methananreicherung und der Odorierungseinrichtung. Bei der Methananreicherung wird dem Klärgas ca. 30% CO₂ in die Atmosphäre abgezogen, um erdgasähnliche Methanwerte zu bekommen.

Tabelle 14: Eingabedaten Gaskonditionierung. Alle Werte bezogen auf die Behandlung vom Primärschlamm für 1000 EW pro Jahr.

Gaskonditionierung	Einheit	Eingabewert
Herstellung / Entsorgung		
Landverbrauch*	m ²	0.0256
Gebäude, Beton	m ³	0.0800
Kompressor 1->6 bar, Stahlguss	kg	0.2000
Behälter Rohrleitungen, Stahl	kg	0.4000
Armaturen, Stahl rostfrei	kg	0.2000
Gasfilter, Stahl	kg	0.8000
Transportverpackung	kg	0.8000
Transport	tkm	0.2480
Betrieb		
Stromverbrauch Kompressor	kWh	300
Emissionen CO ₂ (aus Methananreicherung)	Nm ³	neutral
Methan CH ₄ aus Methananreicherung)	Nm ³	170

* Grundstückfläche 50 m²

Hersteller solcher Anlagen konnten keine brauchbaren Angaben liefern. Obige Werte wurden deshalb in Anlehnung an die Kompogasanlage in Bachenbülach geschätzt.

Tankstelle

Die Tankstelle umfasst die Tanksäule, den Kompressor für die Druckerhöhung von 6 auf 250bar, die Gasflaschenbatterie für die Gasspeicherung, die Armaturen und den Vorplatz für die Autos.

Tabelle 15: Eingabedaten Tankstelle. Alle Werte bezogen auf die Behandlung vom Primärschlamm für 1000 EW pro Jahr.

Tankstelle	Einheit	Eingabewert
Herstellung / Entsorgung		
Landverbrauch*	m ²	0.1536
Auto-Vorplatz, Beton	kg	60.0000
Fundament, Beton	kg	4.8000
Kompressor, Stahlguss	kg	0.4000
Behälter/Rohrleitungen, Stahl	kg	0.4000
Armaturen/Behälter, Stahl rostfrei	kg	0.0800
Gasdruckbehälter, Stahl	kg	2.0000
Tanksäule, Stahl	kg	0.2000
Transportverpackung	kg	0.2000
Transport	tkm	6.8080
Betrieb		
Stromverbrauch Kompressor	kWh	788

* Grundstückfläche inkl. Vorplatz PKW 300 m²

Hersteller solcher Anlagen konnten keine brauchbaren Angaben liefern. Obige Werte wurden deshalb in Anlehnung an die Kompogasanlage in Bachenbülach geschätzt.

5. Wirkungsabschätzung und Bewertung

Bei der Wirkungsabschätzung geht es um das Erkennen und die Beurteilung der Grösse und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen der hier untersuchten Systeme. Die Bewertung erfolgt mit der vom VUE geforderten „Eco-Indicator 99“¹⁵⁾ Methode. Diese Methode bewertet die Einflüsse auf die Umwelt aus 3 verschiedenen Gesichtspunkten, dem Hierarchisten, dem Individualisten und dem Egalitarian. Beim VUE hat sich die Sicht des Hierarchisten durchgesetzt. Der Hierarchist wägt zwischen Heute und der Zukunft ab und handelt risikoneutral.

Die Eco-Indicator 99 Punkte (EI-99 Punkte), sind ein Mass für die Wirksamkeit der Einwirkungen auf die Umwelt. Je höher die Punktezahl, desto stärker sind die Einwirkungen.

Tabelle 16: EI-99 Punkte für moderne und ältere ARA. Alle Werte bezogen auf die Behandlung vom Primärschlamm für 1000 EW pro Jahr und 100% CO₂ Gutschrift.

Bilanz EI-99 Punkte			Typische neue ARA			Hypo- thetische ARA 1995	
Stand der Technik		TOP	NEU		ALT		
Variante	Einheit	0	1	2	3	4	5
BHKW Typ		2x 150 kW el Mager	2x 120 kW el Mager	2x 120 kW el Mager	2x 70 kW el Mager	1x 70 kW el kat	1x 50 kW el kat.
Abfackelung	%	2	5	5	20	31	33
BHKW Wirkungsgrad elektrisch	%	35	32	30	30	30	25
Methanverluste	%	0.5	0.75	0.75	1	1	1
Eigenversorgungsgrad elektrisch	%	59	52	49	23	11	7

(Fortsetzung Tabelle 16)		0	1	2	3	4	5
anaerobe Stabilisierung mit BHKW Wärme	EI-99 Punkte	33	33	33	33	33	33
BHKW	EI-99 Punkte	30	29	29	18	7	5
Wärme aus Klärgas Heizkessel	EI-99 Punkte	0	0	0	7	12	13
Fackelverluste	EI-99 Punkte	0.55	1.4	1.4	5.4	8.4	8.9
Methan Verluste	EI-99 Punkte	2.3	3.5	3.5	4.7	4.7	4.7
Korrekturwert Zukauf Strom CH-Mix	EI-99 Punkte	-40	0	11	151	203	217
Zukauf Wärme Öl	EI-99 Punkte	19	19	19	19	19	19
abzüglich aerobe Stabilisierung	EI-99 Punkte	-92	-92	-92	-92	-92	-92
abzüglich ½ Gaskessel*	EI-99 Punkte	-14	-14	-14	-14	-14	-14
Netto EI-99 Punkte	EI-99 Punkte	-62	-20	-10	130	180	194
Umweltbelastung pro MWh Stromerzeugung	EI-99 Punkte/MWh	-3.1	-1.2	-0.6	13.7	41.6	67.0
Delta zu Variante 1**	EI-99 Punkte/MWh	-1.9	0.0	0.6	14.8	42.7	68.1

*Der mit Biogas erzeugten und genutzten Wärme werden 50% der Umweltbelastungen von Wärme aus einer kondensierenden Erdgasbefeuerung zugewiesen. Die restliche Umweltbelastung des BHKW's entfällt auf den produzierten Strom ¹⁾.

**Grenzwert gemäss VUE: 14 EI-99 Punkte pro produzierter MWh BHKW Strom.

In Tabelle 16 sind die Belastungspunkte für 6 verschiedene Varianten zusammengestellt. Ausgegangen wurde von einem über alle Varianten gleichbleibenden Klärgasanfall von 9125 Nm³/1000 EW a entsprechend 58,4 MWh/1000 EW a. (Tabelle 13). Bei der Variante 0 werden die heutigen Möglichkeiten der Klärgasnutzung voll ausgeschöpft, Varianten 1-3 sind moderne, Varianten 4 bis 7 ältere Anlagen. Wesentliche Merkmale der neuen Anlagen sind die BHKW's mit einer hohen Leistung die praktisch den gesamten Klärgasanfall verarbeiten können, tiefen Fackelverlusten von 2% (alt 29%), tiefen Methanverlusten von 0,75% (alt 1%) und tieferem Stromverbrauch von 34 kWh/EW a (alt 41 kWh/EW a).

Bei kleiner BHKW Leistung und grösserem Stromverbrauch muss mehr Strom extern bezogen werden. Den Berechnungen wurde für den zugekauften Strom der Schweizerstrommix zugrundegelegt. Wie bereits erwähnt, wurde für die Belastung der Systeme das CO₂ als neutral betrachtet, d.h. bei den Emissionen nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen die Dominanz des Energieverbrauches bzw. der zugeführten Energie aus nicht erneuerbaren Quellen und der Emissionen. Die Belastungen durch den Bau der Infrastruktur sind sekundär.

Der Vergleich einer neueren ARA (Variante 1 in Tabelle 16, der zugekaufte Strom wurde als 0 gesetzt) zu hypothetischen ARA Baujahr 1995 (Variante 4 in Tabelle 16) ergibt eine Differenzen von 42,7 EI-99 Punkten.

Das Konzept des VUE sieht vor, dass stromerzeugende Technologien auf der Basis erneuerbarer Energie beim globalen Kriterium einen Grenzwert einzuhalten haben, um das Ökolabel naturemade star verwenden zu dürfen. Dieser Grenzwert liegt bei 14 EI-99 Punkte /MWh erzeugter Strom. Er entspricht 50% der Umweltbelastung eines modernen, gasbefeuerten Kombikraftwerkes¹¹⁾.

Die ökologischen Verbesserungen der letzten zehn Jahre sind also besser als die zulässige Belastung von 14 EI-99 Punkte pro erzeugter MWh Strom. Trotz des höheren Infrastrukturaufwandes und benötigter Wärme für die Aufrechterhaltung des Faulprozesses, schneiden ARA mit anaerober Stabilisierung ökologisch besser ab. Hauptgrund ist die Verstromung des Klärgases in möglichst grossen, auf die anfallende Klärgasmenge optimierten BHKW. Diese Stromproduktion deckt bei gut konzipierten Anlagen 50 - 60% des elektrischen Energieverbrauches. Die Abwärme des BHKW reicht zur Versorgung der gesamten ARA. Hinzu kommt wie bereits erwähnt, die Senkung des elektrischen Energieverbrauches von 41 MWh pro 1000 Einwohnerwerte pro Jahr auf 34 MWh/1000 EW a.

Neben der Betrachtung der ökologischen Entwicklung der ARA über die vergangenen Jahre, wurde als Alternative auch die Einspeisung ins Erdgasnetz untersucht. Dazu muss das Klärgas auf Erdgasqualität konditioniert werden. Unter Berücksichtigung der definierten Systemgrenze ergeben sich Werte gemäss Tabelle 17.

Tabelle 17: EI-99 Punkte für Alternative Klärgasnutzung im Vergleich zur Verstromung. Alle Werte bezogen auf die Behandlung vom Primärschlamm für 1000 EW pro Jahr und 100% CO₂ Gutschrift.

	Einheit	Anaerobe Stabilisierung mit BHKW 2x 120 kW	Anaerobe Stabilisierung mit Einspeisung ins Erdgasnetz	Anaerobe Stabilisierung mit Verkauf an Dritte (Tankstelle)
Anaerobe Stabilisierung	EI-99 Punkte	33	33	33
BHKW	EI-99 Punkte	29	-	-
Wärme aus Klärgas-Heizkessel	EI-99 Punkte	0	16	16
Fackelverluste	EI-99 Punkte	1.4	1.4	1.4
Methanverluste	EI-99 Punkte	3.5	3.5	3.5
Gaskonditionierung	EI-99 Punkte		17	17
Tankstelle	EI-99 Punkte			9
Zukauf Wärme Öl	EI-99 Punkte	19	19	19
Abzüglich aerobe Stabilisierung	EI-99 Punkte	- 92	- 92	- 92
Abzüglich ½ Gaskessel*	EI-99 Punkte	- 14	- 14	- 14
Netto	EI-99 Punkte	- 20	- 16	- 7

*Der mit Biogas erzeugten und genutzten Wärme werden 50% der Umweltbelastungen von Wärme aus einer kondensierenden Erdgasbefuerung zugewiesen. Die restliche Umweltbelastung des BHKW's entfällt auf den produzierten Strom ¹⁾.

Die Erzeugung von Strom mit BHKW ergibt die tiefste ökologische Belastung, da die Wärme als „Abfall“ bei der Stromerzeugung entsteht, und nicht in einem Heizkessel separat erzeugt werden muss. Zusätzlich wird bei der Gaskonditionierung Methan emittiert, das, wie bereits erwähnt, stark belastend wirkt.

Ein hoher ökologischer Nutzen ergibt sich, wenn mit dem ins Erdgasnetz eingespiesenen Klärgas fossile Brenn- und Treibstoffe substituiert werden ¹³⁾.

6. Schlussfolgerung

Aufgrund der vorliegenden Analyse der globalen Kriterien empfehlen wir, das Label „naturemade star“ für Strom aus Kläranlagen zu vergeben. Die Erfüllung der lokalen Kriterien dürften in einer ARA ebenfalls kein Problem darstellen.

Anhang A: Klärgasnutzung mit Wärme-Kraft-Kopplung

Prinzip der Verstromung

In einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage, in d. R. ein BHKW-Modul (Blockheizkraftwerk) treibt das Klärgas einen Motor an, welcher einen Teil der eingesetzten Energie in mechanische Energie (Kraft) umsetzt. Diese Energie treibt einen Generator zur Stromerzeugung oder direkt ein Aggregat, zum Beispiel einen Verdichter, an. Der grössere Anteil der Energie wird in Wärme umgewandelt und durch die Rückkühlung der Abgase und die Motorenkühlung genutzt. Der Energiefluss wird in Bild 5 dargestellt. Moderne BHKW's erreichen heute einen elektrischen Wirkungsgrad von gegen 35%.

Die Streuung der Wirkungsgrade entsteht durch die Anwendung von verschiedenen Technologien und Fabrikaten. Bei der Planung einer WKK muss berücksichtigt werden, dass Kraft eine wesentlich höherwertige Form von Energie ist als Wärme. Entsprechend ist aus wirtschaftlichen Überlegungen das Schwergewicht bei guten Wirkungsgraden bei der Elektrizität zu setzen.

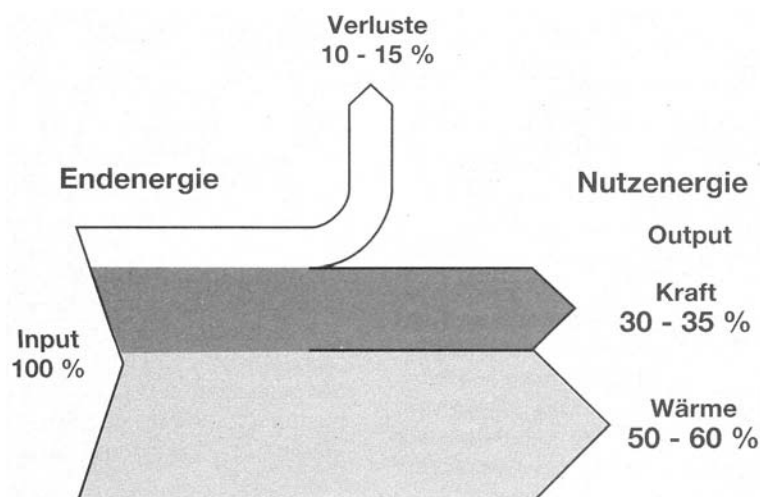


Bild 5: Energieflussdiagramm Kraft-Wärme-Kopplung

Prinzip der parallelen Wärmenutzung

Bei einer vollständigen Verwertung des Klärgases in einer WKK-Anlage steht im Vergleich zu einer direkten Verfeuerung des Klärgases etwa ein Drittel weniger Wärme zur Verfügung. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass auch bei WKK-Betrieb die erzeugte Wärme weitgehend zur Deckung des gesamten Wärmebedarfes für die Schlammaufheizung, Faulraumbeheizung und Raumwärme ausreicht und nur zu Spitzenlastzeiten (tiefe Aussentemperaturen) kurzfristig eine evtl. Abdeckung durch Kessel evtl. mit Fremdenergie erforderlich werden kann.

Gemäss VUE Beschluss darf aber „keine Maximierung der Stromproduktion, zulasten eines erhöhten fossilen Brennstoffbedarfes erfolgen“.

Der Selbstversorgungsgrad bei der Wärme ist von diversen Faktoren abhängig:

Ausbaugrösse, Belastung Komponente Schlammbehandlung, Dämmungsstandard des Faulraums und Dämmungsstandard der zu beheizenden Bauten.

Das Klärgas ist vollständig mit der WKK zu nutzen, um möglichst viel Strom produzieren zu können. Dadurch entsteht zeitweise überschüssige Wärme (Sommer). Damit diese abgeführt werden kann, müssen die WKK-Anlagen mit einer Rückkühlung mit Brauchwasser oder Luft ausgerüstet werden. Selbst in diesen Fällen mit reduzierter Wärmenutzung sinkt der nutzbare Anteil der Energieproduktion - gewichtet mit den Energiekosten - dank dem hohen Wert der Stromproduktion kaum um mehr als 10-20%.

Mit dem Einsatz mehrerer BHKW-Einheiten wird eine flexiblere Konzept erreicht. Tarifunterschiede (Hoch- und Niedertarif) können besser genutzt, Bezugsspitzen aus dem öffentlichen Netz (Leistungstarif) können - normale Gasproduktion und Bewirtschaftung vorausgesetzt - gezielter vermindert werden. Zukünftig steigende Klärgasproduktion kann mit mehreren BHKW-Einheiten besser verwertet werden.

Anlagenkonzept

Bei Kläranlagen mit üblichen Verhältnissen haben sich folgende allgemeine Grundsätze für die Klärgasverwertung bewährt.

- Die gesamte produzierte Klärgasmenge wird in erster Priorität verstromt.
- Die Verwertung erfolgt vorzugsweise mittels BHKW.
- Das BHKW deckt ganzjährig den grössten Teil des Wärmebedarfes ab.
- Die Wärmespitzenlast wird durch einen Heizkessel (Klärgas/Heizöl/Erdgas) abgedeckt.
- Bei Ausfall eines BHKW muss der Heizkessel die entsprechende Wärmeleistung aus Sicherheitsgründen vollständig liefern können.
- Bei mittleren und grösseren Anlagen ist eine Aufteilung auf mehrere BHKW-Module zu prüfen.
- Die vollständige Klärgasverstromung erfordert eine Rückkühlung (Wasser oder Luft) für den Sommerbetrieb.
- Der Einsatz des BHKW als Ersatzstromgruppe soll bei Bedarf geprüft werden.

Klärgasproduktion

Die wichtigste Grösse bei der Auslegung einer WKK-Anlage ist die Bestimmung des zukünftigen Klärgasanfalls während der Nutzungszeit der geplanten Anlage. Nur wenn dieser Wert stimmt, ist später auch ein optimaler WKK-Betrieb möglich (Kapitel 3.2).

Faktoren für die Prognose der Klärgasproduktion:

- Belastung der Kläranlage bei Inbetriebsetzung und am Ende der Nutzungszeit der WKK
- vorgesehene/geplante Ausbauten, Art der Abwasserbehandlung und/ oder Schlammbehandlung (spezifische Klärgasproduktion)
- Entwicklung Industrie; Zu- oder Abnahme der Abwasserfrachten

Auf Basis der vorhandenen Betriebszahlen und der erstellten Prognose für die zukünftige Entwicklung der Kläranlage sind die Tageswerte der Gasproduktion festzulegen.

Erhöhung Stromerzeugung mit Erdgas

Strom ist pro Energieeinheit teurer als Erdgas. Deshalb kann es auf einer Kläranlage sinnvoll sein, die eigene Stromproduktion aus dem BHKW durch den Einsatz von zusätzlichem Erdgas zu steigern. Die zusätzliche Stromproduktion kann gezielt zur weiteren Senkung des Hochtarifbezuges und der Bezugsspitzen vom Netz eingesetzt werden. Gleichzeitig wird die Energieversorgung zusätzlich abgesichert und der Eigenversorgungsgrad erhöht.

Dies Stromveredelung ist gemäss VUE Bschluss¹⁾ für die naturemade star Zertifizierung nicht zulässig.

Dimensionierung BHKW

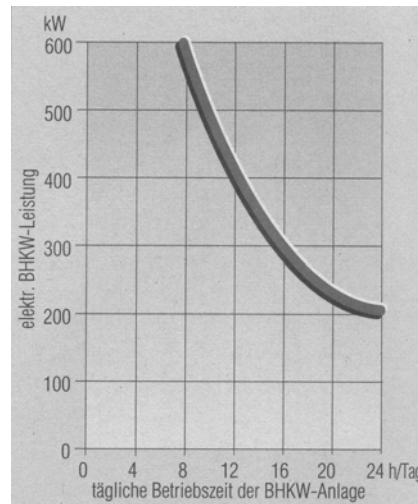
Grundlagen zur Dimensionierung einer BHKW-Anlage ergeben sich aus der Ermittlung des Klärgasanfalls, des Stromverbrauchs, des Wärmebedarfs und über die Nutzungsdauer der WKK. Dabei sind zukünftig veränderte Situationen (u. a. Reduktion Energiebedarf durch Energieoptimierung, Erhöhung spezifischer Klärgasproduktion) zu berücksichtigen.

Neben mengenabhängigen Werten (Tag, Monat, Jahr) sind leistungsabhängige Ganglinien (zumindest für repräsentative Tage des Jahres) darzustellen. Besondere Bedeutung kommt hierbei der elektrischen Leistungsganglinie mit Vorgabe der Hoch- und Niedertarifzeiten zur Optimierung der Dimensionierung bzw. Betriebsweise des BHKW und des Klärgasspeichers zu.

Bei der Dimensionierung der gesamten BHKW-Leistung ist auf eine 100% ige Klärgasnutzung Wert zu legen. Als Richtwert ist hierbei eine BHKW-Gesamtleistung zu wählen, die in einem Zeitraum von 6667 Stunden pro Jahr die anfallende Klärgasmenge verstromen kann.

Für die Modellanlage mit 100'000 EW und einem täglichen Klärgasanfall von 25 l/EW ergibt sich eine zur Verfügung stehende Brennstoffleistung von rund 5840 MWh/a. Bei Ansatz eines elektrischen Wirkungsgrades von 32 % ergibt sich in Abhängigkeit von der täglichen Betriebszeit die in Bild 6 dargestellte BHKW-Leistung.

Bild 6:
Erforderliche BHKW
Gesamtleistung für
100'000 EW in
Abhängigkeit von der
täglichen Betriebszeit.



Bei einer Betriebszeit von 18,3 h je Tag ergibt sich eine elektrische Leistung gemäss Tabelle 2. Diese gesamte elektrische Leistung ist zweckmässigerweise (Verfügbarkeit, Teillastabdeckung) auf zwei Einheiten mit je hälftiger elektrischer Leistung aufzuteilen. Hierdurch wird auch ein Mischbetrieb mit 24-h-Laufzeit eines Moduls mit leistungsabhängiger Zuschaltung des zweiten Moduls ermöglicht.

Hydraulische Entkopplung

BHKW-Module erzeugen im Koppelprozess gleichzeitig Strom und Wärme. Zur vollen Nutzung der elektrischen Energie auch bei schwankendem Wärmebedarf ist die BHKW-Anlage über einen Wärmespeicher hydraulisch zu entkoppeln. Mit dieser Entkopplung wird sichergestellt, dass der wasserseitige Durchfluss über die Module jederzeit konstant ist und ein sich ändernder Wärmebedarf keinen störenden hydraulischen Einfluss auf die BHKW-Anlage verursacht.

Wärmespeicher

Der Wärmespeicher dient der Entkopplung der Wärmeerzeugungsseite von der Wärmenutzungsseite. Gleichzeitig wird ein einfaches Steuerungskonzept ermöglicht. Durch die Betriebszustände des Wärmespeichers (Temperaturschichtung) können alle Steuerungsvorgaben, wie

- Zu- und Abschaltung der Module
- Rückkühlersteuerung
- Kesselanforderung als Spitzendeckung
- Kesselanforderung bei Ausfall der BHKW-Anlage

einfach und übersichtlich realisiert werden.

Als Mindestgrösse des Wärmespeichers ist die zulässige Schalthäufigkeit bzw. die Mindestlaufzeit der Module als Vorgabe bei der Auslegung anzusehen. Als Richtwert ist eine Laufzeit von 0,5 h (Ansatz: keine Wärmeabnahme) anzusetzen. Das bedeutet z. B. für ein BHKW-Modul mit rund 140 kW elektrischer Leistung und einer Stromkennzahl von 0,55 sowie einer Temperaturerhöhung von 20 K ein Speichervolumen von 6,0 m³.

Durch eine entsprechende Dimensionierung von Klärgasbehälter und Wärmespeicher kann die technisch gegebene direkte Kopplung zwischen Strom- und Wärmeerzeugung für den Betrieb der Kläranlage gemindert werden.

Gasbehälter und Wärmespeicher ermöglichen neben der hydraulischen Entkopplung auch eine Energiespeicherung (Puffer) und damit zeitlich begrenzte Anpassung an strom- und wärmeseitige Spitzenlastanforderungen.

In Bild 7 ist eine schematische Übersicht über die strom- und brennstoffseitigen Zusammenhänge einer BHKW-Anlage mit Spitzenkessel wiedergegeben.

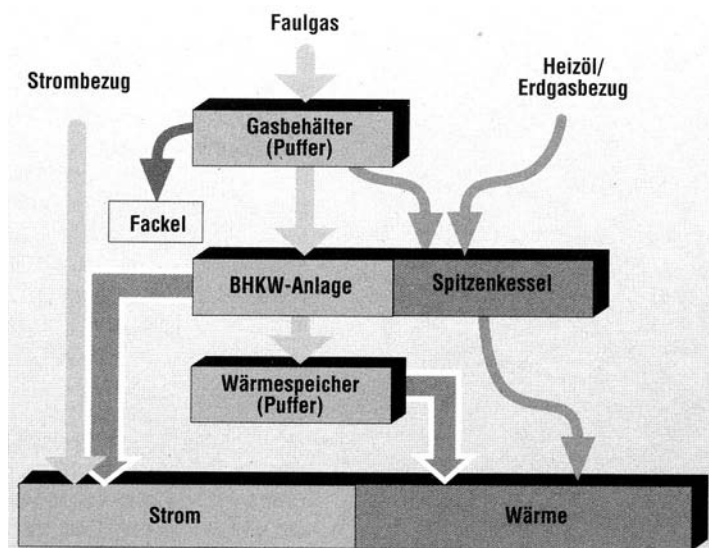


Bild 7: Kraft-Wärme-Kopplung in Kläranlagen

Rückkühler

Für den Dauerbetrieb der BHKW-Anlage bei geringer Wärmeabnahme (Sommerzeit) ist zusätzlich zum Wärmespeicher eine Rückkühlanlage im BHKW-Rücklauf erforderlich. Die Rückkühlanlage ist auf die volle thermische Leistung der BHKW-Anlage auszulegen.

Für die Modellanlage mit rund 280 kW elektrischer Leistung ist eine thermische Rückkühlleistung von rund 500 kW erforderlich.

Bei der Auslegung des Rückkühlers als geschlossener Wasser-Luft-Kühler ergeben sich wesentliche Auslegungsrichtlinien hinsichtlich der maximalen Aussenlufttemperatur und des zulässigen Schallpegels. Als Auslegungstemperatur sollte für den Sommerbetrieb ein Wert von mindestens 32 °C eingeplant werden. Hinsichtlich des Schallpegels ergeben sich entscheidende Auswirkungen auf die Investitionskosten und den Platzbedarf bei verschärften Immissionsanforderungen.

Auch im Sommer ist eine maximale Stromproduktion sinnvoll.

Generatorauslegung

Generatoren für BHKW-Anlagen in Kläranlagen sind als Synchrongeneratoren auszuführen; nur Synchrongeneratoren ermöglichen eine Ersatzstromversorgung im Inselbetrieb.

Neben der Leistungsauslegung (Scheinleistung in kVA) unter Beachtung der Zuschaltungsmöglichkeit des grössten Antriebmotors im Ersatzstromfall ergeben sich Blindleistungsanforderungen. Es ist durch eine Blindleistungsregelung der Generatoren eine Verschlechterung des Bezugs-cos ϕ gegenüber dem Elektrizitätswerk zu vermeiden. Bei reiner Wirkleistungserzeugung durch das BHKW besteht die Gefahr, dass trotz gutem Anlagen-cos ϕ der Bezugs-cos ϕ sich wesentlich verschlechtert und eine Blindstromverrechnung durch das Elektrizitätswerk erfolgt.

Ersatzstrombetrieb

Bei Einsatz der BHKW-Anlage für den Ersatzstrombetrieb sind zusätzlich Anforderungen zu beachten, u.a. die Verriegelung des Ersatzstromnetzes gegenüber der EW-Einspeisung.

Gasmotor-Auswahl

In Kläranlagen sind die Grenzwerte hinsichtlich der LRV bei Gas-Otto-Motoren mit Magermotortechnik zu erreichen. Der Einsatz von BHKW-Modulen mit geregelter Dreiweg-Katalysator ist aufgrund der Brennstoff-Verunreinigungen, insbesondere mit Schwefel, Fluor und Chlor, nicht zu empfehlen.

Für diese Arbeit wurde nur der, in Kläranlagen in der Schweiz fast ausschliesslich eingesetzte, Magermotor berechnet.

Anhang B. Begriffe und Abkürzungen

ARA	Abwasserreinigungsanlage	
BHKW	Blockheizkraftwerk	
BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf	Ist ein Mass (O ₂ pro l Abwasser) für die Sauerstoffmenge, die von Mikroorganismen innerhalb von 5 Tagen bei 20°C im aeroben Milieu verbraucht wird, um die organischen Stoffe in CO ₂ , Wasser und neue Biomasse umzusetzen.
BSB ₅ Fracht		BSB5 Menge pro Zeiteinheit
EI-99	Eco-Indicator 99	Bewertungsmethode für globale Umweltauswirkungen.
EGW	Einwohnergleichwert	Entspricht der Abwasserbelastung, die ein Einwohner pro Tag verursacht, für die man eine BSB ₅ Fracht von 60 g pro Tag annimmt. Umrechnungswert aus dem Vergleich von gewerblich / industriellem mit häuslichem Abwasser.
EW	Einwohnerwert	Summe aus Einwohnerzahl und Einwohnergleichwert EWG
NMVOC	Non Methan Volatile Organic Compounds). Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan.	Flüchtige organischen Verbindungen sind ein Gemisch von unterschiedlich wirkenden Substanzen. Das Spektrum reicht von nicht toxischen bis zu hochtoxischen und krebserregenden Verbindungen. Zusammen mit den Stickoxiden sind die NMVOC zudem wichtige Vorläufersubstanzen für die Bildung von Photooxidantien (troposphärisches Ozon/ Sommersmog) Methan und FCKW gehören von ihren physikalisch-chemischen Eigenschaften her ebenfalls zu den flüchtigen organischen Verbindungen. Wegen ihrer unterschiedlichen Umweltrelevanz werden diese Stoffe jedoch gesondert betrachtet.
NO _x	Stickoxide	Stickoxid-Belastungen führen zu vielfältigen Schädigungen von Pflanzen und empfindlichen Ökosystemen und können Atemwegkrankungen verursachen. Stickoxide sind zudem eine wesentliche Vorläufersubstanz der Ozonbildung. NO _x wird als NO ₂ gemessen.
oTS	organische Trockensubstanz	
TS	Trockensubstanz	Anteil der Trockenmasse an der gesamten Masse des Schlammes
SO ₂	Schwefeldioxid	Bei hohen Konzentrationen führt Schwefeldioxid zu Erkrankungen der Atemwege, zu einer Schädigung von Pflanzen und empfindlichen Ökosystemen sowie zu einer Schädigung von Bauwerken. Schwefeldioxid ist zudem eine wichtige Vorläufersubstanz für die Bildung von sauren Niederschlägen und Aerosolen.
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung	Gleichzeitige Erzeugung von Wärme und Strom

Anhang C: Kennwertmodell

Das Kennwertmodell dient der raschen Überprüfung, ob der Eco-Indicator Grenzwert eingehalten wird. Auf der ARA vorhandene Betriebsdaten können in der Eingabemaske eingegeben werden. Der Entscheid, ob der Grenzwert eingehalten wird, erscheint unmittelbar nach der Eingabe.

Die Erfüllung des Kennwertmodells ist eine Bedingung für die erfolgreiche Zertifizierung mit dem *naturemade star* Label.

Das Kennwertmodell kann als Excel Tabelle über www.naturemade.org abgerufen werden.

Ökostrom-Prüfung: Stromerzeugung mit Klärgas			
Eingaben:		Deutsch	
Anlagenname:	Abwasserreinigungsanlage Beispieldorf		
	Nitrifikation + Denitrifikation		
ARA Grösse effektiv (nicht Planungswert)	EW		100'000
Volumen Faulturm	m3		2'700
Volumen Gasometer	m3		4'000
Klärgaserzeugung pro Jahr	m3		912'000
Klärgasverbrauch pro Jahr	m3		890'000
Klärgasverbrauch BHKW pro Jahr	m3		860'300
Klärgasverbrauch Heizkessel pro Jahr	m3		0
Klärgasverkauf an Dritte pro Jahr	m3		0
Stromverbrauch pro Jahr	kWh		3'400'000
Stromproduktion mit BHKW pro Jahr	kWh		1'760'000
Total installierte BHKW Leistung	kW		240
Vollast Betriebsstunden BHKW pro Jahr	h		7'360
Schmierölverbrauch BHKW pro Jahr	kg		670
Heizölverbrauch pro Jahr	l		5'000
Resultate:			
Ökologischer Mehrwert pro kWh Stromproduktion	EI-99-points		43
Ökostrom Grenzwert pro kWh Stromproduktion	EI-99-points		14
Ökostromkriterium erfüllt			

© Swiss TS, CH-3601 Thun C. Ronchetti, P. Bienz

Anhang D: Literaturverzeichnis

- 1) VUE Verein für umweltgerechte Elektrizität. Neues Energiesystem Klärgas. - Zertifizierung mit naturemade star. - Voraussetzungen zur Berechnung der globalen Ökobilanz. Beschluss Vorstand VUE 30. August 2001
- 2) VUE Verein für umweltgerechte Elektrizität. Grundsätze zur Zertifizierung – Verfahren und Kriterien zur Zertifizierung der Stromproduktion mit naturemade star. 19. Februar 2002
- 3) Frischknecht R., Jungbluth N., Ökobilanz von Strom aus Biogas von Kläranlagen. Festlegung der Systemgrenze für die Zertifizierung von Ökostrom gemäss naturemade star. ESU-services Uster, 10. August 2001
- 4) Ryser Ingenieure AG, Bern. Übersicht BUWAL-ARA-Stammkarten und persönliche Mitteilungen.
- 5) Müller E. A. Kobel B., Künti T., Pinnekamp J., Seibert-Erling G., Schaab R., Böcker K. Handbuch Energie in Kläranlagen. Herausgeber: Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, D-40476 Düsseldorf, September 1999
- 6) Bollens U., Frischknecht R., Ökoinventare von Energiesystemen Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz 3. Auflage Juli 1996 (CD)
- 7) Behandlung von Schlamm- Stabilisierung
Bemessung siedlungswasserwirtschaftlicher Anlagen
Skriptum UNI Karlsruhe
- 8) Edelmann W., Schleiss K., Engeli H., Baier U.
Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas
Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE Bern. Herbst 2001
- 9) Schleiss K., Edelmann W.,
Stromproduktion aus der Feststoff-Vergärung
Ökobilanz im Auftrag des Biogasforum Schweiz
- 10) Einspeisung von Klärgas ins öffentliche Erdgas-Verteilnetz
Merkblatt TISG 0137d
Technisches Inspektorat des Schweiz. Gasfaches
- 11) Frischknecht R. Globale Umweltkriterien für Ökostrom.
Schlussbericht im Auftrag des Vereins für umweltgerechte Elektrizität. 5. Mai 2000
- 12) Wursthorn H. Stoff und Energieflussanalyse. Simulation der Kläranlage Osnabrück mit Umberto®.
Institut für Umweltforschung, D-49069 Osnabrück.
- 13) C. Ronchetti, P. Bienz
Ökobilanz über die Nutzung von überschüssigem Klärgas.
Studie im Auftrag der ARA Buholz Emmen. Nov. 2002
- 14) Wellinger A., Baserga U., Edelmann W., Egger K., Seiler B. Biogas-Handbuch
2. Auflage, Verlag Wirz Aarau ISBN 3-85983-035-X
- 15) Goedkoop, M., et. al:
The Eco-Indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report, Pré Consultants, Amersfoort, April 2000.

Die Bilanz wurde in Anlehnung an folgende ISO Normen erstellt:

- DIN EN ISO 14040: 1997-08. Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen
- DIN EN ISO 14041: 1998-11. Ökobilanz - Festlegung des Zieles und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz
- DIN EN ISO 14042: 2000-07. Ökobilanz - Wirkungsabschätzung
- DIN EN ISO 14043: 2000-07. Ökobilanz - Auswertung