



Schlussbericht vom 20. Februar 2019

Biogasaufbereitungsanlage

Aufbereitung von 40 Nm³/h Klärgas zu Reingas und Einspeisung ins 5 bar-Erdgasnetz



© Christian Müller, Eniwa / 2016



eniwa

Datum: 14.12.2018

Ort: Aarau

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Eniwa AG
Industriestrasse 25
CH-5033 Buchs AG
www.eniwa.ch

APEX AG
Industriestrasse 31
CH-4658 Däniken

Abwasserverband Oberwynental
c/o EWS Energie AG
Winkelstrasse 50
CH-5734 Reinach

Wynagas AG
Winkelstrasse 50
CH-5734 Reinach

Autoren:

Christian Müller, Eniwa AG, christian.mueller@eniwa.ch
Ueli Oester, Apex AG, uoester@apex.eu.com

BFE-Programmleitung:	Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch
BFE-Projektbegleitung:	Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch
BFE-Vertragsnummer:	SI/501192-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Der Abwasserverband Oberwynental betreibt die Abwasserreinigungsanlage im aargauischen Reinach. Von 2014 bis 2017 wurde die Abwasserreinigungsanlage umfassend saniert und erweitert. In diesem Zusammenhang wurde entschieden, das anfallende Klärgas aufzubereiten und ins Erdgasnetz einzuspeisen und auf die Verwertung im Blockheizkraftwerk zu verzichten. Gemeinsam mit der Energie-Dienstleister Eniwa AG und dem Anlagenlieferant Apex AG wurde eine Biogasaufbereitungsanlage auf dem Areal der Abwasserreinigungsanlage realisiert.

Das Projekt beinhaltete den Bau und Betrieb einer Membran-Aufbereitungsanlage zur Aufbereitung von rund 40 Nm³/h Rohgas. Die Membrantechnik zur Aufbereitung von Biogas war zu diesem Zeitpunkt eine verhältnismässig junge Technologie, weshalb erst wenige Betriebserfahrungen vorlagen. Aufgrund der Anlagengrösse und der Auftragsvergabe an den Schweizer Anlagenlieferant Apex, der bis zu diesem Zeitpunkt noch keine kommerzielle Anlage gebaut hatte, erlangte das Projekt einen Demonstrationscharakter.

Ziel des Projektes war es deshalb, der Anlagenbetrieb in den ersten drei Betriebsjahren zu überwachen und auszuwerten. Die Resultate werden in diesem Bericht zusammengefasst. Seit dem 19. Mai 2015 bis Ende Oktober 2018 wurden insgesamt 1.77 GWh bzw. 166'099 Nm³ Biogas ins 5bar-Erdgasnetz der Wynagas AG eingespeist.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	4
Ausgangslage	5
Ziele des Projektes	5
Grundlagen – Randbedingungen	6
Anlagenbeschrieb	7
Vorgehen Projektrealisierung	11
Messkonzept	11
Ergebnisse	12
Biogasproduktion	12
Batch-Betrieb	13
Fackelverluste	13
Methankonzentration und «Restmethan» gemäss SVGW	14
Spezifischer Stromverbrauch	14
Energie- und Massenbilanz	16
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	18
Diskussion	19
Generelle Erkenntnisse	19
Betriebsdruckregelung für konstante Produktgasqualität	19
Detailbetrachtung Druckregelung	22
Simulationsprogramm als Hilfsmittel für die Betriebsbeurteilung	22
Ausblick, weitere Schritte	25
Schlussfolgerungen	26
Referenzen	27

Ausgangslage

Der Abwasserverband Oberwynental (AOW) betreibt die Abwasserreinigungsanlage im aargauischen Reinach (ARA Reinach), die heute die Abwässer aus den Gemeinden Beromünster, Burg, Leimbach, Menziken, Reinach und Rickenbach reinigt. Von April 2014 bis 22. September 2017 wurde die ARA Reinach umfassend saniert und erweitert. Mit den umgesetzten Umbau-, Erweiterungs- und Sanierungsarbeiten ist eine Anlage entstanden, die in den nächsten Jahren sämtliche im Einzugsgebiet anfallenden Abwässer gesetzeskonform und effizient reinigen kann. Die aktuelle organische Belastung der Abwässer aus Haushalten, Gewerbe und Industrie entspricht 51 000 Einwohnerwerten. Mit dem Ausbau verfügt die ARA Reinach über eine Kapazität von 55 000 Einwohnerwerten. Die organische Fracht im Abwasser wird in aeroben und anaeroben Reinigungsstufen abgebaut. Das in den anaeroben Prozessen generierte Klärgas wurde vor der Sanierung über Jahre in einem Blockheizkraftwerk zur Strom- und Wärmeproduktion und in einem bivalenten Öl-/Biogas-Heizkessel energetisch genutzt. Heute entstehen rund 305 000 m³ Klärgas mit einem Methangehalt von 60–65%. Mittelfristig wird eine Erhöhung der Klärgasproduktion auf über 350 000 m³ erwartet.

Die Eniwa AG (Eniwa) ist ein regional verankertes Energie-Dienstleistungsunternehmen mit Sitz in Buchs. Das Unternehmen bietet rund 30 Gemeinden in der Region breite Versorgungs- und Installationsdienstleistungen an. Unter anderem betreibt die Eniwa ein Erdgasnetz und versorgt Kunden mit Erd- und Biogas. Die Eniwa setzt sich zum Ziel, das Erdgas kontinuierlich zu ökologisieren und dazu den Anteil vom Biogas im Erdgasnetz zu erhöhen. Die Erhöhung wird vorzugsweise über eine Biogasproduktion in eigenen oder über den Zukauf von Biogas-Zertifikaten aus Schweizer Produktionsstätten realisiert.

Die Apex AG (Apex) mit Sitz in Däniken SO baut und betreut kleine bis grosse Erdgastankstellen in der Schweiz und entwickelt Biogasaufbereitungsanlagen für kleine Rohgasmengen.

Ziele des Projektes

Mit dem Sanierungsprojekt verfolgte der AOW das Ziel, durch Energieeffizienz und Unterhaltsfreundlichkeit die Betriebskosten in den kommenden Jahrzehnten auf möglichst tiefem Niveau zu halten. So wurde beispielsweise im 2013 entschieden, anstelle der Investition in ein neues Blockheizkraftwerk, dessen Wärmeanfall vor allem in den Sommermonaten nie voll ausgeschöpft werden konnte, das entstehende Klärgas ins Erdgasnetz der Wynagas AG – einer Tochterfirma der Eniwa AG – einzuspeisen und auf eine Wärmerückgewinnung aus dem gereinigten Abwasser zu setzen.

Das Sanierungsprojekt des AOW und die Zielsetzungen der Eniwa waren ideale Voraussetzungen für eine Zusammenarbeit. Ende 2013 bekräftigten die beiden Parteien die Absicht, das Klärgas zukünftig aufzubereiten und ins Erdgasnetz einzuspeisen.

Das Projekt beinhaltete den Bau und Betrieb einer Membran-Aufbereitungsanlage auf dem Areal der ARA Reinach zur Aufbereitung von rund 40 Nm³/h Rohgas. Die Membrantechnik zur Aufbereitung von Biogas war zu diesem Zeitpunkt eine verhältnismässig junge Technologie, weshalb erst wenige Betriebserfahrungen vorlagen (in der Schweiz wurde die erste Membran-Aufbereitungsanlage mit einer Kapazität von rund 200 Nm³/h im Januar 2013 in Betrieb genommen).



Aufgrund der Anlagengrösse und der Auftragsvergabe an den Schweizer Anlagenlieferant Apex, der bis zu diesem Zeitpunkt noch keine kommerzielle Anlage gebaut hatte, erlangte das Projekt einen Demonstrationscharakter.

Ziel des Projektes war es deshalb, der Anlagenbetrieb in den ersten drei Betriebsjahren zu überwachen und auszuwerten. Die Resultate werden in diesem Bericht zusammengefasst.

Grundlagen – Randbedingungen

Biogas, im Zusammenhang mit Kläranlagen auch Klärgas genannt, ist ein Gemisch von zumeist brennbaren Gasen, das bei der anaeroben Gärung entsteht. Dabei werden biotische Stoffe unter Abwesenheit von Sauerstoff von Bakterien zersetzt, was typisch für Fäulnisprozesse ist. Den größten Anteil an den brennbaren Bestandteilen des Gasgemischs hat Methan mit der Summenformel CH_4 . Der verbleibende Restanteil besteht grösstenteils aus Kohlendioxid mit der Summenformel CO_2 . Das Biogas enthält je nach Vorkommen u.a. auch Spuren von Sauerstoff (O_2) und Ammoniak (NH_3).

Klär- oder Biogas besteht aus etwa 60% Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas. Sofern zu Erdgasqualität aufbereitet, kann Biogas ins Erdgasnetz eingespeist oder direkt in Biogas-Tankstellen zur Fahrzeugbetankung verwendet werden.

Eine Vielzahl von schweizerischen Biogasanlagen und Kläranlagen produzieren verhältnismässig kleine Mengen an Biogas, die mit herkömmlichen, grosstechnisch konzipierten Biogasaufbereitungsanlagen nicht wirtschaftlich betrieben werden können.

Anlagenbeschreibung

Die Biogasaufbereitungsanlage steht auf dem Areal der ARA Reinach in direkter Nähe des Gasspeichers (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Aufsicht auf das Areal der ARA Reinach mit Blick auf die Komponenten Faulturm, Gasfackel, Gasspeicher und Gasaufbereitungsanlage.

Die Anlage besteht aus einem Doppelcontainer, der das Aufbereitungsmodul mit Odorierung, dem Gasverdichter und weitere Komponenten (u. a. Aktivkohlefilter, Sensorik, Gasmessung) enthält und die Anforderung an den Explosionsschutz erfüllt (Ex-Zone). Im kleineren Container ausserhalb der Ex-Zone sind die Anlagensteuerung und die Gasanalytik verbaut. Der Kaltwassersatz wurde ausserhalb der Container platziert (siehe Abbildung 2 und 3).

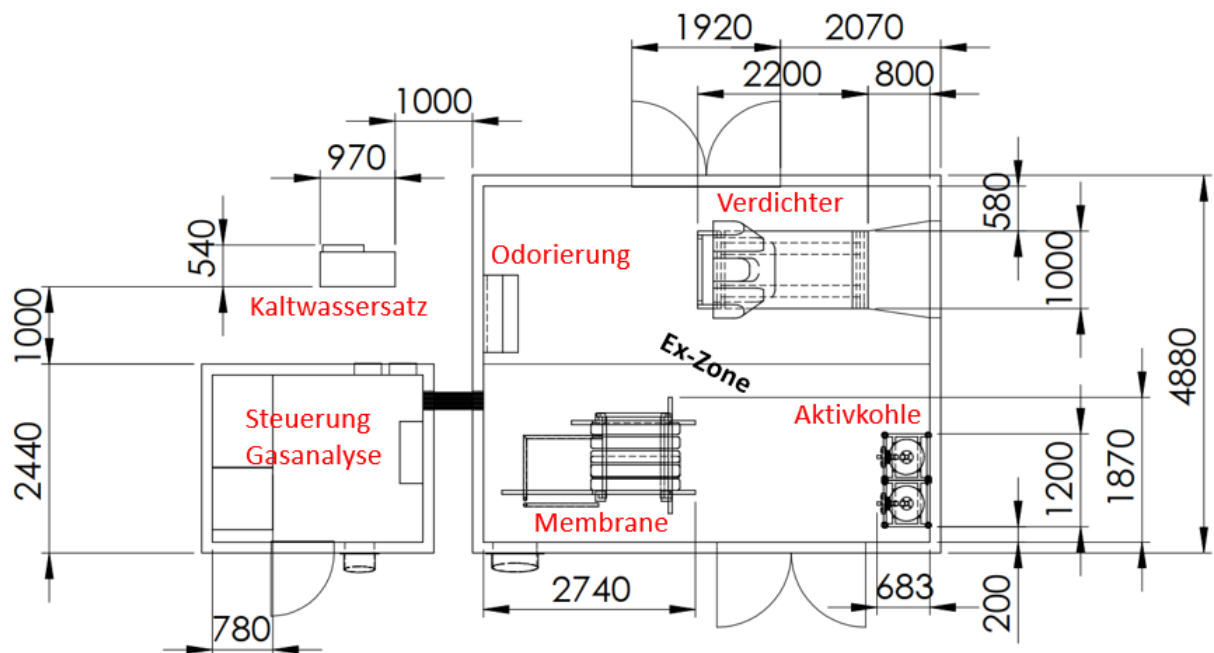


Abbildung 2: Grundriss der Aufbereitungsanlage mit den wichtigsten Anlagenkomponenten.



Abbildung 3: Innenansicht der Container (Ex-Zone) mit dem Verdichter (rechts) und dem Aufbereitungsmodul (links).

Klärgas mit einem Methangehalt $> 60\%$ der Abwasserreinigungsanlage wird in einem Gasspeicher gesammelt (siehe Abbildung 4) und anschliessend zur Aufbereitungsanlage geführt. Die Klärgasproduktion fluktuiert saisonal und wetterbedingt, die Aufbereitungsanlage jedoch bevorzugt konstante Konditionen. Der Gasspeicher glättet diese Schwankungen. Die Aufbereitungsanlage wird anhand des Speichervolumens gesteuert. Bei vollem Speicher wird die Anlage gestartet und bereitet das vorhandene Klärgas auf. Sobald der Speicher den Tiefstand erreicht, wird die Anlage gestoppt (Batch-Betrieb).

Sollte der Gasometer im Falle einer Betriebsstörung einen Höchststand überschreiten, wird das Klärgas auf eine Notfackel geführt und verbrannt. Das produzierte Klärgas wird heute noch für die Beheizung der Faultürme genutzt, in der Aufbereitungsanlage veredelt oder über die Gasfackel verbrannt. Klärgas, das zur Aufbereitungsanlage gelangt wird in der Folge als Rohgas bezeichnet. Das aufbereitete Gas entsprechend als Reingas.

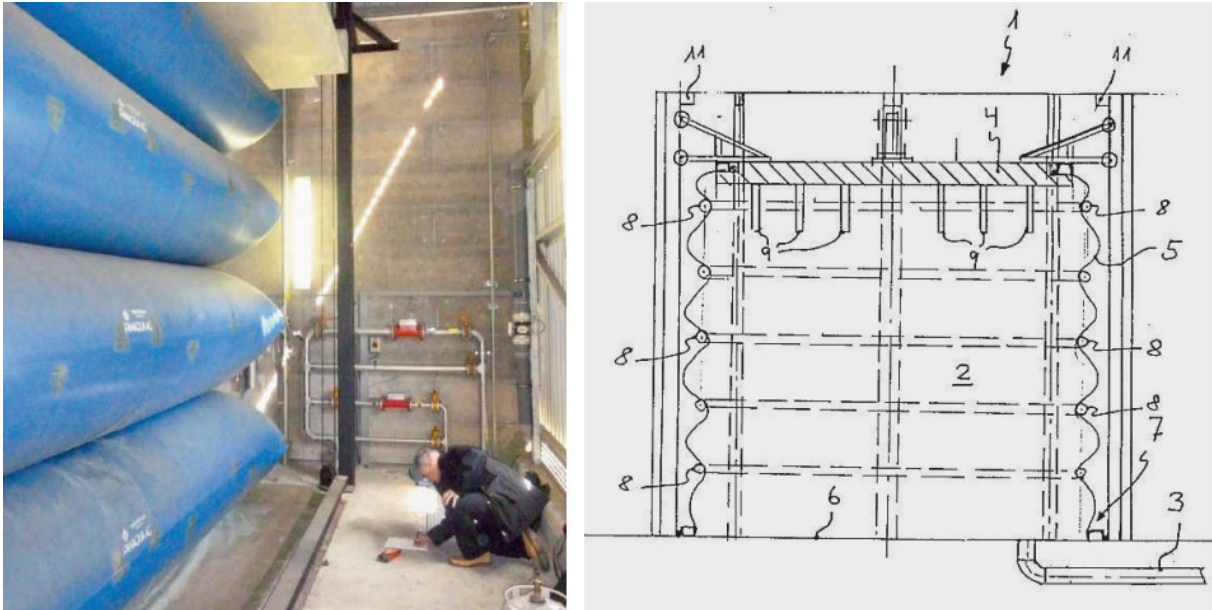


Abbildung 4: Gasspeicher (links) und Prinzipschema (rechts) mit Betonplatte zur Erzeugung vom Vordruck

In der Aufbereitungsanlage wird das Rohgas zuerst durch Entfeuchtung und Abtrennung von Siloxanen und Schwefelwasserstoff (H_2S) vorkonditioniert (siehe Abbildung 5). Nach der Vorkonditionierung wird das Rohgas mit einem ölfreien, frequenzgesteuerten Kolbenverdichter auf den Betriebsdruck der Membranen verdichtet. In den nachgeschalteten Hohlfaser-Membranen findet die Trennung zwischen CH_4 -reichem Gas (Retentat) und CO_2 -reichem Gas (Permeat) statt. Mit dem gewählten dreistufigen Membranverfahren (Stufe I, II und III) von Evonik Fibres GmbH wird das Rohgas aufbereitet. Bei der Inbetriebnahme wurden jeweils pro Stufe zwei Membranmodule eingesetzt. Aktuell wird die Anlage mit je einem Membranmodul (Membrane der neueren Generation mit grösserer Kapazität) in der Stufe I und II und zwei in der Stufe III betrieben. Damit erreicht man die geforderten Gasqualitäten im Reingas ($> 96\% CH_4$) und im Offgas (gemäss kantonaler Anforderung max. $1\% CH_4$ im Offgas-Volumenstrom).

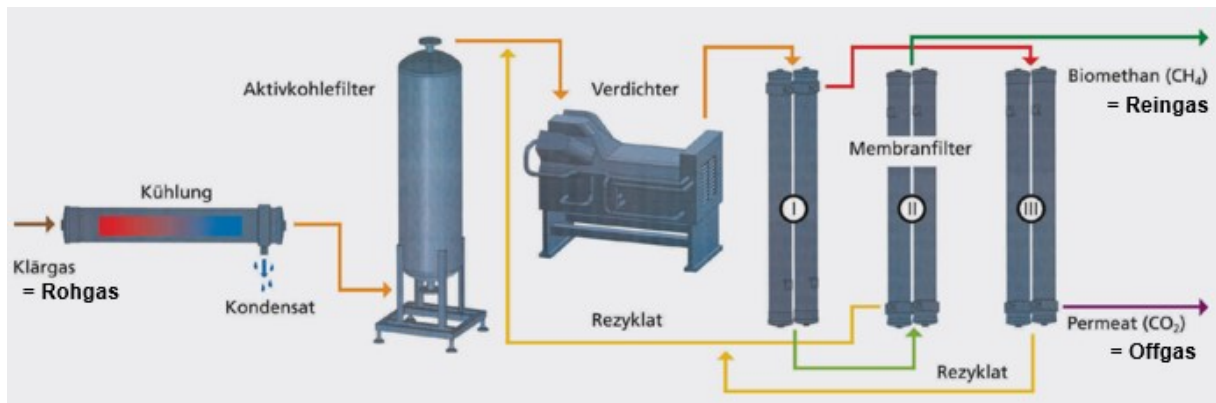


Abbildung 5: Vorkonditionierung, Druckerhöhung und Aufbereitung vom Klärgas in drei Stufen. Die Farben symbolisieren eine Aufkonzentration von Methan (von braun, über orange, hellgrün zu dunkelgrün) bzw. Kohlendioxid (von braun, über orange, rot zu violett). Das Rezyklat hat die geforderte Reinheit noch nicht erreicht und wird deshalb in den Verdichter zurückgeführt.

Das Offgas wird über Dach an die Atmosphäre abgeführt. Das Permeat von Stufe II und das Retentat von Stufe III wird im Prozess rezykliert und nochmals dem Verdichter zugeführt (Rezyklat). Die Membranen bestehen aus beschichteten Hochleistungskunststoffen und zeichnen sich durch unterschiedliche Gasdurchlässigkeiten aus. Aufgrund ihrer hohen Kohlendioxid- und Methan-Selektivität eignen sie sich, CO_2 und andere Gaskomponenten vom Rohgas bzw. vom CH_4 abzutrennen (siehe Abbildung 6).

Die Membranen funktionieren am effizientesten unter konstanten Betriebsbedingungen (Betriebsdruck, Temperatur und Durchflussmenge). Viele weitere Parameter und Einflüsse bestimmen jedoch die Gesamtanlageneffizienz. Dies soll anhand folgender zwei Beispiele erläutert werden:

- Bei hohem Betriebsdruck und kleinem Volumenstrom ist die Verweilzeit des Gases in der Membrane gross, d.h. viele CO_2 -Moleküle können die Poren passieren. Dadurch erhöht sich die Reinheit im Retentat. Im Gegenzug wird die Permeatmenge und somit die Rezykulationsrate grösser. Die hohe Reingas-Qualität geht somit auf Kosten der Anlageneffizienz.
- Eine Anlage im Batch-Betrieb braucht eine gewisse Aufwärmzeit, bis die Gasqualität die geforderte Reinheit erreicht und Reingas zur Netzeinspeisung bereitsteht. So dauert die Aufwärmzeit im Winter deutlich länger als im Sommer. Der spezifische Stromverbrauch ist deshalb im Winter tendenziell höher als im Sommer.

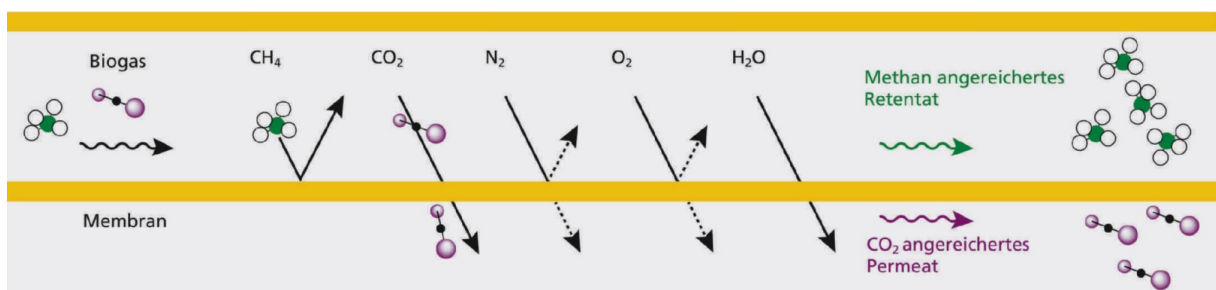


Abbildung 6: Funktionsprinzip der Hohl-faser-Membran. Unter hohem Druck diffundieren kleinere Moleküle (wie z.B. CO_2) durch die Membran. Die grösseren Moleküle (wie z.B. das CH_4) verbleiben in der Hohl-faser.



Vorgehen Projektrealisierung

Im August 2014 erhielt Apex den Auftrag für den Bau und die Lieferung der Gasaufbereitungsanlage in Reinach. Sechs Monate nach der Bestellung fand die Werksabnahme im Herstellerwerk von Apex und anschliessend die Installation in Reinach statt. Seit der technischen Abnahme durch das Technische Inspektorat des Schweizerischen Gasfachs TISG des SVGW im Mai 2015 ist die Anlage in Betrieb. In untenstehender Tabelle sind die wichtigsten Meilensteine zusammengefasst.

Tabelle 1: Wichtige Projekt-Meilensteine.

Datum	Wichtige Meilensteine
19.11.2013	Absichtserklärung zwischen AOW und Eniwa
April 2014	Baustart Sanierung ARA Reinach
22.08.2014	Beauftragung Anlagenlieferant Apex AG
04.12.2014	Eingabe Baugesuch
09.02.2015	Erhalt kommunale Baubewilligung Reinach
19.05.2015	Abnahme technisches Gasinspektorat (TISG) – Ersteinspeisung Biogas
14.10.2015	Einweihung Gasaufbereitungsanlage
Sept. 2017	Einweihung neue ARA Reinach (inkl. neuem Faulturm und Elimination von Mikroverunreinigungen)

Messkonzept

Die Aufbereitungsanlage wurde mit den in Tabelle 2 dargestellten Messinstrumenten ausgerüstet. Die Verluste über die Gasfackel wurden durch den AOW gemessen und der Eniwa übermittelt.

Tabelle 2: Messinstrumente und deren Parameter

Parameter	Einheit	Rohgas	Reingas	Off-Gas		Messinstrument
Volumenstrom	Nm3	x	x		kont. ¹⁾	Prosonic Flow 200
	Nm3		x		kont.	EK280
Temperatur	°C		x		kont.	EK280
Druck	bar		x		kont.	EK280
	bar	x	x		kont.	Cerabar M PMC51
CH ₄	%	x	x		kont.	Prosonic Flow 200
	%				kont.	INCA3011
	%			x	kont.	BlueSens BCP-CH4
CO ₂	%		x		kont.	INCA3011
O ₂	%		x		kont.	INCA3011



H ₂ S	ppm		x		diskont. ²⁾	INCA3011
El. Wirkleistung	kW				Kont.	Stromzähler
Stromverbrauch	kWh				kont.	Stromzähler (Impulse)

1) kont. = kontinuierliche Messung

2) diskont. = diskontinuierliche Messung (ca. 15 min. Intervalle)

Ergebnisse

Biogasproduktion

Seit dem 19. Mai 2015 wird Reingas ins Erdgasnetz der Wynagas AG eingespeist. Während der Sanierungsarbeiten der ARA Reinach wurde für Beheizung der Faultürme noch etwa 50% des produzierten Klärgases eingesetzt. Seit ca. Juli 2017 wird der neue Faulturm mittels Abwasserwärmepumpe beheizt und die Aufbereitungsanlage somit mit der gesamten Klärgasmenge beaufschlagt. Bis Ende Oktober 2018 wurden insgesamt 1.77 GWh bzw. 166'099 Nm³ Biogas in Erdgasnetz eingespeist. Die Entwicklung der Biogas-Produktion seit der Inbetriebnahme ist in Abbildung 7 dargestellt.

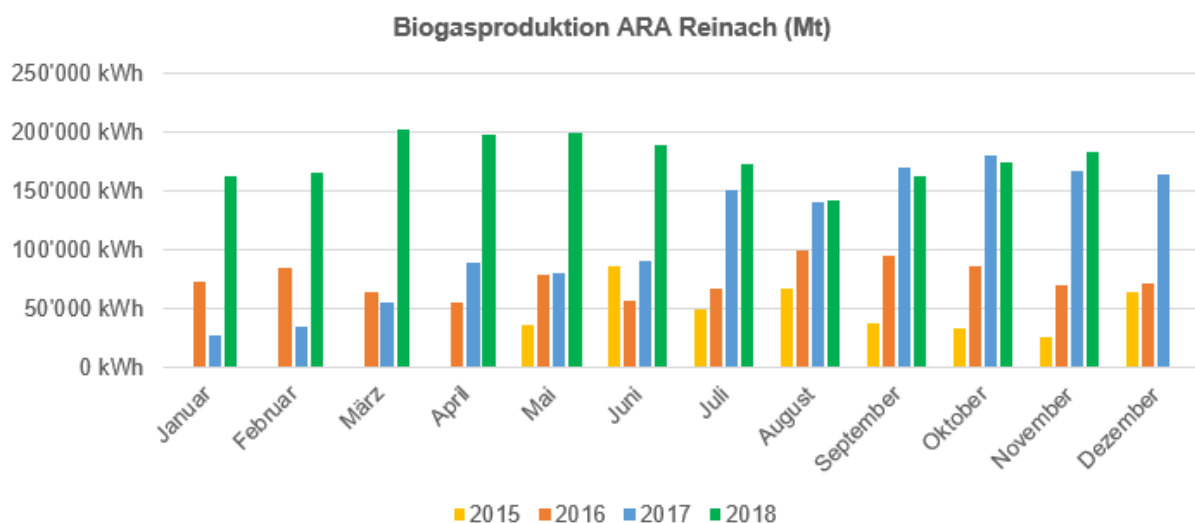


Abbildung 7: Bisheriger Verlauf der Biogasproduktion der Gasaufbereitungsanlage ARA Reinach.

Batch-Betrieb

Die Abbildung 8 illustriert den Batch-Betrieb der Anlage am 10./11.9.2018. Im Betrieb produziert die Anlage aus dem Rohgas vom Speicher ca. 25 Nm³ Reingas pro Stunde (blaue Linie). Das Speicherniveau (rote Linie) sinkt. Bei einem Speicherniveau von 20% stellt die Anlage den Betrieb ein und der Speicher füllt sich innerhalb kurzer Zeit wieder mit Rohgas. Bei 75% Speicherniveau erhält die Anlage einen Startbefehl, um das Rohgas in der Folge wieder zu Reingas aufzubereiten.

Die Methan-Konzentration im Reingas liegt während dem Betrieb leicht oberhalb der 96% (schwarze Linie). Ist die Anlage nicht in Betrieb und die Mess-Sensorik nicht mit Gas durchströmt, sinkt die Messgenauigkeit stark an bzw. sind die aufgezeichneten Werte ohne Relevanz.

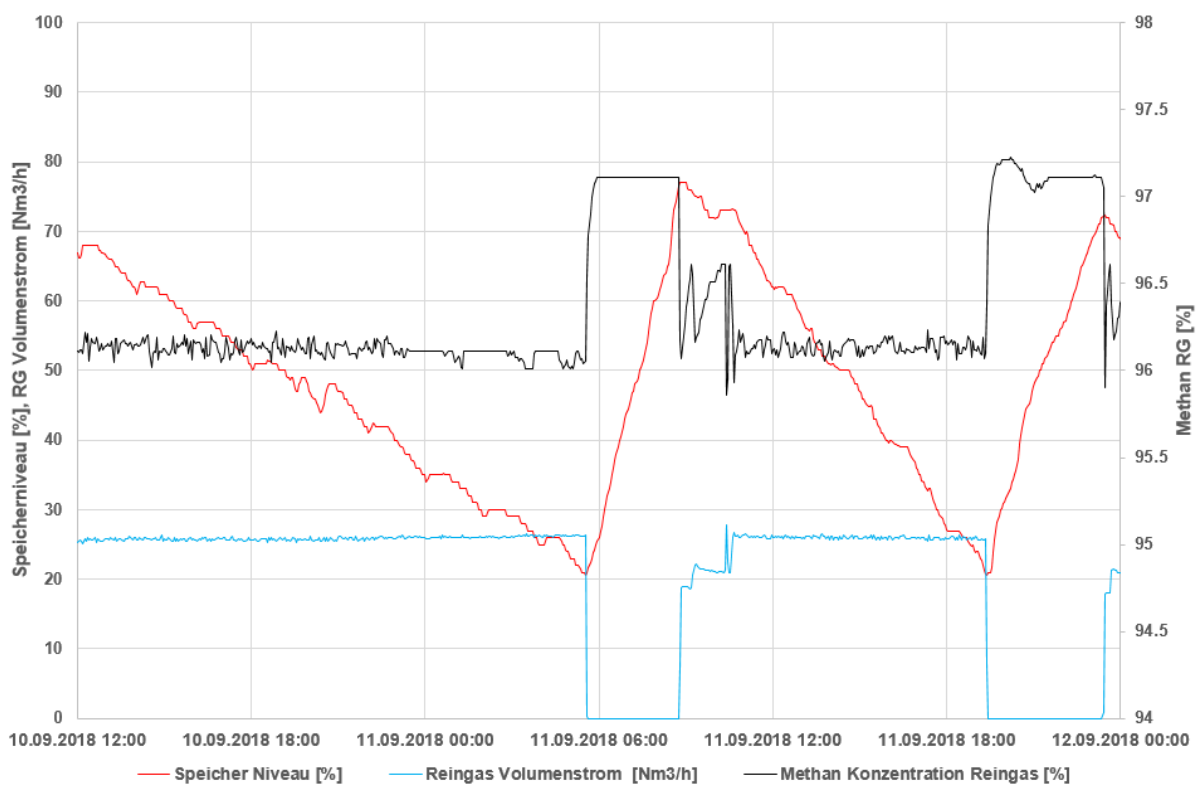


Abbildung 8: Darstellung vom Batch-Betrieb mit dem Reingasvolumenstrom, der Methankonzentration und dem Füllstand des Speichers.

Fackelverluste

Die Umstellung der Klärgasnutzung vom Blockheizkraftwerk zur Biogasaufbereitungsanlage hat dazu geführt, dass die im Klärgas enthaltene Energie ganzjährig mit einem hohen Ausnutzungsgrad genutzt werden kann (keine BHKW-Wärmeüberschüsse im Sommer). Bei der Biogasaufbereitungsanlage reduziert sich der Ausnutzungsgrad durch das Abfackeln von Biogas über die Gasfackel. Diese Fackelverluste resultieren sofern die Anlage bei gefüllten Gasspeicher ausser Betrieb ist (z.B. bei einer Anlagenwartung oder Störung).

In der untenstehenden Abbildung 9 sind die Fackelverlust seit November 2017 dargestellt. Im Normalfall liegen diese unterhalb von 5%. Die beiden Ausreisser im Verlauf des vergangenen Jahres können wie folgt begründet werden:



- 1) Im Dezember 2017 war die Anlage für drei Tage ausser Betrieb, da der Frequenz-Umformer (FU) des Verdichters defekt war.
- 2) Im August 18 war die Anlage während ca. vier Tagen ausser Betrieb, da der FU des Verdichters erneut defekt war.

Monat	Rohgas Produktion [Nm ³]	Rohgasfluss [Nm ³ /h]	Biogas Produktion [Nm ³]	Rohgas über Fackel [Nm ³]	
November 2017	23'531	32.7	15'708	6	0%
Dezember 2017	22'546	30.3	15'399	2'248 1)	14.5%
Januar 2018	22'908	30.8	15'245	541	3.5%
Februar 2018	21'171	31.5	15'488	9	0%
März 2018	27'473	36.9	19'037	928	4.9%
April 2018	27'170	37.7	18'586	923	5.0%
Mai 2018	28'003	37.7	18'698	1'077	5.8%
Juni 2018	26'433	36.7	17'777	237	1.3%
Juli 2018	24'485	32.9	16'258	1'088	4.4%
August 2018	20'175	27.1	13'335	4'767 2)	23.6%
September 2018	22'736	31.6	15'259	1'056	4.6%
Oktober 2018	23'275	31.3	16'416	115	0.5%

Abbildung 9: Rohgasverluste über die Gasfackel.

Methankonzentration und «Restmethan» gemäss SVGW

Die Methankonzentration im Offgas wurde im Rahmen der Abnahme durch das Technische Inspektorat des Gasfaches (TISG/SVGW) mit 1.46% gemessen. Die aktuellen Messungen im Offgas-Volumenstrom zeigen grösstenteils Methankonzentrationen zwischen 0.4 und 2.5 %.

Als «Restmethan» im Sinne der SVGW-Richtlinie G13 wird die Methanmenge bezeichnet, die während des Aufbereitungs- und Einspeiseprozesses in die Atmosphäre entweicht («Methanschluß»). Ausgangswert für die Angabe ist das Methan im Rohgas, das in die Aufbereitungsanlage eintritt. Die Bezeichnung «Restmethan» bezieht sich ausschliesslich auf Aufbereitungs- und Einspeiseanlagen. Der Methanausstoss aus den der Aufbereitung vor- oder nachgelagerten Prozessen wird als «Methan-Emission» bezeichnet.

Zur Berechnung des Restmethangehaltes im Sinne der G13 gilt es, die im Offgas gemessene CH₄-Konzentration auf den Rohgasvolumenstrom zu beziehen. Das Verhältnis der Volumenströme von Roh- und Offgas verhalten sich wie der Methan- zum CO₂-Anteil im Rohgas, typischerweise mit einem Anteil vom 65% CH₄ und 35% CO₂. Für eine Offgas-Methankonzentration von 1% beträgt der «Restmethan»-Wert demnach etwa 0,35%. Die «Restmethan»-Werte der Biogasaufbereitungsanlage Reinach liegen demnach grösstenteils zwischen 0.14 und 0.9%.

Spezifischer Stromverbrauch

Der gemittelte spezifische Stromverbrauch für die gesamte Anlage inklusive aller Nebenaggregate liegt aktuell bei ca. 0.37 kWh/Nm³ Rohgas oder ca. 0,56 kWh/Nm³ Reingas. Ein Auszug der Messwerte vom 31.8. bis 31.10.2018 sind in Abbildung 10 dargestellt.

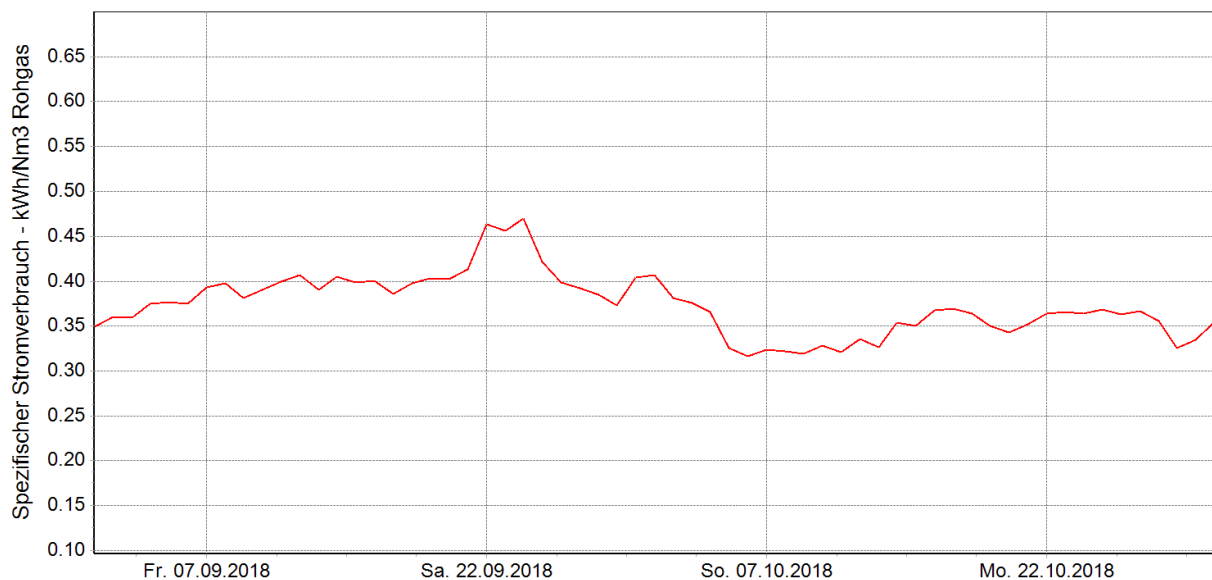


Abbildung 10: Spezifischer Stromverbrauch der Biogasaufbereitungsanlage Reinach zwischen dem 31.8 bis 31.10.2018.

Viele Faktoren beeinflussen den spezifischen Stromverbrauch der Aufbereitungsanlage. Nach heutigen Erkenntnissen können zwei Schlüsselfaktoren hervorgehoben werden:

- **Die Aussenlufttemperaturen (externen Einfluss):**
Für optimale Leistungen benötigen die Membranen Betriebstemperaturen im Bereich von 40°C. Im Batch-Betrieb muss das Rohgas eine bestimmte Zeit in der Anlage zirkulieren bis die Betriebstemperatur erreicht ist. Die Zirkulation im Leerlauf (ohne Einspeisung von Reingas ins Netz) erfordert dennoch Verdichterleistung bzw. einen Stromverbrauch. Im Winter dauert diese Aufwärmphase aufgrund der tiefen Aussenlufttemperaturen deutlich länger als im Sommer. Der spezifische Stromverbrauch ist daher im Winter tendenziell höher.
- **Die Rezirkulationsrate (betriebliche Optimierung):**
Je höher die Rezirkulationsrate, desto mehr Gas muss im Verdichter zwei Mal komprimiert werden, bevor dieses im Rein- oder Offgasstrom die Aufbereitungsanlage verlässt. Die Rezirkulationsrate ist eine Resultierende aus verschiedensten Parametern wie Gasvolumenstrom, Druckdifferenz, Betriebstemperatur und Anforderungen an die Rein- und Offgasqualität. Derzeit werden im Betrieb 30-50% Rezyklat wieder dem Verdichter zugeführt.



Energie- und Massenbilanz

In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die Stoff- bzw. Energieflüsse als Sankey-Diagramme dargestellt. Die Sankey-Diagramme beinhalten das System der Biogasaufbereitung. Vor- und nachgelagerte Prozesse, wie z.B. die Herstellung vom Rohgas, werden dabei nicht betrachtet.

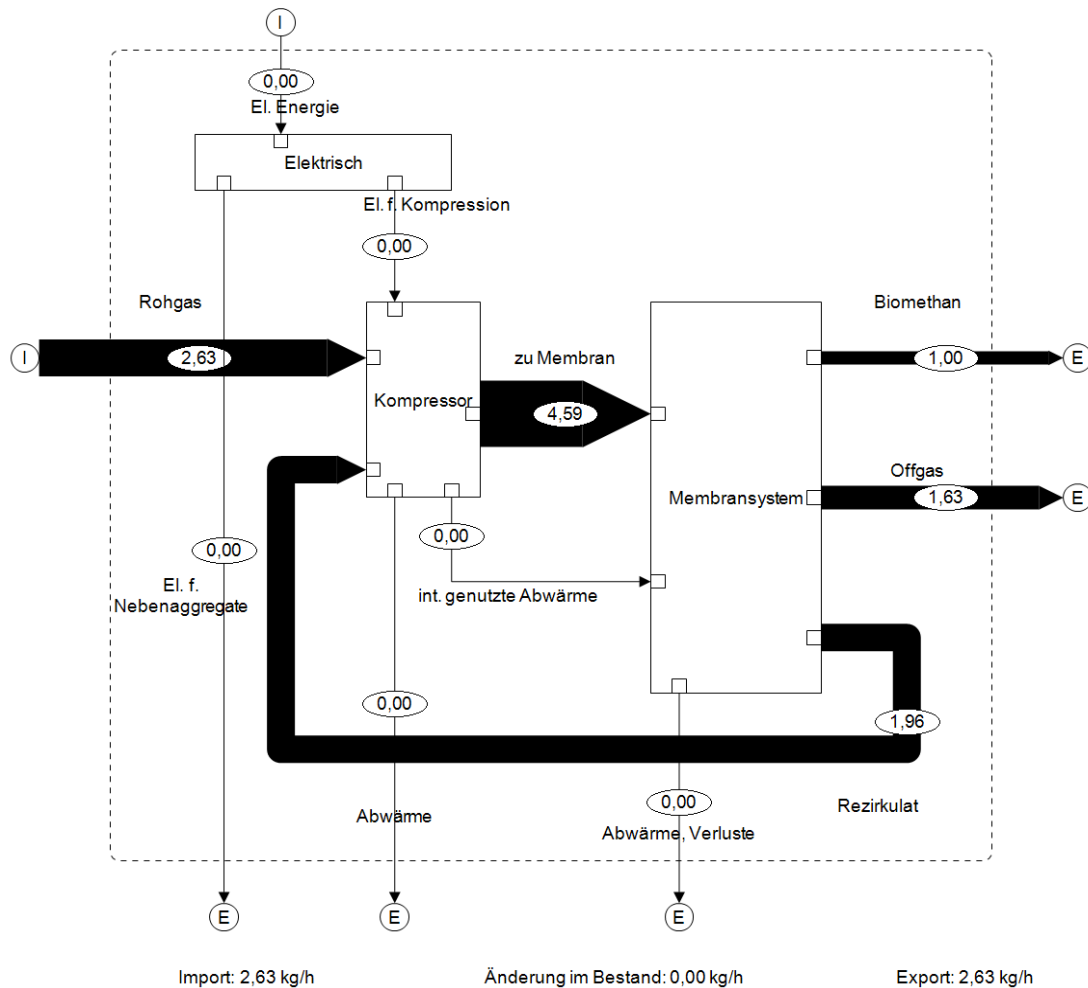


Abbildung 11: Stoff-Flüsse [kg/h] im Sankey-Diagramm dargestellt für eine Biomethan-Produktion von 1kg/h.

Die Abbildung 11 zeigt eindrücklich den grossen Gewichtsanteil vom CO₂ im Verhältnis zum leichten Methan. Für 1 kg Biomethan werden 2.63 kg Rohgas verarbeitet. Dieser Effekt kommt insbesondere auch bei der Rezirkulation und der Verdichtung im Kompressor zum Tragen.

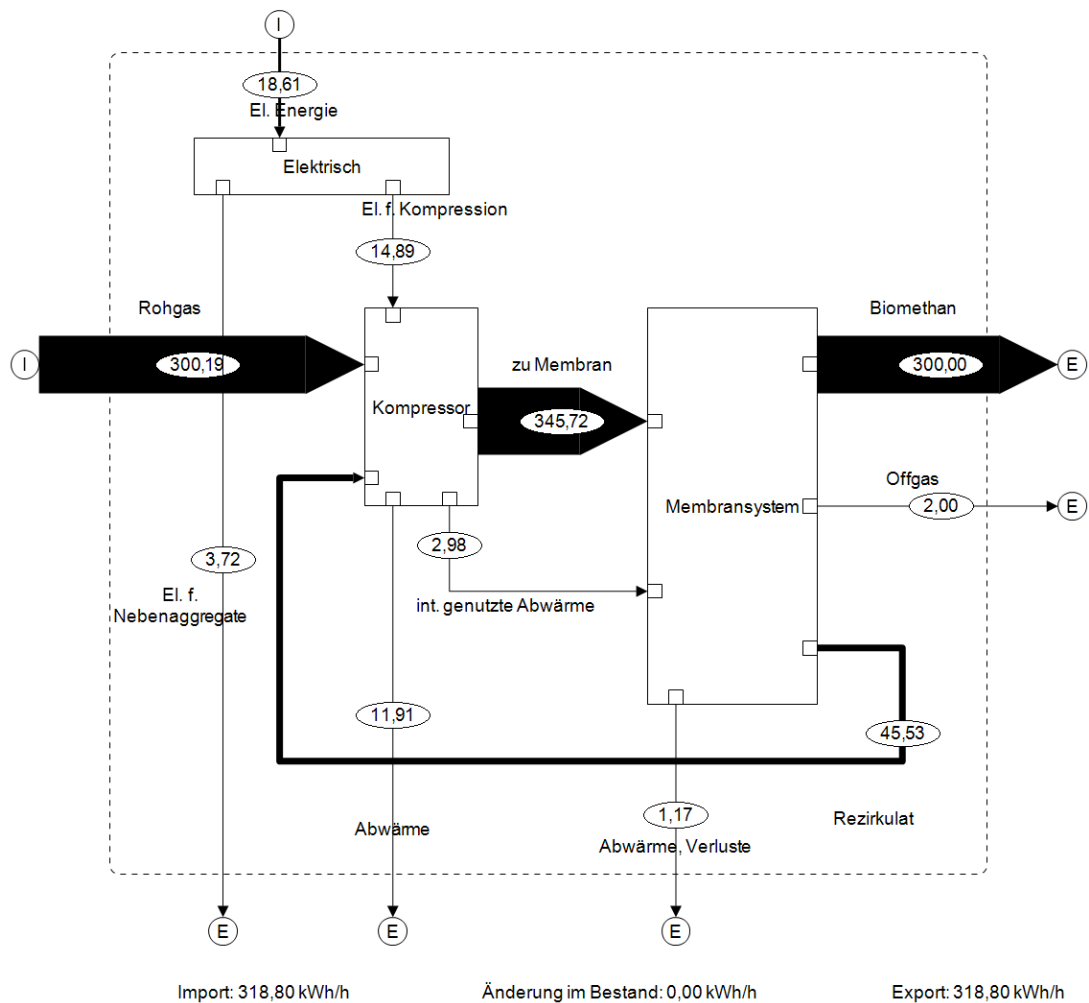


Abbildung 12: Energie-Flüsse [kWh/h] im Sankey-Diagramm dargestellt für eine Biomethan-Produktion von 300kW.

Die Abbildung 12 zeigt eindrücklich den Grund für die Abtrennung des CO₂ auf: die Energie des Rohgases steckt alleine im Methan. Der elektrische Aufwand zur Abtrennung vom CO₂ ist relativ gering.

Dies zeigt auch die untenstehende Wirkungsgradberechnung:

$$\text{Generell gilt: Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{Nutz-Energie Aus}}{\text{Sämtliche Energie Ein}}$$

Für die Biogasaufbereitung in der ARA Reinach, bei einer Gasproduktion von 300 kWchem.:

$$\text{Wirkungsgrad Biogasaufbereitung} = \eta = \frac{(\text{Biomethan aus Aufbereitung})}{(\text{Elektrische Energie} + \text{Energie CH}_4 \text{ aus Rohgas})}$$

$$\text{Wirkungsgrad Biogasaufbereitung} = \eta = \frac{300 \text{ kWh}}{(18,61 + 300,19) \text{ kWh}} = 94,1\%$$



Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Kennzahlen zur Wirtschaftlichkeit der Biogasaufbereitungsanlage Reinach zusammengefasst.

Tabelle 3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (ohne Berücksichtigung von Fördergeldern)

Anlagenkapazität	2'000'000 kWh/a	
entspricht eingespeister Energie als Reingas		
Investitionskosten,	CHF 1'100'000	
inkl. Gasanschluss an 5bar-Erdgasleitung (ca. 300m)		
Kapitalkosten	100'000 CHF/a	
Betriebskosten, inkl. Einkauf Rohgas	200'000 CHF/a	
Jahreskosten	300'000 CHF/a	
Verkauf Energie (inkl. CO ₂ -Abgabe)	80'000 CHF/a	4.00 Rp./kWh
Verkauf Biogas-Zertifikat	220'000 CHF/a	11.00 Rp./kWh
Jahresertrag	300'000 CHF/a	

Die Kennzahlen beruhen auf einer statischen Betrachtung, welche die sich verändernden Rahmenbedingungen im Verlaufe der Betriebsphase nicht berücksichtigt. In Tabelle 3 sind z.B. die tiefen Produktionsmengen in den ersten Betriebsjahren nicht berücksichtigt.

Die wichtigste Kenngrösse bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Biogasaufbereitungsanlage ist der resultierende Biogas-Zertifikatspreis. Dieser hängt direkt vom Erlös aus dem Energieverkauf und der Höhe der CO₂-Abgabe ab. Bei gleichbleibenden Jahreskosten resultiert ein tieferer Zertifikatspreis je höher der Erlös aus dem Energieverkauf. Steigt die CO₂-Abgabe in Zukunft an, kann der Biogas-Zertifikatspreis gesenkt werden.

Diskussion

Generelle Erkenntnisse

Die Projektentwicklung, die Inbetriebnahme der Anlage im Mai 2015 und die ersten Monate in Betrieb verliefen bereits überraschend erfreulich und mit wenigen Störungen. Die Störungen hatten insbesondere mit dem Wechsel von wärmeren zur kühleren Aussenlufttemperaturen zu tun, was Einfluss auf die Gasqualität haben kann. Mit steuerungstechnischen Anpassungen konnte diesen Störmeldungen kurzfristig entgegengewirkt werden.

Im Jahr 2016 waren ein Membran-Wechsel (gebrochene Hohlfaser) und der Ersatz einer fehlerhaften Rückschlagklappe erforderlich, um die ursprüngliche Anlageneffizienz wieder herzustellen. Die kontinuierlich ansteigende Klärgasmenge von Seiten ARA resultiert in immer kürzer werdenden Stillstandzeiten der Anlage (Batch-Betrieb).

Die praktisch tägliche Betriebsüberwachung per Fernwartung zeigt sich vorteilhaft, dauert nur wenige Minuten und hilft für eine schnellere Diagnose bei Abweichungen. Eine periodische Anlagenbegehung (z.B. 1 x pro Monat) ist unumgänglich, um allfällige Störungen (z.B. kleine Leckagen, Vibrationen) festzustellen und zu berichtigen.

Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen hatte Apex im Dezember 2017 den Betrieb der Anlage mit einer fixen Druckeinstellung auf einen Betrieb mit variablem Antrieb für die Betriebsdrucksteuerung der Membranen umgestellt. Diese Umstellung erlaubt einen optimierten Betrieb, abgestimmt auf die geforderte Methanqualität für die Einspeisung. Diese Massnahme bzw. die daraus gewonnene Erkenntnis wird in der Folge detaillierter diskutiert.

Betriebsdruckregelung für konstante Produktgasqualität

Die Produktgasqualität der Rohgasaufbereitung ist stark vom Betriebsdruck der Membranen abhängig. Dabei kann bei der Biogasaufbereitungsanlage Reinach folgende Faustregel angewandt werden:

Erhöhung vom Betriebsdruck um 1 bar erhöht die Produktgasqualität um 1 Prozentpunkt.

Die Produktgasqualität ist ebenfalls abhängig von weiteren Parametern wie z.B. der Gasqualität des dem Verdichter zugeführten Gasgemisches aus Rohgas und Rezyklat, dem Volumenstrom, den Gas-temperaturen oder dem Gegendruck.

Bis Dezember 2017 wurde die Anlage mit einem konstanten Betriebsdruck gefahren. Diese Betriebsweise führt z.T. zu erhöhten Produktgasqualitäten (z.B. 96.8% statt 96.0%), leicht grösseren Rezirkulationsmengen und somit etwas geringerer Aufbereitungs-Kapazität, wobei ein grösserer spezifischer Stromverbrauch resultierte.

Seit Dezember 2017 ist anstelle des manuell eingestellten Druckkonstanthalte-Ventils ein solches mit elektrischem Stellantrieb eingebaut. Die Steuerung überwacht, sobald nach dem Aufstarten der Normalbetrieb erreicht ist, kontinuierlich die Produktgasqualität und löst ein Verringern oder Erhöhen des Betriebsdrucks aus, um dem Zielwert von 96.1 Vol% CH₄ zu folgen.

Diese Druckregelung und die Steuerung funktionieren sehr gut. Das Stabilisieren der Produktgasqualität bedeutet gleichzeitig auch stabilere Volumenströme (Produktgas, Rezirkulat, Offgas) und so insgesamt stabilere Betriebszustände in der dreistufigen Verschaltung.



Durch den variablen Betriebsdruck in Abhängigkeit der Einspeisequalität kann der durchschnittliche Betriebsdruck um ca. 0.6 bar gegenüber dem fix eingestellte Betriebsdruck reduziert werden. Abschätzung der Auswirkungen der Betriebsdruckreduktion um ca. 0.6 bar:

- Reduktion des Energieaufwands durch den tieferen Betriebsdruck um ca. 3%
- Geringere Rezirkulationsrate um ca. 10% dadurch:
 - Etwas grössere Aufbereitungskapazität der Anlage (+ 3%)
 - Etwas geringerer Wartungsaufwand durch weniger Betriebsstunden (- 7%) bei 360'000 Nm³/a und Stromkosten von 0.20 CHF/kWh

Abbildung 13 zeigt die aktuelle Situation mit eingebautem Druckregler und Abbildung 14 eine Testreihe aus einer Vergleichsanlage (in Schönenwerd) ohne Betriebsdruckregelung, welche die starke Abhängigkeit von Druck und Produktgas illustriert.

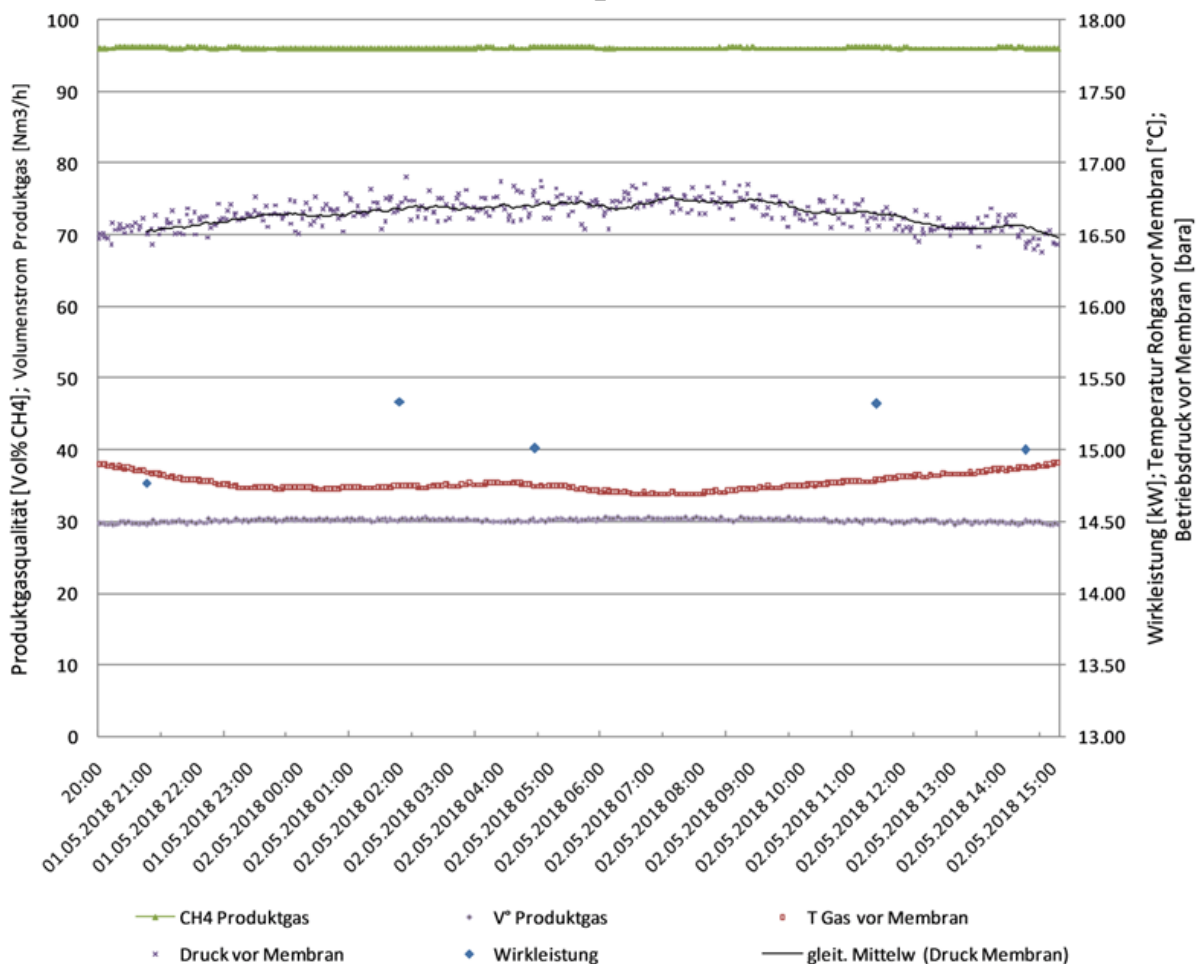


Abbildung 13: Messdaten 1./ 2. Mai 2018. Der Betriebsdruck wird mit ändernder Produktgasqualität nachgeregelt, sodass der Einfluss der Temperatur ausgeglichen wird und konstante Betriebsbedingungen erreicht werden.

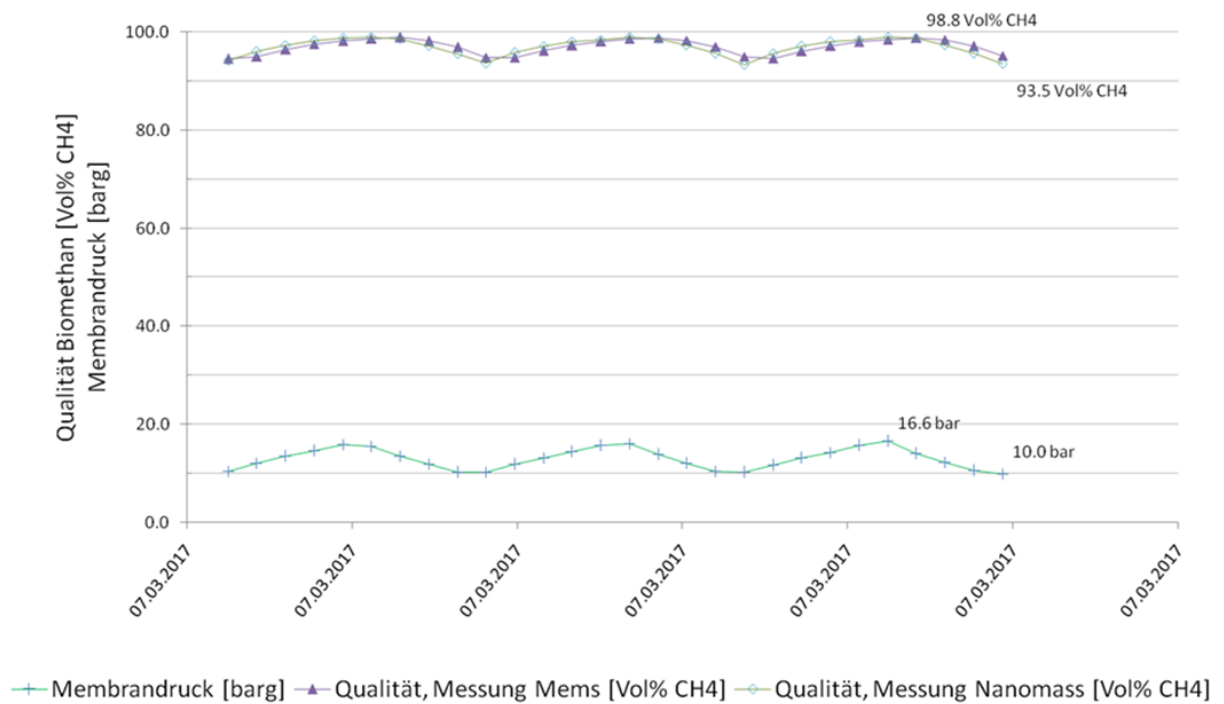


Abbildung 14: Stark variierende Produktgasqualität aufgrund von Druckänderungen. Testreihe aus vergleichbarer Anlage in Schönenwerd (Duttwiler, Oester 2017).



Detailbetrachtung Druckregelung

Abbildung 15 zeigt den Einfluss der Druckregelung am 1. Mai 2018: Mit sinkenden Rohgas-Temperaturen (Gastemperatur aus Kompressor) sinkt auch die Produktgasqualität. Mit etwas Verzögerung erhöht die Druckregelung den Druck vor der Membran und die Produktgasqualität steigt wieder an.

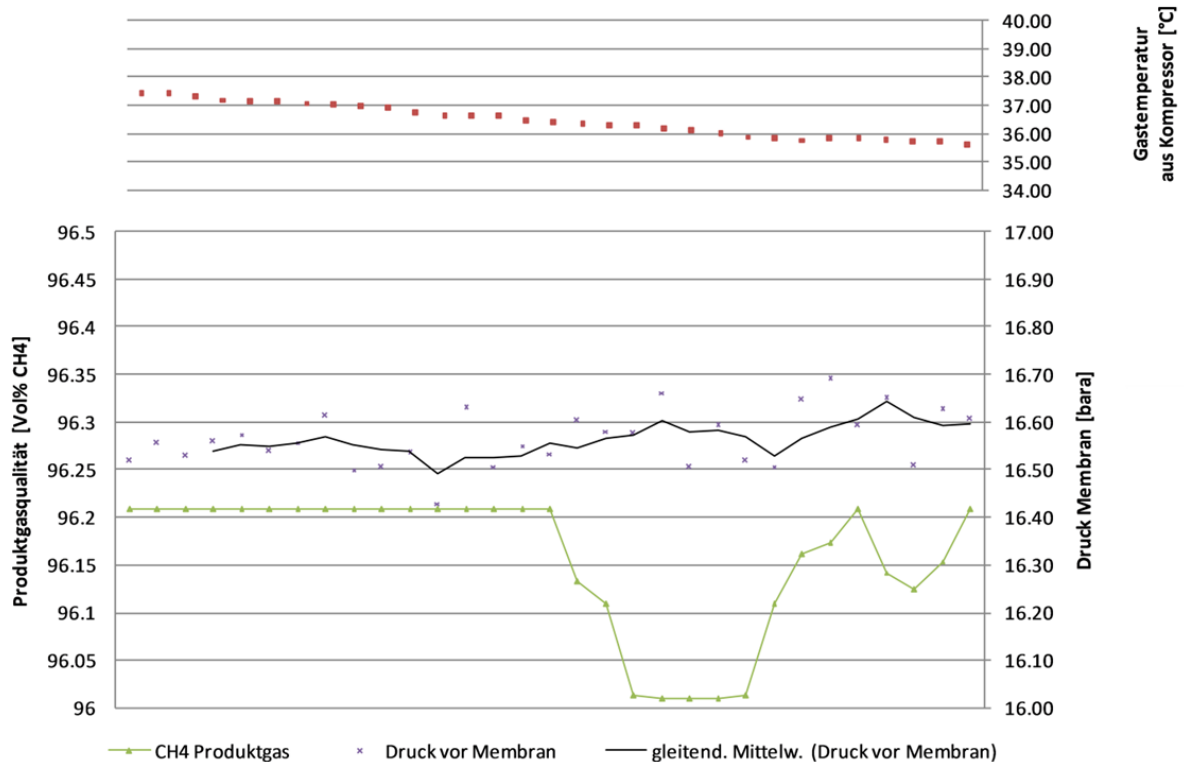


Abbildung 15: Detailbetrachtung Druckregelung aufgrund von sinkender Temperatur.

Simulationsprogramm als Hilfsmittel für die Betriebsbeurteilung

Das Simulationsprogramm der Evonik Fibres GmbH eignet sich zur Auslegung der Membranen sowie zur Nachstellung und Überprüfung von Betriebszuständen. Das Verhalten der Membran und das Zusammenspiel lassen sich mit der Simulation gut nachvollziehen. So hilft die Simulation, den Membran-Prozess zu verstehen und den Betrieb zu optimieren. Die Simulation alleine kann aber nur Tendenzen aufzeigen, da die tatsächliche Performance einer Membrane sehr vom aktuellen Zustand der Membrane abhängt (etwaige Verschmutzung, Alterung) und die Membranstufen sich in der 3-stufigen Verschaltung gegenseitig beeinflussen.

Hier wurden für diesen Bericht auszugsweise zwei Betriebspunkte vom 1. bzw. 2. Mai 2018 nachgestellt und mit Messwerten verglichen. Mit der Simulation lässt sich diese Abhängigkeit bestätigen und auch aufzeigen, was ohne Regelung passieren würde:

Betriebszustand 1 vom 1. Mai, 20:57 (siehe Abbildung 16): Die Temperatur vor der Membran beträgt ca. 33 °C (gemessen nach Kompressor 36.9°C). Der Druckregler hält den Druck in der Membran auf 17.5 bar. Die Produktgasqualität liegt somit bei 96,2 Vol.% CH₄.

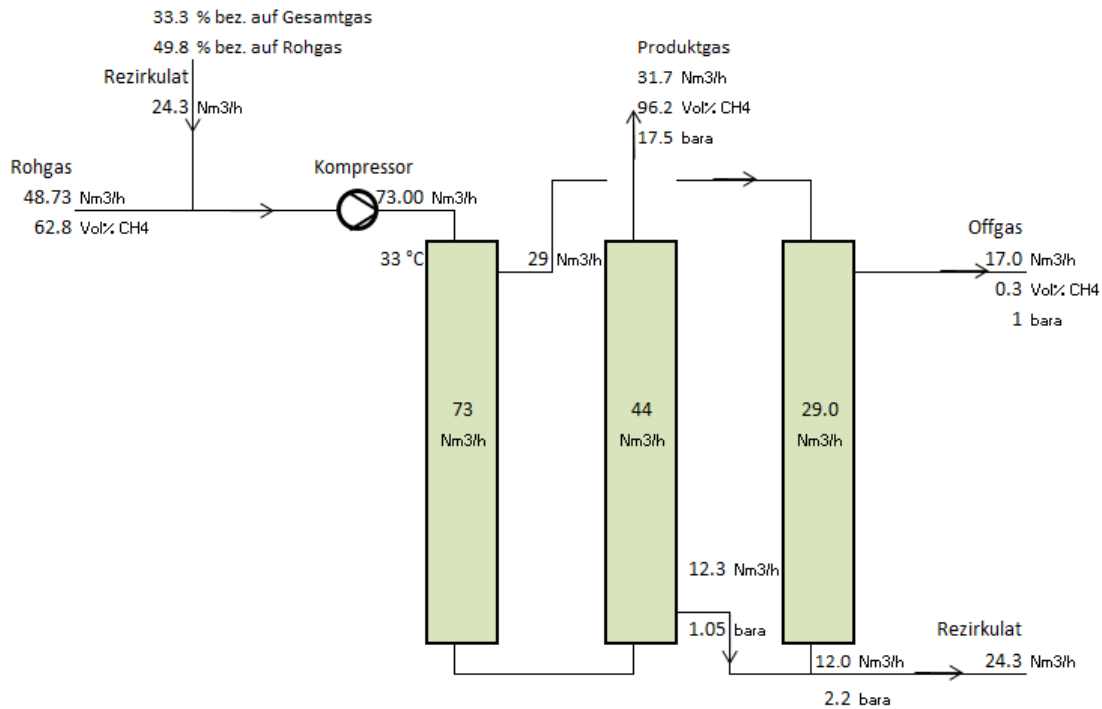


Abbildung 16: Fließschema des Membran-Prozesses mit eingearbeiteten Simulationsdaten für den nachgestellten Betriebszustand bei einer Rohgas-Temperatur von 33°C und 17.5 bara.

Betriebszustandsänderung: Temperatur sinkt um 2 °C.

Ohne Nachregelung des Drucks sinkt die Produktgasqualität. Die Simulation zeigt bei Abnahme der Temperatur um 2°C eine Abnahme der Produktgasqualität um 0.2 Vol.% CH₄. → Der Druckregler reagiert und erhöht den Druck:

Betriebszustand 2 vom 2. Mai, 04:42 (siehe Abbildung 17): Die Temperatur vor der Membran ist 2° C tiefer, ca. 31 °C (gemessen nach Kompressor 35,0°C). Der Druckregler regelt nach auf 17.8 bara. Die Produktgasqualität geht wiederum auf 96.2 Vol.% CH₄.

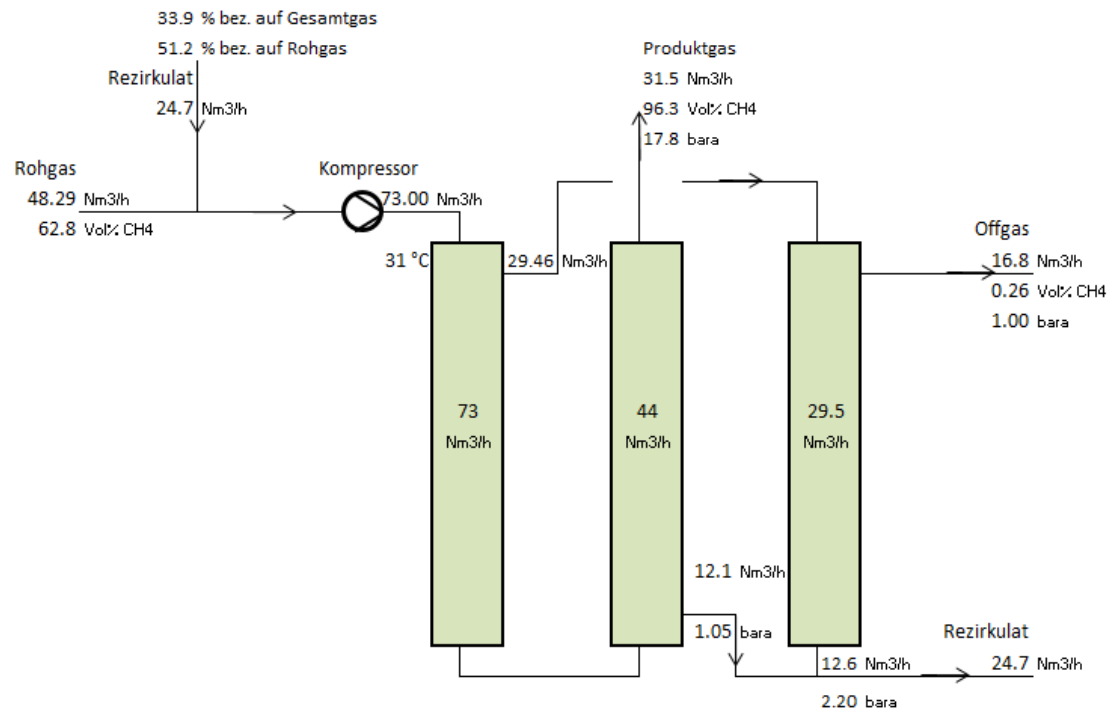


Abbildung 17: Fließschema des Membran-Prozesses mit eingearbeiteten Simulationsdaten für den nachgestellten Betriebszustand bei einer Rohgas-Temperatur von 31°C und 17.8 bara.



Ausblick, weitere Schritte

Die Biogasaufbereitungsanlage bei der ARA Reinach ist seit dem Mai 2015 im Betrieb. Der Ersatz der zwei alten Faultürme durch einen grösseren Faulturm im 2017 hat die Produktion des Klärgases erhöht und dazu geführt, dass die Anlagekapazität seit Anfang 2018 nahezu ausgelastet ist. Auf Anfangs 2019 ist der Anschluss weiterer Gemeinden an die ARA Reinach geplant, was zu einer zusätzlichen Steigerung der Klärgasmenge um ca. 20% führen soll.

Damit das unerwünschte bzw. unwirtschaftliche Abfackeln des Klärgases verhindert wird, ist ein Ausbau der Aufbereitungsanlage geprüft und vorbereitet worden. Durch den Austausch des bestehenden Kolbenkompressors durch einen grösseren Schraubenverdichter und Erhöhung der Anzahl Membranen wird die Anlagekapazität im 2019 auf bis zu 70 Nm³/h erhöht.

Das Projekt umfasst konkret die folgenden Komponenten:

- Erhöhung der Klärgas-Kapazität von 38...45 Nm³/h auf 70 Nm³/h
- Wechsel vom ölfreien Kolbenverdichter zu einem ölgeschmierten Schraubenverdichter
- Einbau von drei zusätzlichen Membranen (Evonik) zur Kapazitätserhöhung (geringerer Betriebsdruck des Schraubenverdichters gegenüber dem Kolbenverdichter)
- Paralleler Einsatz von zwei neuartigen Methansensoren für die Produkt- und Offgas-Messungen zu Vergleichszwecken mit den installierten Gasanalysegeräten. Diese Gassensoren zeichnen sich durch einen «wartungsärmeren» Betrieb aus (kaum Wartung nötig, Verzicht auf Kalibriergas in der Anlage) und können direkt im Ex-Raum installiert werden.

Der Platz für den Ausbau ist ohne grosse bauliche Anpassungen innerhalb des bestehenden Containers vorhanden.



Schlussfolgerungen

Der Anlagenbetrieb hat von Anfang an erfreulich funktioniert und die bisher durchgeführten Massnahmen halfen, die Effizienz der Anlage jeweils zu steigern. Der Batch-Betrieb hat sich bewährt. Die anfallende Rohgasmenge konnte fast vollständig aufbereitet werden und die Notfackel war kaum je in Betrieb. Die notwendigen Wartungs- und Kontrollarbeiten entsprachen den Erwartungen und beeinträchtigten den Betrieb der Anlage bisher in keiner Weise. Die Überwachung der Anlage ist wichtig, um einen effizienten und möglichst störungsfreien Betrieb aufrechtzuerhalten.

Mit dem damaligen Entscheid zur Gaseinspeisung sind heute alle Projektbeteiligten sehr zufrieden.

Der Abwasserverband Oberwynental versorgt seine Gebäulichkeiten und den Faulturm mit Wärme aus dem gereinigten Abwasser. Die Kapazitätserhöhung durch die Sanierung bzw. die Mehrproduktion an Rohgas führen nicht zu einem erhöhten Energieverlust im Sommer. Dies gilt auch für den erwarteten Zuwachs durch den Anschluss weiterer Gemeinden im 2019.

Die Apex AG konnte mit der Biogasaufbereitungsanlage in Reinach eine erste kommerzielle Anlage bauen und gemeinsam mit der Eniwa AG erfolgreich betreiben. Die gewonnenen Erfahrungen konnte Apex bereits in einem Folgeprojekt mit diversen Optimierungen (insbesondere hinsichtlich Platzbedarf und Messtechnik) umsetzen.

Diese Optimierungen helfen mit, die Wirtschaftlichkeit der Aufbereitungsanlagen, insbesondere für kleinere Rohgas Mengen zu verbessern und damit das vorhandene Biogas-Potenzial zu erschliessen.

Die Eniwa hat mit diesem Projekt die Eigenproduktion an Biogas erhöht und damit ein Teilziel für die weitere Ökologisierung der Gasversorgung erreicht. Die Zusammenarbeit mit dem Abwasserverband und Apex hat aus Sicht der Eniwa hervorragend funktioniert.

Die finanzielle Unterstützung des Bundesamtes für Energie hat mitentscheidend mitgeholfen, das Projekt und die Betriebsanalyse in dieser Form durchzuführen. Der Beitrag hat mitunter dazu geführt, dass durch diverse Anlagenoptimierungen die Wirtschaftlichkeit auch bei der Aufbereitung von kleineren Biogasmengen erreicht werden kann.

In diesem Sinne dankt die Eniwa allen Beteiligten für die Unterstützung und Begleitung in den vergangenen rund 4 Jahren.

Referenzen

Seit Projektbeginn sind u.a. folgende Berichte und Veröffentlichungen erfolgt, in denen die BlueFEED-Anlage in Reinach erwähnt und beschrieben wurde.

- März 2015 "Kleine Biogas-Aufbereitungsanlagen für Tankstellen und für Netzeinspeisung", U. Oester, S. Duttwiler, Aqua und Gas 3/2015, S. 52-28
- 23.04.2015 Vortrag "Blue BONSAI - Biogasaufbereitung für kleine Produktionsmengen", S. Duttwiler an der Tagung Biomasseforschung in der Schweiz 2015 (BFE), Ittigen
- 30.09.2015 Vortrag "Blue BONSAI: Biogas Upgrading For Small And Mid-Size Fleet, U. Oester (S. Duttwiler), Konferenz "Biomethane as fuel", Evonik Fibres, Österreichische Botschaft Berlin (DE)
- 14.10.2015 Einweihung Biogasanlage Reinach, IBAarau Wärme AG, mit Ansprache und Power-Point-Präsentation U. Oester, Besichtigung Aufbereitungsanlage
- 27.10.2015 Vortrag "Blue BONSAI, biogas-upgrading with filling station smaller 50 Nm³/h", S. Duttwiler (U. Oester), Konferenz "Progress in Biogas Mobility", Schwäbisch Hall (DE)
- 13.11.2015 Plakat-Ausstellung an Werkschau AEE, S. Duttwiler, Nationaler Kongress der erneuerbaren Energien und Energieeffizienz 2015, Basel
- 13.04.2016, Vortrag "Blue BONSAI/ Blue FEED - Biogasaufbereitung für kleine bis mittlere Flotten", U. Oester, anlässlich Biogasforum Bayern, Freising (DE).
- 3.04.2016, Vortrag "Blue BONSAI/ Blue FEED - Biogasaufbereitung für kleine bis mittlere Flotten", U. Oester, anlässlich Biogasforum Bayern, Freising (DE).
- Dez. 2016; Fachartikel Aqua & Gas «Klärgasaufbereitung mit Netzeinspeisung», Ch. Müller, U. Oester, S. Duttwiler
- 4. Jan. 2017: Vortrag: „BlueBONSAI 2.0: die zweite Generation der kleinen Biomethan-Tankstelle – Stand und Perspektiven“, Schwäbische Bauernschule, Bad Waldsee, Deutschland
- 12. Feb. 2017: Vortrag: „BlueBONSAI 2.0: die zweite Generation der kleinen Biomethan-Tankstelle – Stand und Perspektiven“, Universität Hohenheim, Deutschland
- 07.12.2017, "Du biogaz au biométhane", U. Oester, S. Duttwiler, Vortrag an Seminar von Biomasse Suisse, Bussigny
- 01.02.2018, "Entwicklung von kleinen Biogas-Aufbereitungsanlagen", U. Oester, S. Duttwiler, Vortrag Messe Biogas Offenburg