

BEW Energieforschung

Forschungsprogramm: Akkumulatoren/Brennstoffzellen
Projekt: Nr.19428



EF-Nr. 195125

Vorstudie

Machbarkeitsstudie über die

Industrielle Anwendung von Brennstoffzellen zur Verwertung von Biogas aus Abfallvergärungsanlagen

Schlussbericht

31.7.97

Verfasser: Probag Umwelttechnik AG
Rütistr.3
5400 Baden

Auftraggeber: BEW Bundesamt für Energiewirtschaft
3003 Bern

Inhaltsverzeichnis

•	Anhangverzeichnis	2
•	Dank	3
•	Projektbeteiligte	4
•	Abkürzungen	5
1.	Zusammenfassung	6
2.	Einführung, Ausgangslage	9
2.1	Ausgangslage	9
2.2	Potentialbetrachtung von Brennstoffzellenstrom aus Biogas	13
2.3	Abgrenzung des Projektes zu bestehenden Studien	14
3.	Fragestellung, Zielsetzung der Vorstudie	16
3.1	Realisierung P+D-Anlage	16
3.2	Machbarkeitsstudie Gasaufbereitungsanlage	16
3.3	Zusammenfassung Ziele	16
4.	Vorgehen	17
4.1	Phasen des Gesamtprojektes	17
4.2	Arbeitsschritte Phase I, Vorstudie	17
5.	IST-Gas-Bestimmung	18
5.1	Zweck der IST-Gas-Bestimmung	18
5.2	Auswahl der Vergärungsanlage für die IST-Gas-Bestimmung	18
5.3	Vorgehen bei der IST-Gas-Bestimmung	19
5.4	Diskussion der Analysenresultate	20
6.	SOLL-Gas-Bestimmung	25
7.	Definieren der Gasaufbereitungsanlage	26
8.	Begutachtung der Resultate	27
8.1	IST-Gas-Bestimmung	27
8.2	SOLL-Gas-Bestimmung	27
8.3	Definieren der Gasaufbereitungsanlage	27
9.	Schlussfolgerungen, Empfehlungen	29

ANHANG

Anhangverzeichnis

- A1** • Abstract Study Report
 • Kurzfassung Studienbericht
- A2** Kurzspezifikationen Vergärungsanlagen
- A3** • Tabelle IST-Gas-Bestimmung
 • Diagramme zum saisonalen Verlauf der Gaszusammensetzung
- A4** Tabelle SOLL-Gas-Bestimmung / Pflichtenheft Gasaufbereitungsanlage
- A5** Blockschema Gasaufbereitungsanlage
- A6** Angebot/Anlagenbeschrieb Gasaufbereitungsanlage
- A7** Literatur

Dank

Dank gebührt in erster Linie dem BEW Schweizerisches Bundesamt für Energiewirtschaft, welches durch finanzielle und beratende Unterstützung diese Studie erst ermöglicht hat.

Weiter sei allen Projektpartnern wie auch den externen Experten und Beratern, vorab der SIG Services Industriels de Genève, sowie dem TWI Technikum Winterthur, Abt. für Chemie und Verfahrenstechnik gedankt für ihre bereitwillige Kooperation, und nicht zuletzt der Firma Carbotech, welche sich bemüht hat um die Auslegung einer einerseits technisch sicheren, anderseits aber kostenmässig auch tragbaren Gasaufbereitungsanlage.

Den an dieser Studie beteiligten Vergärungsanlagen, vorab der Anlage Allmig/Baar, sei gedankt für ihre Bereitschaft, Biogasproben aus der laufenden Produktion zur Analyse zur Verfügung zu stellen.

Probag Umwelttechnik AG
Baden, Juli 97

An dieser Studie haben mitgewirkt:

als Projektpartner:

Federführung, Projektkoordination,
Studienbericht:

Probag Umwelttechnik AG
Rütistrasse 3, 5400 Baden
Tel. 056/222 08 80, FAX 056/222 08 85

Projektleitung:
Herbert Schöttl, Masch.Ing.ETH, Projektleiter
Martin Egger, lic.phil.nat., Umwelt-Ing.HTL, Stv.Projektleiter

Studienbericht:
Autor: Herbert Schöttl
Co-Autoren: Martin Egger, Alex Pfirter

Biogaserzeugung allg.:

EREP S.A.
Chemin du Coteau 28, 1123 Aclens
Yves Membrez, Ing.Civil.Dipl.ETS/UTS
Tel. 021/869 98 87, FAX 021/869 97 94

Biogasaufbereitung:
(Gasaufbereitungsanlage)

AFAG
Froburgstrasse 24, 4052 Basel
Christian Widmer, Ing.FH, Arch.FH
Tel. 061/312 66 33, FAX 061/312 66 35

Carbotech GmbH
Franz-Fischer-Weg 61, D-45307 Essen
Klaus Giessler
Tel. 0049/201/172 1937, FAX 0049/201/172 1382

Biogasverwertung:
(Brennstoffzelle)

SIG Services Industriels de Genève
Chemin du Château-Bloch 2, Le Lignon, 1211 Genf
Dr.D.Lan Nguyen, Ing.EPF
Tel. 022/420 76 04, FAX 022/420 94 80

als externer Experte:
(Biogasaufbereitung)

TWI Technikum Winterthur
Abt. für Chemie
Postfach 805, 8401 Winterthur
Dr.Heinz Winzeler, Professor für Verfahrenstechnik
Tel. 052/267 73 25, FAX 052/267 73 68

Vergärungsanlage:

Alfred Müller AG
Vergärungsanlage Allmig
6340 Baar
Heinz Brotschi, Projektleiter
René Büttikofer, Betriebsleiter
Tel. 041/767 02 02, FAX 041/767 02 00

Abkürzungen

BZ	Brennstoffzelle
Ø	Durchschnitt
BB	Bandbreite
ES	Entschwefelungsanlage
LCKW	Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe
ppmv	ppm volume
ppmw	ppm weight
S _{ges}	Schwefel gesamt
S _{rest}	Schwefel Rest
Cl _{ges}	Chlor gesamt
Cl _{org}	Chlor organisch
Cl _{anorg}	Chlor anorganisch

1. Zusammenfassung

Abstract (englisch) und Kurzfassung (deutsch): siehe Anhang 1

Zusammenfassung des Schlussberichtes zur

Vorstudie:

Machbarkeitsstudie über die industrielle Anwendung von Brennstoffzellen zur Verwertung von Biogas aus Abfallvergärungsanlagen

Zur energetischen Verwertung von **gasförmigen Wasserstoffträgern** (insbesondere Erdgas und Biogas) werden heute - in Kleinanlagen bis in den Megawatt-Bereich - in der Regel **motorische WKK** (Wärme-Kraft-Koppelungs)-Anlagen zur Erzeugung von elektrischem Strom und Wärme verwendet. Neben diesen herkömmlichen WKK ist nun - leise, aber im Hintergrund stetig und mit riesigen Erfolgsschritten - im Verlauf der letzten Jahre die **Brennstoffzelle** als neue, chemoelektrische Energiewandlungstechnik von der Labor-, Forschungs- oder Nischentechnologie für einige Anwendungsbereiche bereits zur praktikierbaren Energietechnik mit **industrieller Marktreife** herangewachsen.

So steht etwa bei den städtischen Werken von Genf, **SIG Services Industriels de Genève**, seit 1993 eine P+D-Brennstoffzelle mit **200 kW** elektr. Leistung in Betrieb, welche städtisches **Erdgas** verstromt und die erzeugte elektrische Energie ins öffentliche Stromnetz einspeist.

Die Genfer "GAZEL-Zelle", so ihr Name, ist eine in vergleichsweise bereits grosser Stückzahl (>100) hergestellte und weltweit installierte Brennstoffzelle des Herstellers **ONSI/USA**. Es ist dies die einzige Zelle, die heute in diesem Leistungsbereich auf dem Markt ist.

Brennstoffzellen weisen folgende **Vorteile** gegenüber motorischen WKK auf: hoher elektrischer **Wirkungsgrad** (in Zukunft bis +100%, heute bis >50%), praktisch **emissionsloser** Betrieb (Abgabe nur von Wasserdampf und CO₂). Wird die Brennstoffzelle mit **Biogas** betrieben, ist dieses CO₂ zudem noch **klimaneutral**, da aus nachwachsenden Rohstoffen entstanden. Durch Solidstate-Bauweise (keine beweglichen Teile) arbeiten Brennstoffzellen praktisch **geräuschlos** und bei **tieferen Unterhalts- und Betriebskosten**.

Einziger **Nachteil** der Brennstoffzellen ist, dass die **Anschaffungskosten** heute noch 50-100% höher sind als für motorische WKK, und sie daher in der Regel in ökonomischer Hinsicht mit den motorischen WKK noch nicht konkurrieren können.

Mit **Biogas** jedoch - als **erneuerbarer Energieträger** - ist unter günstigen Umständen bereits heute ein **wirtschaftlicher Betrieb** von Brennstoffzellen möglich, da für den damit erzeugten Strom ein rund doppelt so hoher Abnahmepreis bezahlt wird als etwa für Erdgasstrom, erzeugt aus

einem fossilen Energieträger. Grösste Wirtschaftlichkeit ist dann gegeben, wenn sowohl Strom wie Wärme ganzjährig vom Betreiber der Brennstoffzelle selbst verbraucht werden können.

Zur Markteinführung von Brennstoffzellen in der Schweiz soll deshalb eine **biogasbetriebene P+D Pilot- und Demonstrationsanlage** im industriellen Masstab realisiert werden, welche einer bestehenden **Biogas-Anlage** als Energiemodul beigelegt wird. Als Brennstoffzelle soll eine weiterentwickelte Ausführung der ONSI/GAZEL-Zelle zur Anwendung kommen.

Als biogasliefernde Anlagentypen kämen grundsätzlich in Frage: Kommunale Abwasserkläranlagen, Reaktordeponien oder Vergärungsanlagen für biogene Abfälle. Für die ersteren beiden stehen bereits P+D-Anlagen im Ausland in Betrieb (USA, Asien).

Bisher wurde jedoch weltweit noch nie eine P+D-Anlage einer **Brennstoffzelle** im Verband mit einer **Abfallvergärungsanlage** gebaut.

Ziel dieses Projektes ist es deshalb, eine solche in der Schweiz - und weltweit als erste - mit Unterstützung des BEW Bundesamtes für Energiewirtschaft zu realisieren.

Die für eine Projektierung notwendigen Informationen bezüglich Technik und Kosten der Gaserzeugung (Vergärungsanlage) und Gasverwertung (Brennstoffzelle) sind grundsätzlich vorhanden, was jedoch noch nicht bekannt ist, sind Technik und Kosten der notwendigen **Gasaufbereitung**. Da jedes Biogas je nach Abfalltyp, aus welchem es entstanden ist, in seiner Zusammensetzung differiert, kann für die Gasaufbereitung einer Abfallvergärungsanlage - wie sie für das vorliegende Projekt vorgesehen ist - nicht auf bestehende Gasaufbereitungsanlagen für Deponien oder Kläranlagen zurückgegriffen werden.

Als **erste Projektphase** wurde deshalb diese **Vorstudie** erstellt mit den **Zielen**:

1. **Tech.Machbarkeit**: Aufzeigen der grundsätzlichen technischen Machbarkeit der Aufbereitung von Rohbiogas zu Speisegas für die Brennstoffzelle.
2. **Kostenschätzung** der Gasaufbereitungsanlage.

Die Vorstudie wurde in folgende drei **Arbeitsschritte** unterteilt:

a) **IST-Gas-Bestimmung**: Zunächst musste - als Vorgabe für das Pflichtenheft der technisch auszulegenden Gasaufbereitungsanlage - ein **standardisiertes Rohgas**, ein sogenanntes "**IST-Gas**" definiert werden. Zu diesem Zweck wurden einerseits Literaturrecherchen nach vorhandenen Gasanalysen von bestehenden Abfallvergärungsanlagen durchgeführt, und so insgesamt über 30 solcher **Altproben** ausgewertet.

Andererseits wurden auf der für dieses Projekt ausgewählten Vergärungsanlage "ALLMIG" in Baar/ZG in Abständen von 1Woche bis 1 Monat über ein halbes Jahr verteilt total 11 Gasproben gezogen und analysiert (**Neuproben**).

Als Resultat konnte mittels Durchschnittsbildung ein theoretisches IST-Gas definiert werden, das als für schweizerische Abfallvergärungsanlagen **typisches Standardgas** bezeichnet werden darf.

b) SOLL-Gas-Bestimmung: Zusammen mit einem vom Hersteller ONSI sowie vom erfahrenen Betreiber SIG definierten **SOLL-Gas**, welches die zur Einleitung in die Brennstoffzelle erforderlichen Spezifikationen des Gases vorgibt, bildet das **IST-Gas** die Grundlagen für das **Pflichtenheft der Gasaufbereitungsanlage**.

c) Bestimmung der Gasaufbereitungsanlage: Die Firma Carbotech, Essen/D, eine Spezialfirma auf dem Gebiete der Gasaufbereitung für Gasfahrzeug-Tankstellen, hat auf Grund des Pflichtenheftes die **technische Machbarkeit der Gasaufbereitung** festgestellt, eine entsprechende Anlage ausgelegt und eine **Kostenschätzung** abgegeben. Die Kosten für die Gasaufbereitungsanlage belaufen sich auf ca. **CHF 200'000**.

Die **Ziele der Studie wurden erreicht**. Damit sind die **Grundlagen für eine Projektierung** der angestrebten P+D-Anlage erarbeitet, und es scheint sinnvoll, das **Projekt rasch voranzutreiben**. Der Projektverfasser wird deshalb Antrag zur Durchführung der **Folgeprojektphase** stellen, der Ausarbeitung der eigentlichen Projektierungsunterlagen, mit dem Ziel, die **P+D-Anlage 1998 zu realisieren** und anschliessend den Betrieb über einen gewisse Dauer **wissenschaftlich zu begleiten**.

2. Einführung, Ausgangslage

2.1 Ausgangslage

Zur Verwertung von Biogas, welches in Abfallvergärungsanlagen, Kläranlagen und Abfalldeponien produziert wird, werden heute in der Regel motorische Wärme-Kraft-Koppelungsanlagen (im Folgenden WKK genannt) eingesetzt.

Herkömmliche motorische WKK-Anlagen arbeiten mit einem elektrischen Wirkungsgrad von rund 30%. Ca. 60% der im Biogas enthaltenen Energie wird dabei zur Wärmenutzung frei, ca. 10% betragen die nicht nutzbaren Systemverluste.

Oekologisch wie oekonomisch interessant ist bei der Verwertung von Biogas in WKK-Anlagen in erster Linie die produzierte *elektrische* Energie, da diese - entstanden aus Biogas als erneuerbarem Energieträger und deshalb entsprechend hoch entschädigt - ein wesentlich begehrteres wirtschaftliches Gut darstellt als die produzierte Wärmeenergie.

Insbesondere bei der Verwertung von Biogas sind deshalb Energiewandlungssysteme gefragt, welche einen möglichst hohen *elektrischen* Wirkungsgrad aufweisen. Die WKK steht in dieser Hinsicht relativ schlecht da, da in ihr die Umwandlung der chemisch gebundenen Energie (Biogas) in elektrische Energie über den verlustreichen Umweg der thermisch/mechanischen Energie mittels Verbrennungsmotor geschieht.

Ein System nun, welches einen erheblich höheren el. Wirkungsgrad aufweist, steht seit wenigen Jahren in Form der **Brennstoffzelle** (BZ) theoretisch zur Verfügung. In der BZ wird durch einen elektrochemischen Prozess aus Wasserstoff und Luftsauerstoff direkt - d.h ohne elektromechanischen Umweg - elektr. Strom und Wärme erzeugt. Mit einem el. Wirkungsgrad - je nach System - von 40 bis 60% liefern die BZ bis zu 100% mehr elektrische Energie als eine vergleichbare WKK (30-33%).

Ein weiterer Vorteil der BZ besteht darin, dass sie pro produzierte kWh gegenüber der WKK nur rund die Hälfte des Unterhaltsaufwandes erfordert, u.a. da sie keine beweglichen Verschleissteile enthält. Weiter ist die BZ sehr emissionsarm, da sie praktisch lediglich H₂O-Dampf und (bei Verwendung von Biogas klimaneutrales) CO₂ emittiert.

Zum Betrieb einer BZ eignet sich - neben bestimmten flüssigen Brennstoffen - grundsätzlich jeder gasförmige Wasserstoffträger, von dem mittels geeigneter Vorbehandlung durch Reformierung der Wasserstoffanteil abgetrennt und dieser der BZ als eigentlicher Brennstoff zugeführt wird.

Mit einem Methangehalt von rund 60% ist denn auch reformiertes **Biogas** erprobterweise zum Betrieb einer BZ geeignet.

Die Gründe dafür, weshalb die BZ-Technik - ausser für Spezialfälle (Militär- und Weltraumtechnik) - bisher noch keine bedeutende industrielle Verwendung findet, liegen in den derzeit noch vergleichsweise hohen Anschaffungskosten (ca. doppelt so hoch wie für eine WKK), welche einen wirtschaftlichen Betrieb der BZ zur industriellen Stromerzeugung - trotz höheren Energieertrags und tieferen Betriebskosten - zur Zeit noch verhindern.

Dies trifft zumindest für die Verstromung von *Erdgas* zu, da die Gesteungskosten des BZ-Stromes heute noch gut doppelt so hoch sind wie die Entschädigung für den produzierten Erdgas-Strom.

Dies gilt jedoch nicht für die Verstromung von *Biogas* : durch den 50-100% höheren Entschädigungspreis, welcher in der Schweiz (wie auch z.B. in Deutschland) für Strom aus erneuerbaren Energien bezahlt wird, ist rechnerisch für eine BZ - im Zusammenwirken mit biogasproduzierenden Anlagen - bereits heute ein wirtschaftlicher Betrieb möglich, sofern die Mehrkosten für die Anschaffung einer BZ gegenüber einer WKK in einer ersten Phase der Markteinführung durch Subventionen aufgefangen würden, welche auf Unterstützungsprogrammen für erneuerbare Stromenergie gründen.

Die BZ ist also sozusagen offen für den Biogas-, noch nicht jedoch - aus Rentabilitätsgründen - für den Erdgasmarkt.

Die Hersteller von Brennstoffzellen rechnen damit, dass der Kaufpreis für BZ mit deren zunehmender Verbreitung innerhalb weniger Jahre auf das heutige Preisniveau für WKK-Anlagen und darunter sinken wird.

Sollte sich die Wirtschaftlichkeit von BZ in Biogasanlagen in der Praxis erweisen und damit deren Verbreitung entsprechend schnell wachsen, so wären bald die Voraussetzungen geschaffen, dass die BZ auch für Erdgas und andere fossile Energien wirtschaftlich interessant wird. Die Folge wäre eine erwartungsgemäss bis zu 100% gesteigerte Stromausbeute gegenüber der heutigen WKK-Technik, bzw. die mittelfristige Umstellung des Gas-WKK-Marktes von der unrationelleren Motoren- auf die ökonomisch effizientere und gleichzeitig sauberere BZ-Technik.

Um die ersten BZ jedoch auf dem Biogas-Markt plazieren zu können, sind Pilot- und Demonstrationsanlagen unabdingbare Voraussetzung.

Das gegenüber dem Projektverfasser bei dessen täglicher Beratungstätigkeit geäusserte Interesse seitens von Biogasanlagen-Betreibern für die BZ-Technik ist denn auch bereits sehr rege. Doch nicht mancher Käufer wird sich - als heroischer Pionier der Branche - an das Risiko der Anschaffung einer BZ heranwagen, ohne diese Technik zuvor im Praxismassstab begutachtet haben zu können.

Die Technik zur Kombination einer BZ mit einer schweizerischen Biogasanlage ist prinzipiell bereit, nur muss sie noch das erste Mal in der Praxis realisiert, d.h. vorzeigbar gemacht werden.

Gefordert ist also klar als nächster Schritt die Realisierung einer Pilotanlage.

Der Projektverfasser hat sich deshalb die Realisierung einer biogasbetriebenen BZ zum Ziel gesetzt, und in Vorleistung zu diesem Projekt entsprechende Voruntersuchungen angestellt.

Die wesentliche Aufgabe bestand dabei darin, unter der Vielzahl der zur Zeit in unterschiedlichen Entwicklungsphasen stehenden BZ-Typen die geeignetste zu bestimmen, um einer Biogasanlage beigelegt werden zu können.

Die Recherchen ergaben, dass unter der Vielfalt der verschiedenen Technologien, die

- zum Teil entweder noch in der eigentlichen Entwicklungsphase oder
- erst in der Laborerprobung stehen, oder
- kostenmässig noch weit von der Marktreife entfernt sind oder
- rein leistungsmässig nicht für Anlagen der hier relevanten Grösse eingesetzt werden können,

eine einzige BZ-Technik soweit ausgereift ist, dass sie bereit erscheint, nach gewissen technischen Anpassungen auf Biogasanlagen in einer ersten schweizerischen Pilot-Praxis eingesetzt werden zu können.

Es handelt sich dabei um eine sog. **PAFC-Zelle** des Herstellers ONSI/USA (vgl. Abb.1), wie sie als Erdgas-Pilotanlage mit einer el. Leistung von 200 kW unter dem Namen "GAZEL" seit 1993 bei SIG Services Industriels de Genève (Projektpartner in dieser Studie) - im Rahmen des BEW-Forschungsprogrammes *Piles à combustible* - in Betrieb steht.

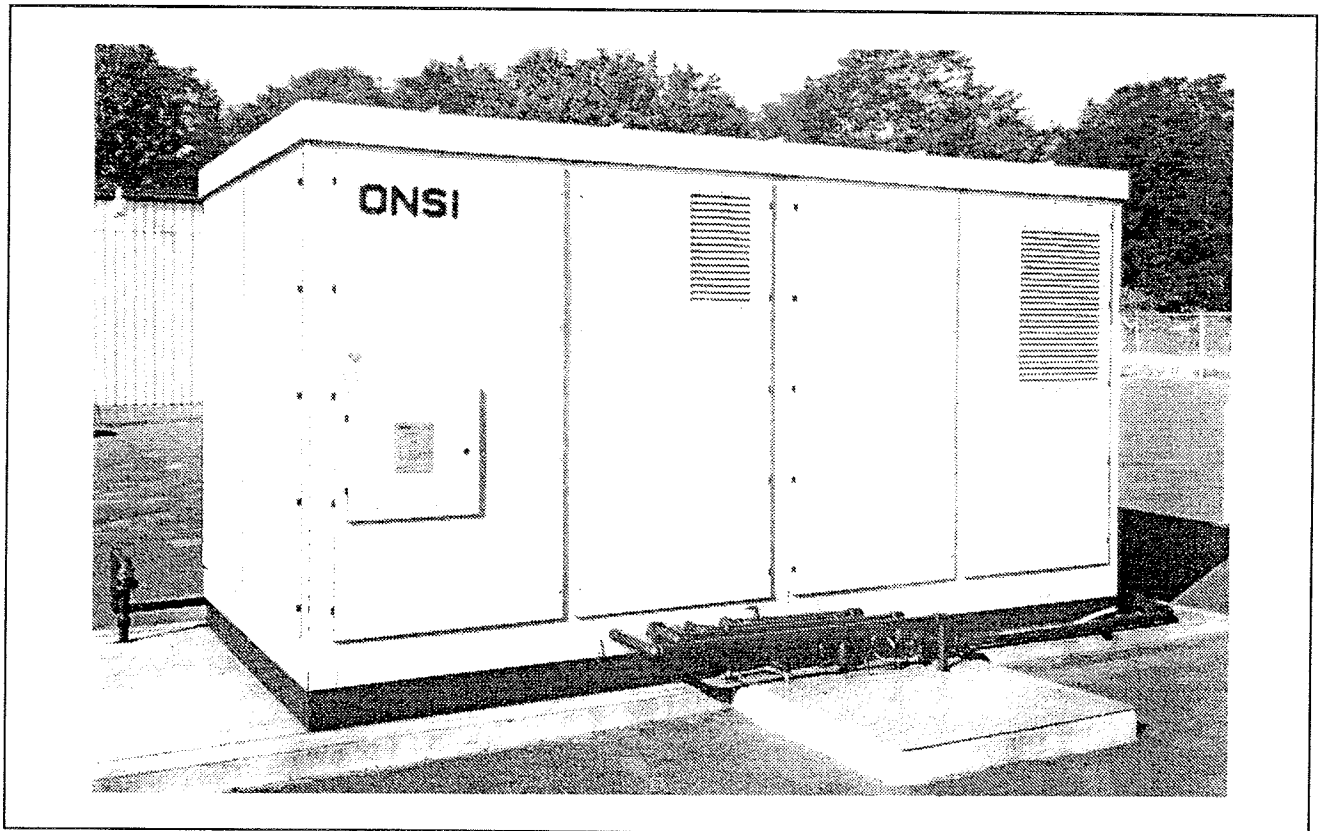


Abb.1: PAFC-Brennstoffzelle ONSI/USA, Typ PC 25C, 200 kW_e

Abb. aus [6]

Diese BZ arbeitet mit Phosphorsäure als Elektrolyt, wird betrieben bei einer Arbeitstemperatur von ca. 200°C, und leistet ca. 200 kW_{el} bei einem Wirkungsgrad von ca. 40%. Die Anlage produziert nun schon während einer totalen Betriebsdauer von über 30'000 h Strom aus städtischem Erdgas, welcher in das öffentliche Netz der Stadt Genf eingespeist wird, und hat damit ihre Zuverlässigkeit beim Verstromen von Erdgas eindrücklich bewiesen.

Auch weist die ONSI/GAZEL-Zelle eine ausserordentlich hohe Verfügbarkeit von über 90% auf, entsprechend rund 8000 Betriebsstunden pro Jahr.

Kurzbeschreibung und Spezifikation der Genfer GAZEL-Zelle: siehe [2]

In Abstimmung mit der SIG hat sich deshalb der Projektverfasser dafür entschieden, die PAFC-Zelle des Typs ONSI PC 25C der angestrebten Realisierung des Pilotprojektes zu Grunde zu legen.

Ein technisches Problem galt es dabei zunächst noch im Rahmen der vorliegenden Vorstudie zu lösen:

Biogas als solches, d.h. mit der Zusammensetzung, wie es den Vergärungsfermenter verlässt, kann nicht ohne Vorbehandlung in die BZ eingespiessen werden. Es muss zuerst den Anforderungen der BZ angepasst, d.h. - im vorliegenden Falle der Verwendung der erdgaserechten ONSI-Zelle - auf "Erdgasqualität" gebracht werden.

Nun existiert für Biogas bereits ein Teil der Lösung dieser Aufgabe in Form der Gasaufbereitungsanlagen, wie sie den schon verschiedenerorts installierten Fahrzeugbetankungsstellen vorgeschaltet werden müssen. Denn auch die Autos, welche mit Biogas betrieben werden, sind nach Erdgasstandards gebaut und verlangen - wie die ONSI-Zelle - Biogas in Erdgasqualität.

Ein noch verbleibender Rest der Aufgabe ergibt sich jedoch aus der Tatsache, dass - obschon das aufbereitete Biogas sog. "Erdgasqualität" aufweist - es deswegen noch kein Erdgas ist, sondern es hat im Wesentlichen lediglich dieselben *wärmetechnischen* Eigenschaften. Die chemischen Zusammensetzungen jedoch von Erd- und Biogas - wie auch von Biogasen unter sich, welche aus verschiedenen Anlagentypen (Abfallvergärung, Kläranlagen, Deponien) stammen - differieren in ein paar wesentlichen Begleitgasen ("Brennstoffzellen-Gifte"), welche Einfluss haben auf die Betriebssicherheit und Standzeit sowohl der im Reformier wie auch in der Zelle selbst befindlichen Anlagen-Komponenten, wie auch auf den el. Wirkungsgrad der BZ.

Gasaufbereitungsanlagen für Biogas-BZ wurden bereits gebaut für Gas aus

- Deponien (USA)
- Kläranlagen (Japan)
- Industriellen Abwässern (Italien).

Noch nirgends jedoch - so die momentane Kenntnis des Projektverfassers - wurde bis heute eine Pilotanlage im industriellen Massstab für Biogas aus einer *Abfallvergärungsanlage* realisiert.

Da der Projektverfasser einerseits selbst grosse Erfahrung besitzt mit Biogas primär aus Abfallvergärungsanlagen (und sekundär aus Kläranlagen und Deponien), andererseits eine BZ-Anlage im Zusammenwirken mit einer Abfallvergärungsanlage international neuartig wäre und entsprechend begrüsst würde, und da zudem schon mehrere Betreiber von Abfallvergärungsanlagen ihr grundsätzliches Interesse als Pilotbetrieb bekundeten, wurde entschieden, das Projekt auf eine schweizerische **Abfallvergärungsanlage** auszurichten.

2.2 Potentialbetrachtung von Brennstoffzellenstrom aus Biogas

Würde sämtliches heute jährlich in der Schweiz mittels motorischer WKK-Anlagen verstromtes Gas stattdessen in Brennstoffzellen verwertet, würde gemäss Wirkungsgradannahmen in der untenstehenden Tabelle ein Mehrertrag an elektr. Strom aus Gas von 75 GWh/a oder von +33% resultieren.

Bei einem jährlichen schweizerischen Gesamtstromverbrauch von rund 50'000 GWh/a¹ entspräche dies einem Anteil von ca. 0.15%.

Stromerzeugung in der Schweiz 95		GWh/a			Tendenz
Total		60'000 ²			
durch motorischen WKK ³					
mit BIOGAS aus:					
• Abfall-Vergärungsanlagen		4			steigend
• Kommunale Kläranlagen		63			stagnierend
• Abfall-Reaktordeponien		39			fallend
mit BIOGAS total		106			
mit ERDGAS		122			stark steigend
total motorische WKK		228			
GWh/a		228			
Wirkungsgrad		30%			
durch Brennstoffzellen	GWh/a	304	342	380	
	Wirkungsgrad ⁴	40%	45%	50%	
Mehrertrag mit Brennstoffzellen					
GWh/a		76	114	152	
%		33	50	66	

Tab.1: • Stromerzeugung in schweizerischen WKK-Anlagen mit Gasmotorbetrieb
• Vergleich: theoretischer Mehrtrag mit Brennstoffzellen statt mit WKK

¹ BA für Statistik Bern 95: 52'000 GWh; SIG Genf 95: 48'000 GWh

² BA für Statistik Bern 95

³ BEW Schweiz.Statistik der Klein-WKK-Anlagen 1995

⁴ Projektzelle ONSI PC 25C: Wirkungsgrad 40%

Es darf in diesem Zusammenhang nicht falsch gewichtet werden, dass das diesem Projekt zu Grunde gelegte Biogas als Potential - d.h. als resultierender Zuwachs, wenn alles heute verstromte Biogas mittels BZ statt herkömmlicher WKK verarbeitet würde - nicht eine überragende Rolle spielt in Bezug auf die Ziele von Energie 2000 bzw. auf die schweizerische Stromgesamtproduktion.

Die Anwendung von *Biogas* in der BZ ist denn nicht a priori als solche interessant, sondern im Hinblick darauf, dass das Biogas als sich anbietender Wegbereiter angesehen muss bei der Markteinführung der BZ für den späteren Einsatz mit *Erdgas*, insbesondere da, wo heute Erdgas noch nicht zur Stromerzeugung eingesetzt wird.

Hier - bei der Revolutionierung der generellen Wärme-Kraft-Koppelungstechnik durch Ablösung der verfahrenstechnisch veralteten Motorentechnologie durch die Brennstoffzellentechnik - liegt der durch die BZ mögliche beträchtliche Energiezuwachs, der der Förderung des vorliegenden Projektes zu Grunde gelegt werden muss.

2.3 Abgrenzung des Projektes zu bestehenden Studien

Zahlreiche Studien und Publikationen neueren Datums beschäftigen sich mit den folgenden Themen:

- Brennstoffzellentechnik im allgemeinen, insbesondere bezüglich der Unterschiede zwischen verschiedenen BZ-Ausführungen in Bezug auf Materialwahl von Reformern, Katalysatoren, Elektroden und Elektrolyten, auf verschiedene Betriebstemperaturen, Bauvolumen, Mobilität und Wirkungsgrade.
- Grundsätzliche Aspekte zur technischen und ökonomischen Machbarkeit der BZ-Anwendung in der industriellen Praxis.
- BZ in Labor- und Pilotmasstäben für Reinwasserstoff, flüssige Wasserstoffträger, Erdgas [1, 2], Biogase aus Industrieabwasser-Vergärungen [3] und aus Deponien [4].
- Die Untersuchungen von Ascoli A. mit Biogas aus Abwasser der nahrungsmittelverarbeitenden Industrie [3] wurden im Labormasstab durchgeführt.
- Die Berichte von Trocciola J.C./IFC/ONSI und US.E.P.A. [4] über Biogas aus Abfalldéponien dokumentieren amerikanische Feldversuche im industriellen Masstab.
- Das GAZEL-SIG Projekt [1, 2], welches seit 92 vom BEW mitgetragen wird, arbeitet mit Erdgas im industriellen Masstab.
- Das japanische Projekt [5] arbeitet im industriellen Masstab mit Biogas aus einer kommunalen Kläranlage von Yokohama.

Es wurde jedoch noch nicht untersucht, welche Gasaufbereitung im industriellen Masstab notwendig ist als Voraussetzung für die **Einleitung von *Biogas aus Abfallvergärungsanlagen* in eine BZ, dem eigentlichen Thema der vorliegenden Studie.**

Als Voraussetzung für die Planung einer P+D-Anlage in der Schweiz werden daher im Rahmen dieser Vorstudie Gasaufbereitungsuntersuchungen mit Biogas aus einer *Abfallvergärungsanlage* durchgeführt.

Die Untersuchungen stützen sich ab auf die Arbeiten von A.Ascoli, Mailand sowie auf die Praxisstudien der US E.P.A. zusammen mit IFC/ONSI, USA. Der Projektverfasser ist bestrebt, bei der Definition und Auslegung der Gasaufbereitungsanlagen für die angestrebte schweizerische Biogas - P+D-Anlage weitestmöglich auf die schon erarbeiteten ausländischen Resultate abzustellen.

Prof.Ascoli/Mailand bestätigt den Sinn und die Notwendigkeit, im Bestreben einer raschest möglichen Einführung der BZ-Technik auf dem Energie-Markt seine Vorarbeiten im Sinne des vorliegenden Projektes weiterzuführen.

Weiter wird im Rahmen dieser Vorstudie Prof.Winzeler/Technikum Winterthur als externer Experte zu Rate gezogen, welcher Erfahrung in der Vorbehandlung von Biogas vor dessen Einleitung in diverse - von der im Projekt verwendeten BZ jedoch technisch grundsätzlich abweichende - BZ-Typen (SOFC und PEFC) hat.

3. Fragestellung, Zielsetzung der Vorstudie

3.1 Realisierung P+D-Anlage

Ziel des Projektverfassers ist es letztlich, der energetisch und oekologisch sehr interessanten - und gegenüber der herkömmlichen WKK-Technik mittels Verbrennungsmotoren wesentlich eleganteren - **Gasverstromungstechnik** mittels **Brennstoffzellen** in der Schweiz zur **Markteinführung** zu verhelfen, und zu diesem Zweck eine P+D-Anlage zu realisieren.

Wirtschaftlichkeitsgründe (BZ sind heute noch teurer als motorische WKK-Anlagen) legen es nahe, dass dabei zuerst die industrielle Anwendung für Biogas (als erneuerbarer und deshalb höher entschädigter Energieträger) verwirklicht wird, und erst anschliessend - wenn die Herstellungskosten der BZ mit zunehmender Anzahl an installierten Anlagen erwartungsgemäss sinken - der Marktdurchbruch auch für das bezüglich Energie potentialmässig noch wesentlich interessantere Erdgas die erwartete Folge sein dürfte.

Deshalb soll ein Projekt durchgeführt werden, welches in drei Phasen (vgl. Kap.4: *Vorgehen*) mit Unterstützung des *BEW Schweizerisches Bundesamt für Energiewirtschaft* die Realisierung und wissenschaftliche Begleitung einer **Brennstoffzellen - P+D-Anlage im industriellen Betrieb** zusammen mit einer ausgewählten schweizerischen Abfallvergärungsanlage zum Ziel hat.

3.2 Machbarkeitsstudie Gasaufbereitungsanlage

In der Verfahrenskette Biogaserzeugung→Biogasaufbereitung→Biogasverwertung sind Technik und Kosten der Biogaserzeugung (Vergärungsanlagen) sowie der Biogasverwertung (Brennstoffzelle) hinreichend bekannt, um einem Projektantrag für eine P+D-Anlage zu Grunde gelegt zu werden.

Unbekannt - da bis heute noch nie in industriellem Massstab realisiert - sind hingegen die technische und ökonomische Machbarkeit der **Aufbereitung von Biogas aus Abfallvergärungsanlagen** zur Einleitung in die für das Projekt vorgesehene **PAFC-Brennstoffzelle ONSI PC 25C**.

Eigentliches Ziel der vorliegenden Studie ist deshalb das Auslegen und die Kostenschätzung einer Gasaufbereitungsanlage zur notwendigen Vorbehandlung von Biogas, wie es in Abfallvergärungsanlagen entsteht, vor dessen Einleitung in die BZ.

Erst wenn diese technische Schnittstelle erarbeitet ist, kann in der Folge-Projektphase II eine P+D-Anlage geplant und kalkuliert werden.

3.3 Zusammenfassung Ziele

Ziel dieser Vorstudie ist die Beantwortung folgender Fragen:

1. **Tech.Machbarkeit:** Aufzeigen der grundsätzlichen technischen Machbarkeit der Aufbereitung von Rohbiogas zu in die Brennstoffzelle einleitbarem - d.h. den Erfordernissen der Brennstoffzelle entsprechendem - Speisegas.
2. **Kostenschätzung** der Gasaufbereitungsanlage.

4. Vorgehen

4.1 Phasen des Gesamtprojektes

Das gesamte Projekt umfasst die folgenden 3 Phasen:

Vorliegende Studie:

Phase I: Vorstudie (Machbarkeitsstudie):

Definieren, Auslegen, Kostenschätzung einer Gasaufbereitungsanlage zur Vorbehandlung von Biogas aus einer provisorisch ausgewählten schweizerischen Abfallvergärungsanlage vor dessen Einleitung in die Brennstoffzelle.

Folgeprojekte:

Phase II: Vorprojekt für P+D-Anlage:

Technik, Kosten (Invest und Betrieb), Termine.

Definitive Bestimmung der Abfallvergärungsanlage, mit welcher das P+D-Projekt realisiert werden soll.

Abklärung von Subventionsmöglichkeiten für die in Phase III (Realisierung der P+D-Anlage) eingesetzte sowie für weitere, im Anschluss an Phase III kommerziell eingesetzte Brennstoffzellen.

Phase III: P+D-Projekt:

Realisierung und wissenschaftliche Begleitung einer P+D-Anlage im industriellen Betrieb zusammen mit der in Phase II ausgewählten Abfallvergärungsanlage.

Betreuung von Interessenten für weitere Praxisanlagen, Beratung betr. Subventionen.

Realisierungshilfe für kommerzielle bzw. industrielle Projekte, welche im Anschluss an das P+D-Projekt von Dritten realisiert werden möchten.

4.2 Arbeitsschritte Phase I, Vorstudie

Die vorliegende Machbarkeitsstudie beinhaltet im wesentlichen die folgenden Arbeitsschritte:

1. IST-Gas-Bestimmung (vgl. Kap.5)
2. SOLL-Gas-Bestimmung (vgl. Kap.6)
3. Definieren der Gasaufbereitungsanlage (vgl. Kap.7) aufgrund der IST-Gas- und SOLL-Gas-Bestimmung, Kostenschätzung

5. IST-Gas-Bestimmung

vgl. Anhang 3: • *Tabelle "IST-Gas-Bestimmung"*

• *Diagramme zum saisonalen Verlauf der Gaszusammensetzung*

5.1 Zweck der IST-Gas-Bestimmung

Zweck dieses Arbeitsschrittes war es, als Grundlage für die Auslegung der Gasaufbereitungsanlage durch

- Literaturrecherchen über bestehende Gasanalysen,
- neue Gasanalysen,
- Durchschnittsbildung der eruierten Messwerte

ein theoretisches, für Abfallvergärungsanlagen möglichst repräsentatives *Standard-Biogas* aus Abfallvergärungsanlagen zu bestimmen, welches den Input für die zu entwerfende Gasaufbereitungsanlage darstellt.

Bezüglich der neu zu erstellenden Gasanalysen wird dabei angestrebt, mindestens 1 kompletten Jahresgangverlauf zu erhalten, aus welchem allfällige saisonal bedingte Schwankungen in der Gaszusammensetzung ersichtlich werden. Diese Schwankungen ergeben sich daraus, dass sich je nach Saison die Zusammensetzung der eingesammelten und der Vergärungsanlage als Biogas-Rohstoff zugeführten organischen Abfälle ändert.

Biogase aus den verschiedenen Methangas-bildenden Anlagen wie Reaktordeponien, Kläranlagen und Abfallvergärungsanlagen unterscheiden sich zwar nur geringfügig, aber in Bezug auf gewisse Inhaltsstoffe, welche für Brennstoffzellen als Katalysatorgifte wirken, dennoch in entscheidendem Masse. Diese Stoffe vermindern die Leistungsfähigkeit (Wirkungsgrad) und die Standzeit der Brennstoffzelle. Solche Gifte sind vor allem Ammoniak, Chlor- und Schwefelverbindungen, letztere hauptsächlich in Form von Schwefelwasserstoff.

Da jeder dieser Anlagentypen unterschiedliche organische Abfälle verarbeitet, differieren u.a. diese für die Brennstoffzelle heiklen Gasbestandteile und verlangen ein spezielles Augenmerk im Hinblick auf Biogas als Betriebsstoff für Brennstoffzellen.

Bisher wurden weltweit PAFC-Brennstoffzellen erst in Verbindung mit Biogas aus Reaktordeponien (USA) [4] und Kläranlagen (Japan) [5] - nicht jedoch auf Abfallvergärungsanlagen - realisiert, weshalb keine Erfahrungen bzw. nur marginale Literaturangaben vorliegen bezüglich *der typischen durchschnittlichen* Zusammensetzung von Biogas, welches bei der *Vergärung von organischen Haushalt- und Grünabfällen* gebildet wird.

5.2 Auswahl der Abfallvergärungsanlage für die IST-Gas-Bestimmung

Als typischer Vertreter einer schweizerischen Abfallvergärungsanlage wurde die Anlage "Allmig" in Baar/ZG der Firma Alfred Müller AG ausgewählt. Sie kann deshalb als typisch bezeichnet werden, da sie nach verfahrenstechnischem Prinzip bzw. Bauweise identisch ist mit über 80% aller

in der Schweiz in Betrieb stehenden Abfallvergärungsanlagen.

Kurzspezifikation Vergärungsanlage "Allmig"/Baar:

- Verfahren BRV
- Einstufige Vergärung (vgl. Abb.2)
- Trocken-/Feststoffvergärung von biogenen Siedlungsabfällen
- Liegender Fermenter
- Thermophiler Arbeitsbereich
- Kapazität 6500 t/a
- Kontinuierliches Verfahren

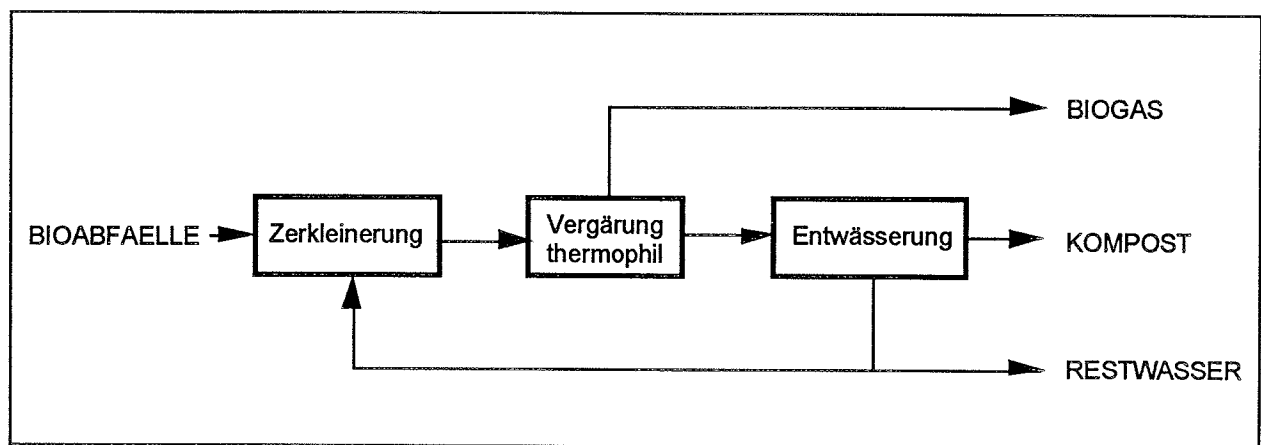


Abb.2: Einstufiges, thermophiles Verfahren zur Vergärung biogener Abfälle

Abb. aus [7]

5.3 Vorgehen bei der IST-Gas-Bestimmung

Zur Bestimmung des für dieses Projekt verbindlichen IST- bzw. Standardgases wurde das folgende Vorgehen gewählt:

Altproben: Einerseits wurden eine möglichst grosse Anzahl von bisher analysierten Biogasproben von bestehenden schweizerischen und ausländischen Abfallvergärungsanlagen gesammelt und tabellarisch aufgelistet. Es wurden dabei rund 30 Probenanalysen im Zeitraum von März 92 bis Februar 97 ausgewertet.

Neuproben: Andererseits wurde ein Messprogramm erstellt, in welchem von der für dieses Projekt ausgewählten Vergärungsanlage "Allmig" in Baar/ZG periodisch Gasproben gezogen und auf eine umfassende Stoffpalette hin analysiert wurden.

Zwischen Projektbeginn (Januar 97) und Abschluss dieser Studie wurden so insgesamt 11 solche Analysen in Abständen von 1 Woche bis 1 Monat durchgeführt und tabellarisch ausgewertet.

Folgende Stoffe im Biogas wurden dabei untersucht: CH_4 , CO_2 , CO , H_2O , O_2 , N_2 , NH_3 , H_2S , S_{ges} , Cl_{ges} , Cl_{org} , Cl_{anorg} sowie LCKW (leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe).

Die Auswahl dieser Stoffe wurde vorgängig abgestimmt mit dem Projektpartner SIG Service Industriels de Genève, dem Betreiber der einzigen heute in der Schweiz installierten PAFC-Brennstoffzelle des Herstellers ONSI/USA. SIG hat lange Erfahrung in Forschung, Entwicklung und Betrieb dieser, mit Erdgas betriebenen, Anlage.

Aus den gewonnenen Einzelresultaten der Neuproben wurden Durchschnitts- und Bandbreitenwerte gebildet, als Grundlage für das zu definierende IST- bzw. Standardgas, nach welchem die Gasaufbereitungsanlage ausgelegt werden soll. Zur Plausibilitätsabschätzung dieser Werte wurden die Durchschnitts- und Bandbreitenwerte der Altproben herangezogen.

5.4 Diskussion der Analysenresultate

vgl. Anhang 3: *Tabelle "IST-Gas-Bestimmung"*

Augenfällige Unterschiede zwischen den Alt- und den Neuproben ergaben sich einerseits für die Luftgase H_2O , O_2 , N_2 , andererseits - und auffälliger - für die Chlorverbindungen.

Luftgase:

Die Werte der Altproben für O_2 und N_2 liegen durchwegs rund 4 mal höher als diejenigen der Neuproben. Eine einfache Verhältnisrechnung der beiden Gasbestandteile untereinander zeigt weiter, dass sowohl bei den Alt- wie bei den Neuproben der Stickstoffanteil stets durchwegs 4-5 mal höher ist als der Sauerstoffanteil, was dem natürlichen Verhältnis N_2/O_2 , von normaler Umgebungsluft entspricht. Dies deutet darauf hin - und wird auch vom externen Experten Dr. Winzeler/Technikum Winterthur so interpretiert - dass die gemessenen O_2 - und N_2 -Anteile im Biogas nicht eigentliche Bestandteile des Biogases sind, sondern durch Leckluft bei der Probennahme verursacht sein könnten.

Aus diesem Grund sind auch die gemessenen Wasserwerte vermutlich nicht als Biogasbestandteile zu betrachten, sondern es kann angenommen werden, dass auch sie durch Leckluft in die Proben transportiert wurden

Die eruierten H_2O , O_2 - und N_2 -Werte werden deshalb als für unsere Untersuchung als irrelevant betrachtet, zumal sie für die Brennstoffzelle unkritisch sind, d.h. keine unerlaubten Katalysatorgifte darstellen.

Chlorverbindungen:

Zur anfänglichen Ueberraschung zeigten sich beim ersten Vergleich im März der Neu- mit den Altproben bezüglich des Chlorgehalts derart massive Abweichungen (bis um Faktor 2000 höhere Werte bei den Allmig-Neuproben gegenüber den Altproben, welche aus zwei Anlagen mit anderen

Vergärungsverfahren⁵ sowie von anderen Labors stammten), dass Verunsicherung aufkam betreffend die Richtigkeit der Resultate.

Folgende Fragen lagen deshalb auf der Hand:

Frage a)

Sind die hohen neuen CI-Werte richtig, d.h. die tiefen Altwerte falsch, oder umgekehrt?

Frage b)

Sind die hohen neuen CI-Werte richtig, aber evtl. verfahrensspezifisch (wie erwähnt stammten die Altproben von Vergärungsanlagen, welche nach anderen Verfahren arbeiteten als dasjenige der Allmig-Anlage)?

Frage c)

Sind die hohen neuen CI-Werte evtl. laborspezifisch, d.h. analysen-systematisch zu hoch?

Zur Klärung dieser Fragen wurden folgende Massnahmen getroffen:

zu Frage a):

- Recherchen nach weiteren Altproben-Analysen

Diese Recherche ergab nur noch 1 zusätzlichen Chlorwert (Anlage Valorga/Tilburg NL)⁶ Dieser Wert (Altprobe Nr.21) war nochmals um rund Faktor 10 höher als die Neuproben, was entweder als massiver Ausreisser gewertet werden muss, oder aber tendentiell für die Plausibilität der neuen Proben spricht.

Auch Dr. Winzeler/Technikum Winterthur waren keine weiteren CI-Werte aus der Literatur bekannt.

Der Grund der geringen Ausbeute an bestehenden Chloruntersuchungen (Altproben) ist, dass das Element Chlor bis anhin, d.h. bei der herkömmlichen Biogasverwertung als Heizgas (Gasbrenner oder -kessel) sowie als Motorentreibstoff (WKK) eine vergleichbar unbedeutende Rolle gespielt hat, und erst bei Verwendung in Brennstoffzellen Relevanz erhält, da - wie erwähnt - Chlor ein unerlaubtes, da empfindlich wirkendes Katalysarorgift für den Reformier der Brennstoffzelle darstellt.

- Rücksprachen - sofern möglich - mit den Labors, welche die tiefen Altwerte eruiert hatten

Hier ergaben sich folgende Resultate:

Bei zwei Chloranalysen (Altproben Nr.12 und 13), wurde das CI selbst nicht gemessen, sondern aus den Einzelwerten verschiedener Fluor-/Chlorverbindungen (Spuren) errechnet. Statt "nicht gemessen" wurde auf dem Analysenblatt für CI den Wert 0.0 eingeschrieben. Die rechnerisch mögliche Bandbreite jedoch liegt - nach Rücksprache mit dem Labor - im Bereich der neuen Allmig-Werte gemäss IST-Gas-Tabelle (d.h.: tendentielle Plausibilität der neuen Werte).

⁵ Kompogas/Rümlang, Dranco/Salzburg, Kurzcharakterisierung der Anlagen vgl. Anhang 2

Bei den Altproben Nr. 18 und 19 hat das Labor - welches nicht eruiert und befragt werden konnte - offensichtlich beim Erstellen des Analysenblattes die Grössen μg und mg verwechselt (d.h.: angegebener Wert der Probe Nr. 18 in μg ist um Faktor 1000 zu tief). EMPA Dübendorf/Dr. Buchser teilt diese Meinung (aufgrund einer Anfrage des Verfassers), da dem Institut kein auf dem Markt befindliches Analysengerät bekannt ist, welches die angegebenen Cl-Konzentrationswerte als μg nachzuweisen imstande wäre. Es muss sich unzweifelhaft um mg handeln, wodurch der eruierte Chlorwert in den Bereich der neuen Allmig-Werte zu liegen kommt, was diese also wiederum tendentiell plausibilisiert.

Probe Nr. 19 schliesslich wurde mit "nicht nachweisbar" angegeben.

zu Frage b):

- Verfahrensvergleich

Im März wurden vom *selben* Labor am selben Tag zusätzlich zur Anlage Allmig auf 2 weiteren, von *unterschiedlichen Herstellern* stammenden, vom Verfahren her jedoch vergleichbaren Vergärungsanlagen Proben gezogen und analysiert. Es handelt sich dabei um die Anlagen⁷

- Kompogas/Rümlang ZH
- ROM-Opur/Kefikon/TG

Der Test sollte einen Vergleich liefern von verschiedenen Vergärungsverfahren mit vergleichbarem Abfall zur selben Jahreszeit, um allenfalls aufzuzeigen, ob die hohen Chlorwerte der Neuproben möglicherweise verfahrensbedingt erklärt werden könnten.

Die gefundenen Cl-Werte dieser 3er-Messung ergaben jedoch eine Bandbreite, innerhalb derer auch die bisherigen neuen Proben liegen (d.h. Chlorwerte scheinen in dieser Messung unabhängig zu sein vom angewandten Vergärungsverfahren, d.h. tendentielle Plausibilisierung der Allmig-Werte).

zu Frage c):

- Laborvergleich

Im April wurden - in Umkehrung zum obigen Test (Verfahrensvergleich) - von 2 *verschiedenen* Labors von der *gleichen* Anlage (Allmig) gemeinsam und zur gleichen Zeit Gasproben genommen und analysiert (Stammlabor Vollanalyse, Kontrolllabor nur Chlor).

Das Ergebnis war überraschend bzw. irritierend (vgl. Neuproben Nr. 7 und 8):

Die Werte des Stammlabors für Cl_{ges} lagen um ca. Faktor 12 höher als jene des Kontrolllabors, und für Cl_{anorg} sogar um ca. Faktor 27 höher. Die Werte des Kontrolllabors lagen dabei mit $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in der Grössenordnung der Nachweisgrenze ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Frage: Misst das Stammlabor generell zu hoch, oder das Vergleichslabor zu tief?

⁶ Kurzcharakterisierung der Anlage vgl. Anhang 2

⁷ Kurzcharakterisierung der Anlagen vgl. Anhang 2

Beide Labors nahmen zu ihren Ergebnissen schriftlich Stellung und beharrten, wie zu erwarten war, beide auf der Richtigkeit ihrer Messungen. Beiden Labors wurde dabei auch die Stellungnahme des jeweiligen anderen Labors zur Kenntnis vorgelegt.

Eine mögliche Erklärung der rätselhaften Unterschiede versprach man sich durch folgenden Umstand: Beide Labors arbeiteten unter sonst identischen Randbedingungen, bis auf eine Ausnahme: das Stammlabor arbeitete bei der Probennahme mit einer Absorptionslösung (zum Auffangen der Chlorverbindungen im Biogas) auf Ammoniakbasis, während das Kontrolllabor mit reinem Wasser arbeitete. Wenn das Chlor in der Ammoniaklösung markant stärker gebunden wird als in reinem Wasser, könnte dies die tieferen Werte des Kontrolllabors erklären.

Deshalb wurde im Mai das Prozedere nochmals wiederholt. Diesmal wurde jedoch von beiden Labors mit Ammoniaklösung gearbeitet, welche vom Stammlabor zubereitet und dem Kontrolllabor zur Verfügung gestellt wurde, um sicherzustellen, dass beide Labors mit der identischen Lösung arbeiteten. Von der Lösung wurde eine Nullprobe gezogen und durch das Kontrolllabor separat auf allfälliges schon in der Lösung vorhandenes Chlor untersucht (Ergebnis: negativ). Doch auch dieser zweite Labor-Quervergleich ergab nicht die erhoffte Erklärung für die Differenzen im Chloranteil des Biogases: Auch diesmal fand das Stammlabor mit $840 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wiederum rund 10x höhere Werte für Cl_{anorg} (Kontrolllabor < 100 , = ca. Nachweisgrenze wie bei der ersten Messung vom April).

Das Stammlabor besteht nach wie vor auf der Richtigkeit seiner hohen Chlorwerte. Diese Ansicht wird allenfalls durch den Umstand erhärtet, dass die fragliche Probe zweimal analysiert wurde, und zwar nach verschiedenen Analysemethoden, einmal nach dem *Ionenchromatografischen Verfahren* (die Methode, nach welcher auch das Kontrolllabor arbeitete), und einmal mit der *Microcoulometrischen Messung*. Beide Analysen ergaben vergleichbare Resultate.

Fazit: Es wird als müssig - da bezüglich der primären Projektzielsetzung (Machbarkeit der Gasaufbereitungsanlage) nicht notwendig - erachtet, weiter dieser Chlorfrage nachzugehen bzw. noch weiter nachzuforschen, worin die nähere Ursache für die Analysenunterschiede liegt.

Für die Definierung des IST- bzw. Standardgases als Grundlage des Pflichtenheftes für die Gasaufbereitungsanlage werden nach Abstimmung mit SIG, sowie mit AFAG/Carbotech⁸ als Hersteller der Anlage, die höheren Werte (Worstcase) herangezogen. Gemäss Aussage der Herstellerfirma *Carbotech* stellt die Chlorentfernung - auch für die höheren Werte - kein technisches Problem dar, und wirkt sich auch nicht kostenrelevant aus.

⁸ vgl. Seite 4: *Projektbeteiligte*

Uebrige Gasbestandteile:

Die übrigen Gasbestandteile wiesen sowohl im Vergleich Altproben/Neuproben, wie auch bezüglich ihrer Konzentration innerhalb der - dem IST-Gas schwergewichtig zu Grunde gelegten - Neuproben keine projektrelevanten Auffälligkeiten auf. Vgl. dazu Kap.8: *Begutachtung der Resultate*

6. SOLL-Gas-Bestimmung

vgl. Anhang 4: *Tabelle "SOLL-Gas-Bestimmung"*

Das SOLL-Gas wurde von SIG nach Rücksprache mit ONSI definiert und als Grundlage für das Pflichtenheft der Gasaufbereitungsanlage herangezogen.

Bei der Festlegung der SOLL-Gas-Werte wurden drei verschiedene Spezifikationsblätter des Herstellers der Brennstoffzelle ONSI/USA ausgewertet, welche die maximal zulässigen Gasbestandteile für den Betrieb der Brennstoffzelle angeben bezüglich der Aspekte

- Leistung (Wirkungsgrad) der Brennstoffzelle.
Forderung: Ausgangsleistung $P_{el} = 200 \text{ kW}$
- Verfügbarkeit der Brennstoffzelle zwischen 2 Wartungsunterbrüchen.
Forderung: >90% (rund 8000 h/a).

Aus den - zwischen den verschiedenen Spezifikationsblättern - z.T. abweichenden Angaben von ONSI zum maximal zulässigen Gehalt insbesondere von Cl, O₂ und S im Biogas, welches der Brennstoffzelle zugeführt werden darf, wurden für die kritischen Gasbestandteile (Katalysatorgifte) je die niedrigsten angegebenen zulässigen Werte, d.h. wiederum der Worstcase verwendet (vgl. IST-Gas-Bestimmung), um bei der Auslegung der Gasaufbereitungsanlage auch bei den SOLL-Gas-Anforderungen auf der sicheren Seite zu sein.

7. Definieren der Gasaufbereitungsanlage

vgl. Anhang 5: *Blockschema Gasaufbereitungsanlage*

Anhang 6: *Angebot/Anlagenbeschreibung Gasaufbereitungsanlage*

Die Firma Carbotech GmbH, Essen/D, wurde gebeten, gemäss Pflichtenheft bzw. SOLL-Gas-Tabelle (vgl. Anhang 4) die Gasaufbereitungsanlage technisch auszulegen und eine Kostenschätzung $\pm 20\%$ abzugeben. Carbotech, deren schweizerischer Ansprechpartner die Firma AFAG, /Basel - Projektpartner in dieser Studie - ist, ist eine renommierte deutsche Firma auf dem Gebiete der allgemeinen Gasaufbereitung und -Konditionierung für verschiedenste industrielle Zwecke. Eine Spezialität der Firma ist die Erd- und Biogasaufbereitung für druckgasbetriebene Fahrzeuge. So ist der Grossteil aller in der Schweiz gebauten Gasaufbereitungsanlagen von Fahrzeug-Gastankstellen mit AFAG/Carbotechanlagen ausgerüstet.

Die Firma bietet unseres Erachtens eine gute Gewähr dafür, dass eine von ihr gebaute Gasaufbereitungsanlage gegebenenfalls in unserem Projekt bezüglich der Gasaufbereitung die Funktionstüchtigkeit der BZ sicherstellen könnte.

Die vorgeschlagene Anlage besteht aus 3 Behältern mit unterschiedlichen Materialien zur Abtrennung der zu entfernenden Gasbestandteile. Es handelt sich um eine 2-stufige Reinigungsanlage mit einer ersten, kontinuierlich arbeitenden Durchflussstufe, sowie einer zweiten, aus zwei parallelgeschalteten, zyklisch betriebenen Behältern bestehenden Druckwechselstufe, welche als Ganzes kontinuierlich läuft, mit einer Verfügbarkeit von ca. 8500 h/a (>95%).

Die Standzeit der Trennmaterialien in den Filterbehältern beträgt rund 2 Jahre, wobei jeweils total 150 kg unproblematisch zu entsorgende Rückstände auf Aktivkohlebasis (KVA oder Inertstoffdeponie) anfallen.

Obschon die Anlage nicht als eigentliche Methananreicherungsanlage gebaut ist (wie sie zur Gasaufbereitung für Fahrzeuge benötigt wird, und was eine teure Kompressorstufe bedingen würde), reichert die Anlage dennoch zwangsläufig beim Entfernen von NH_3 den Methananteil im Biogas an, und zwar von rund ca. 55% auf ca. 70%. Die damit einhergehende Steigerung des Heizwertes, d.h. des spezifischen Energieinhaltes des Biogases, ist ein willkommener Gratis-Nebeneffekt, kann doch so die BZ mit einer kleineren Gasdurchflussrate gefahren werden, was deren Lebensdauer erhöht.

Die Anlage ist SPS-Automatikgesteuert, und als komplette Einheit auf einem Grundrahmen montiert.

Die Kosten der Anlage werden von Carbotech auf rund CHF 200'000.- veranschlagt.

Ein detaillierterer Beschrieb und weitere Spezifikationen der Gasaufbereitungsanlage gehen aus dem Anhang 6: *Angebot/Anlagenbeschreibung Gasaufbereitungsanlage* hervor.

8. Begutachtung der Resultate

8.1 IST-Gas-Bestimmung

Dr. Winzeler/Technikum Winterthur hat das definierte Standardgas gemäss der IST-Gas-Tabelle (vgl. Anhang 3) einem Kurzgutachten unterzogen und - unter dem Hinweis auf einige offensichtliche Ausreisser (siehe Fussnoten in der IST-Gas-Tabelle) sowie (bezüglich der Luftgase H_2O , O_2 und N_2) auf das offensichtliche Vorhandensein von Leckluft bei der Probennahme - grundsätzlich als typisch gutgeheissen und erachtet das festgelegte Standardgas zur Verwendung als Vorgabe für die Gasaufbereitung als geeignet.

Firma EREP S.A./Aclens, Projektpartner in dieser Studie und Expertin auf dem Gebiete der Biogaserzeugung in Vergärungsanlagen für organische Abfälle, teilt diese Ansicht.

Da grundsätzlich der Auslegung der Gasaufbereitungsanlage bezüglich

- der zu entfernenden Brennstoffzellen-Gifte oder Ballastkomponenten wie CO_2 , N_2 etc. die jeweils höchsten
- und bezüglich des Brennstoffes Methan die niedrigsten

gemessenen Konzentrationswerte, d.h. stets der *Worstcase* angenommen wurde, ist das Risiko bezüglich unserer Projektziele als minim bis nicht vorhanden zu bezeichnen, das gefundene IST-Gas als Grundlage für die weiteren Projektschritte zu verwenden.

8.2 SOLL-Gas-Bestimmung

Die vom Hersteller der Brennstoffzelle *ONSI/USA* bzw. dessen Vertretungen *AnsaldoCLC/Genua* und *HGC Hamburg Gas Consult* in Zusammenarbeit mit *SIG/Genf* vorgegebenen

- max. zulässigen Werte bezüglich der Brennstoffzellen-Gifte
- sowie die min. geforderten Werte bezüglich des Brennstoffes Methan

wurden in das Pflichtenheft für die Gasaufbereitung übernommen. Die Werte basieren vor allem auf der langjährigen Erfahrung der Herstellerfirma *ONSI* im Bau und Betrieb von - mit Erdgas, sowie mit Biogas aus Reaktordeponien und kommunalen wie industriellen Abwasserreinigungsanlagen betriebenen - Brennstoffzellen-Anlagen, und können deshalb als korrekt bzw. vertrauenswürdig angenommen werden.

8.3 Gasaufbereitungsanlage

Technik:

Weder von *SIG/Genf* noch von *EREP S.A./Aclens* wurden technische Einwände erhoben gegen die Auslegung der Gasaufbereitungsanlage von *Carbotech*, wie sie in Kap.7 und im Anhang 5, 6 beschrieben ist.

Die langjährige Erfahrung der Herstellerfirma Carbotech bietet unseres Erachtens eine gute Gewähr dafür, dass die von ihr in unserem Projekt vorgeschlagene Gasaufbereitungsanlage bezüglich der Gasaufbereitung die Funktionstüchtigkeit der BZ sicherstellen kann.

Kostenschätzung:

Bei der Bestimmung insbesondere des Chlorgehaltes der **Ist-Gas**-Proben ergaben sich analytische Unsicherheiten und eine grosse Streuung der Werte. Zur Auslegung der Gasreinigung wurden die gefundenen **Maximalwerte** angenommen.

Diese Worstcase-Annahme hat gemäss Aussage des Herstellers jedoch keinen nennenswerten Einfluss auf die Kosten der Gasaufbereitungsanlage, da die kostenrelevanten Anlagenteile vom Gesamt-Gasvolumenstrom bestimmt werden.

Auch eine allfällige **Entschärfung** der **Soll-Gas**-Anforderungen hätte aus dem selben Grund keinen kostensenkenden Einfluss. Eine solche wird überdies vom Hersteller der Brennstoffzelle grundsätzlich abgelehnt, da sie eine nicht kalkulierbare Beeinträchtigung der Lebensdauer der Brennstoffzelle zur Folge hätte, und auch keine Garantieaussagen möglich wären.

Die Brennstoffzelle alleine kostet heute inkl. Engineering ca. 1 Mio CHF. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Kosten in den nächsten 1-2 Jahren um ca. 30% sinken, sodass letztlich die Systemkosten einer kompletten Brennstoffzellenanlage inkl. Gasaufbereitung in nächster Zukunft unter 1 Mio CHF liegen werden.

9. Schlussfolgerungen, Empfehlungen

Die Projektziele gemäss Studienantrag, bzw. gemäss Kap.3 *Fragestellung, Zielsetzung der Vorstudie*, wurden erreicht. Insbesondere konnte ein Standardgas definiert und basierend darauf die Gasaufbereitung technisch und kostenmässig bestimmt werden.

Projektziele:

- Definition Ist-Gas
- Definition Soll-Gas
- Festlegung der Gasaufbereitung

Definition Ist-Gas:

Aus den verfügbaren Altanalysen sowie zahlreichen für dieses Projekt durchgeführten Biogasbestimmungen konnten die prozessrelevanten Biogasbestandteile in ausreichender Genauigkeit eruiert werden. Bei Unsicherheiten in der Analytik wurde der Worst-Case angenommen.

Definition Soll-Gas:

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde ein Soll-Gas definiert, welches einen störungsfreien Anlagenbetrieb sowie lange Standzeiten gewährleistet.

Festlegung der Gasaufbereitung:

Aufgrund von Ist- und Soll-Gas ist die Gasaufbereitung festgelegt worden. Die in der Biogasaufbereitung sehr erfahrene Firma Carbotech/Essen garantiert die Einhaltung der gestellten Vorgaben. Als Nebeneffekt wird zusätzlich eine Methananreicherung von ca. 55 auf 70% erzielt.

Kosten der Gasaufbereitung:

Die Kosten der Gasaufbereitungsanlage betragen ca. 200'000 CHF.

Weiteres Vorgehen:

Aufgrund der ermutigenden Resultate dieser Vorstudie sind wir der Auffassung, dass das Projekt wie vorgesehen weiter verfolgt werden muss.

Es wird daher umgehend der Antrag zur Durchführung der Folgeprojektphase eingereicht, der Ausarbeitung der eigentlichen Projektierungsunterlagen, mit dem Ziel, die P+D-Anlage 1998 zu realisieren und anschliessend den Betrieb über einen gewisse Dauer wissenschaftlich zu begleiten.

ANHANG

- A1 • Abstract Study Report
 • Kurzfassung Studienbericht
- A2 Kurzspezifikationen Vergärungsanlagen
- A3 • Tabelle IST-Gas-Bestimmung
 • Diagramme zum saisonalen Verlauf der Gaszusammensetzung
- A4 Tabelle SOLL-Gas-Bestimmung / Pflichtenheft Gasaufbereitungsanlage
- A5 Blockschema Gasaufbereitungsanlage
- A6 Angebot/Anlagenbeschrieb Gasaufbereitungsanlage
- A7 Literatur

A1

- **Abstract Study Report**
- **Kurzfassung Studienbericht**

Abstract

of the final report to the

Feasibility study:

Industrial application of fuel cells for the utilization of biogas out of organic waste fermentation plants

It is planned to install a 200 kWel ONSI PAFC fuel cell on the Swiss organic waste fermentation plant *Allmig/Baar*. This fuel cell plant shall be realized as a P+D-Project with the support of the *BEW Swiss energy authority*.

Targets of the study:

- Composition of the biogas
- Needed composition of the biogas for the fuel cell
- Technical feasibility and costs for the gas pretreatment plant

Results:

The targets of the study have been reached.

Cl-, S- and N-compounds must be separated from the biogas. They interfere with the catalytic process of the reformer. It is not necessary to concentrate the methane in the gas.

There occurred problems during Cl-analysis which result in a wide range of values. To avoid problems with the life time of the fuel cell, the pretreatment of the gas is designed for worst case. This precaution measure will not be essential to the costs of the plant for they are given primary by the flowrate of the gas and not by the concentration of the components.

The pretreatment of the biogas before feeding it into the fuel cell is technically possible.

It costs ca. CHF 200'000.

A welcome side effect is the enrichment of methane from ca. 55% to 70%.

Further steps:

We recommend to continue the foreseen project steps. We will now apply for the planning and projection phase, with the goal to realise the P+D-plant in 1998.

Verfasser: Probag Umwelttechnik AG
Rütistr.3
5400 Baden

July 1997

Auftraggeber: BEW Bundesamt für Energiewirtschaft
3003 Bern

Zusammenfassung des Schlussberichtes zur

Vorstudie:

Machbarkeitsstudie über die industrielle Anwendung von Brennstoffzellen zur Verwertung von Biogas aus Abfallvergärungsanlagen

Zur Verwertung des Biogases auf der schweizerischen Abfallvergärungsanlage *Allmig/Baar* ist geplant, eine PAFC-Brennstoffzelle des Typs ONSI mit einer elektrischen Leistung von 200 kW zu installieren, dies als P+D-Anlage mit Unterstützung durch das BEW Schweiz. Bundesamt für Energiewirtschaft.

Ziel:

Ziel dieser Machbarkeitsstudie ist die Beantwortung folgender Fragen:

- Zusammensetzung des Biogases (Ist-Gas)
- Anforderungen an das gereinigte Biogas (Soll-Gas)
- Technische Machbarkeit und Kostenschätzung der Gasaufbereitung.

Resultate:

Die Ziele der Studie wurden erreicht.

- Chlor- Schwefel- und Stickstoffverbindungen (Ammoniak) müssen aus dem Rohgas entfernt werden, da diese den Reformer der Brennstoffzelle sowie die Lebensdauer des Stacks beeinträchtigen (Katalysatorgifte).
- Eine Methananreicherung ist nicht prozessnotwendig.
- Die Reinigung des Biogases ist technisch lösbar.
- Bei der Bestimmung des Chlorgehaltes der Ist-Gas-Proben ergaben sich analytische Unsicherheiten und eine grosse Streuung der Werte. Zur Auslegung der Gasreinigung wurden die gefundenen Maximalwerte angenommen. Diese Worstcase-Annahme hat gemäss Aussage des Herstellers jedoch keinen nennenswerten Einfluss auf die Kosten der Gasaufbereitungsanlage, da die kostenrelevanten Anlagenteile vom Gesamt-Gasvolumenstrom und nicht von der Konzentration der Gaskomponenten bestimmt werden. Auch eine allfällige Entschärfung der Soll-Gas-Anforderungen hätte aus dem selben Grund keinen kostensenkenden Einfluss, und wird vom Hersteller der Brennstoffzelle grundsätzlich abgelehnt (nicht kalkulierbare Beeinträchtigung der Lebensdauer der Brennstoffzelle).
- Die entsprechende Gasaufbereitungsanlage kostet ca. CHF 200'000.- und ergibt als erwünschter Nebeneffekt eine Methananreicherung von ca. 55 auf 70% Anteil im Biogas.

Ausblick:

Nachdem die offenen Fragen mit dieser Vorstudie geklärt werden konnten, scheint es sinnvoll, das Projekt rasch weiterzuverfolgen.

Der Verfasser wird die nächste Projektphase, die planerische Projektierung der P+D-Anlage beantragen, mit dem Ziel, die Anlage 1998 zu realisieren und in Betrieb zu nehmen.

Verfasser: Probag Umwelttechnik AG
Rütistr.3
5400 Baden

Juli 1997

Auftraggeber: BEW Bundesamt für Energiewirtschaft
3003 Bern

A2

Kurzspezifikationen Vergärungsanlagen

Kurzspezifikationen von in der Studie erwähnten Vergärungsanlagen

Allmig/Baar ZG:

- Verfahren BRV
- Einstufig
- Feststoff-/Trockenvergärung von biogenen Siedlungsabfällen
- Liegender Fermenter
- Thermophiler Arbeitsbereich
- Kapazität 6000 t/a
- Kontinuierliches Verfahren

Kompogas/Rümlang ZH:

- Verfahren Kompogas
- Einstufig
- Feststoff-/Trockenvergärung von biogenen Siedlungsabfällen
- Liegender Fermenter
- Thermophiler Arbeitsbereich
- Kapazität 5000 t/a
- Kontinuierliches Verfahren

ROM-Opur/Kefikon TG:

- Verfahren ROM-Opur
- Mehrstufig
- Nass-/Feststoffvergärung von biogenen Siedlungsabfällen
- Stehende Fermenter
- Thermophiler Arbeitsbereich
- Kapazität 2500 t/a
- Quasikontinuierliches Verfahren

Dranco/Salzburg A:

- Verfahren Dranco
- Einstufig
- Trocken-/Feststoffvergärung von biogenen Siedlungsabfällen
- Stehender Fermenter
- Thermophiler Arbeitsbereich
- Kapazität 20'000 t/a
- Semikontinuierliches Verfahren

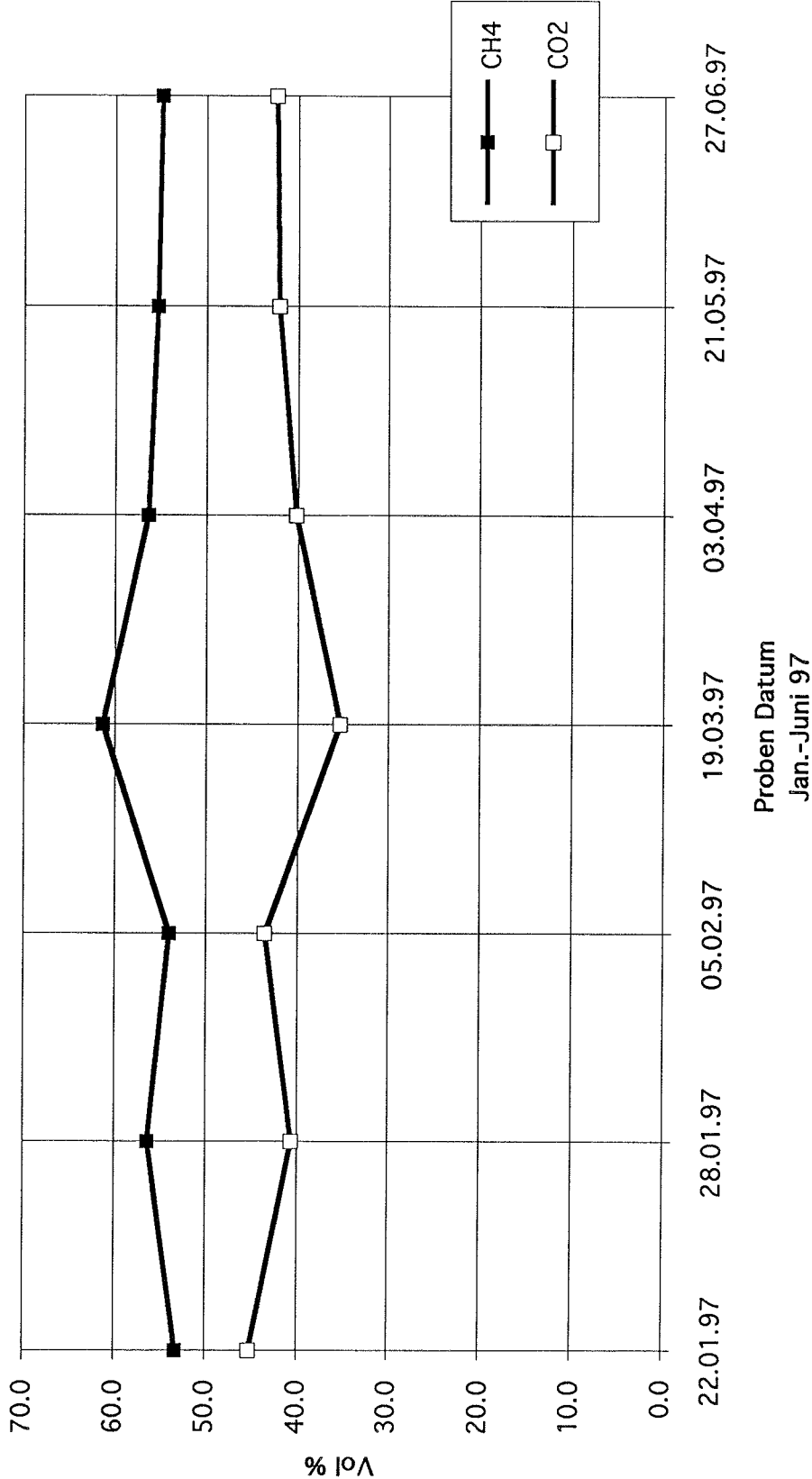
Valorga/Tilburg NL:

- Verfahren Valorga
- Einstufig
- Trocken-/Feststoffvergärung von biogenen Siedlungsabfällen
- Stehender Fermenter
- Mesophiler Arbeitsbereich
- Kapazität 52'000 t/a
- Semikontinuierliches Verfahren

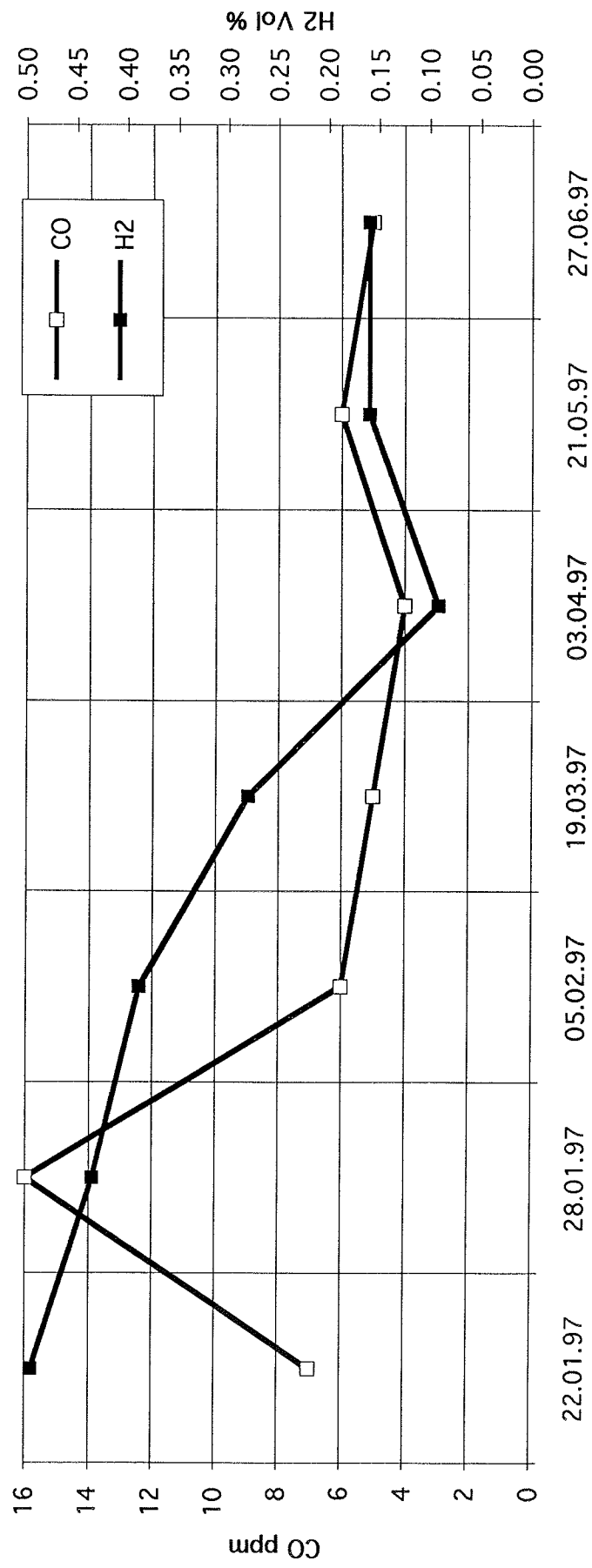
A3

- **Tabelle IST-Gas-Bestimmung**
- **Diagramme zum saisonalen Verlauf der Gaszusammensetzung**

Saisonaler Verlauf der Biogaszusammensetzung
Vergärungsanlage Allmig

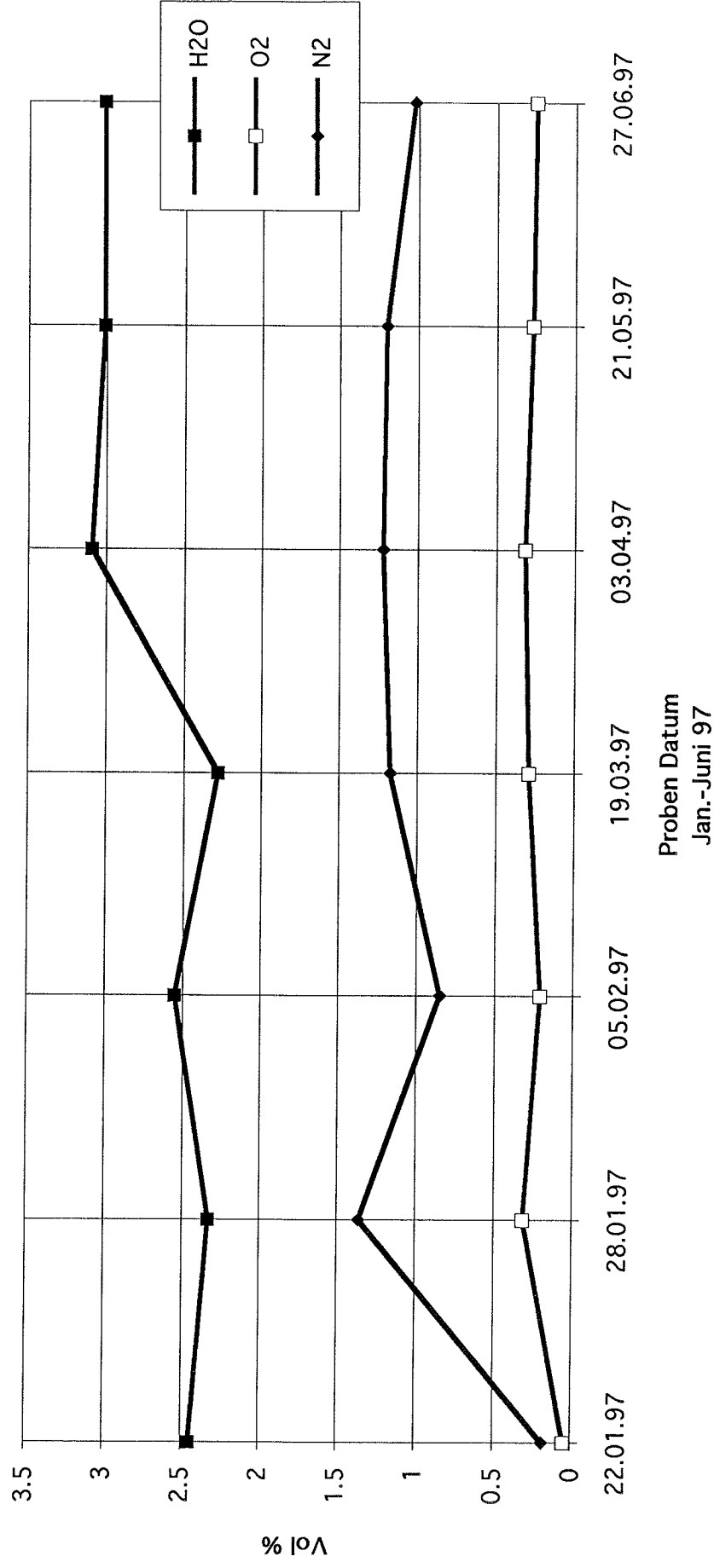


Saisonaler Verlauf der Biogaszusammensetzung Vergärungsanlage Allmig

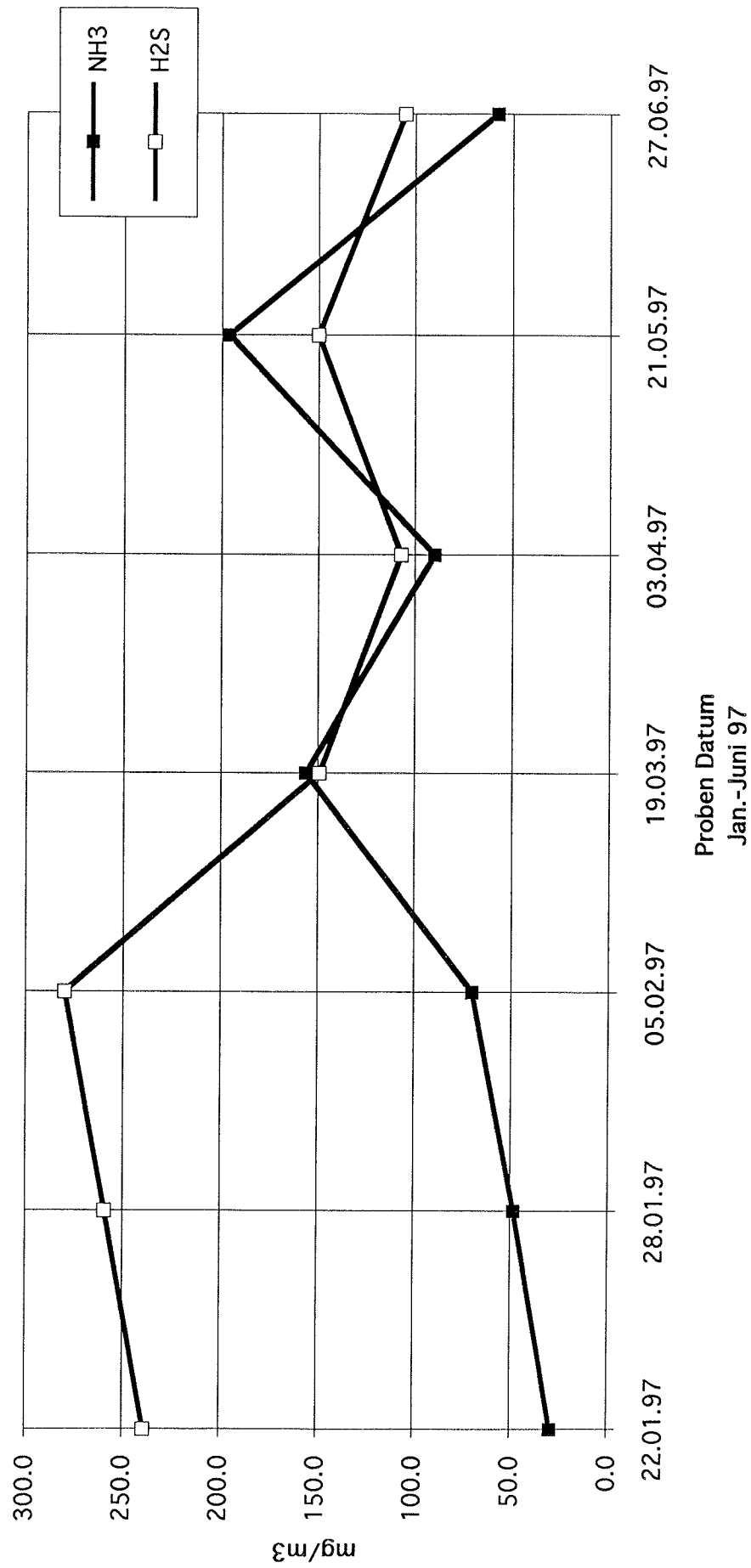


Proben Datum
Jan.-Juni 97

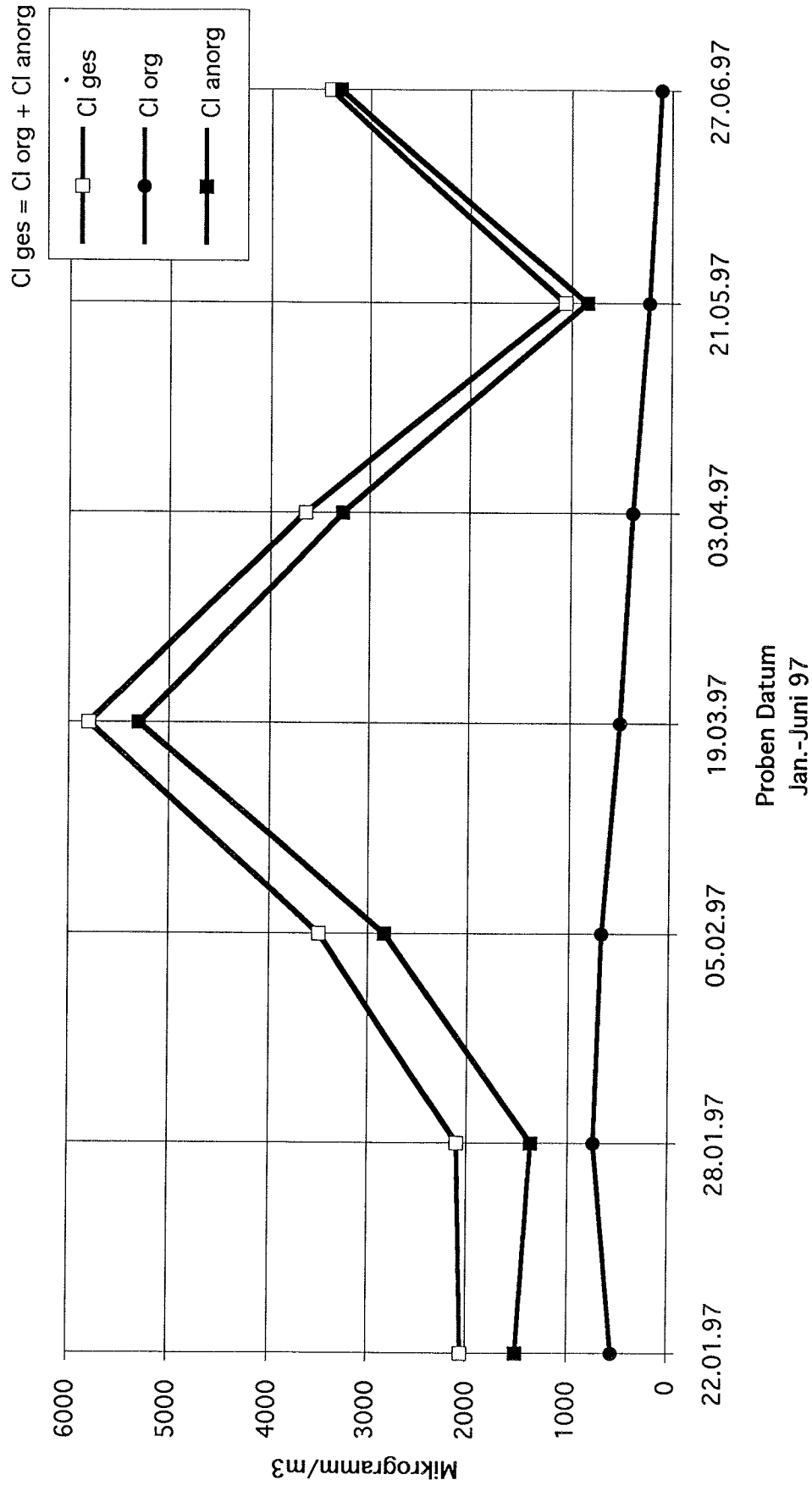
Saisonaler Verlauf der Biogaszusammensetzung Vergärungsanlage Allmig



Saisonaler Verlauf der Biogaszusammensetzung Vergärungsanlage Allmig



Saisonaler Verlauf der Biogaszusammensetzung Vergärungsanlage Allmig



A4

Tabelle SOLL-Gas-Bestimmung / Pflichtenheft Gasaufbereitungsanlage

SOLL-GAS-Bestimmung:

Soll-Werte von Biogas aus Abfallvergärungsanlagen zur Einspeisung in die BZ SIG/ONSI PC25C

Pflichtenheft für die Auslegung der Gasaufbereitungsanlage

Probag/Sot, 11.7.97

STOFFE	IST-Gas		Altproben Plausibilität 2)	SOLL-Gas	Bemerkungen, notwendige Gasbehandlung
	gem. Neuproben 1)				
	Istwert Ø	BB	Tendenz	Sollwert	
CH4					ok
Vol%	55.8	53.2-61.3	~	>50	
CO2					ok
Vol%	41.3	35.3-45.2	~	<50	
CO					keine Vorgabe
ppm	7.0	2.0-16.0	*		
H2					keine Vorgabe
Vol%	0.23	0.02-0.49	↓↓ 3)		
H2O					keine Vorgabe
g/m3	21.9	18.4-25.0	↑ 4)		
O2					Herabsetzung O2-Gehalt
Vol%	0.27	0.05-0.44	↑↑ 4)	<0.2	
N2					ok
Vol%	1.11	0.19-1.85	↑↑ 4)	<4	
NH3					Entfernung
ppmv	107.9	5-276	↑	<1	
mg/m3	76.5	3.3.-196	↑		
Sges 5)					Herabsetzung/Entfernung
ppmv				Spitzenwert 30, Ø=6	
H2S					
roh					
ppmv	111.4	13-199	↑		
mg/m3	157.2	18-280	↑		
nach ES					
ppmv	23	12.0-34.0	*		
mg/m3	33	17.0-48.0	*		
Srest					
roh					
mg/m3	2.2	1.0-5.7	*		
nach ES					
mg/m3	<1	<1-<1	*		
Clges 6)					Entfernung
ppmw				<0.05 ppmw (weight)	
µg/m3	<3387	314-<10200	↓↓		
Clorg					
µg/m3	<436	<100-740	*		
Clanorg					
µg/m3	<2693	<100-9700	*		
LCKW					keine Vorgabe
µg/m3	<40.3	<1-115	↓		
Aufbereitetes Biogas: Input in BZ für 200 kWel					
Flowrate Gas bei 55% CH4:				[m3/h]	82
Speisedruck Gas:				[mbar]	10 bis 35

Bemerkungen:

- BZ Brennstoffzelle
- Ø Durchschnitt
- BB Bandbreite
- ES Entschwefelungsanlage (bauseits vorhanden)
- ppmv ppm volume
- ppmw ppm weight
- *) bei Altproben Werte nicht erhoben
- ~) vergleichbare Werte
- ↑ Altproben höhere Werte
- ↓ Altproben tiefere Werte

1) siehe Tabelle "IST-GAS-Bestimmung": Felder IST-Gas, Zusammenfassung Einzelproben neu

2) siehe Tabelle "IST-GAS-Bestimmung": Felder Zusammenfassung Einzel- und Sammelproben alt

3) nur 1 Altprobe, nicht repräsentativ

4) unüblich hohe Werte Altproben, evtl. durch Leckluft (ungültig)?

5) Sges=S(H2S)+Srest

6) ohne LCKW

A5

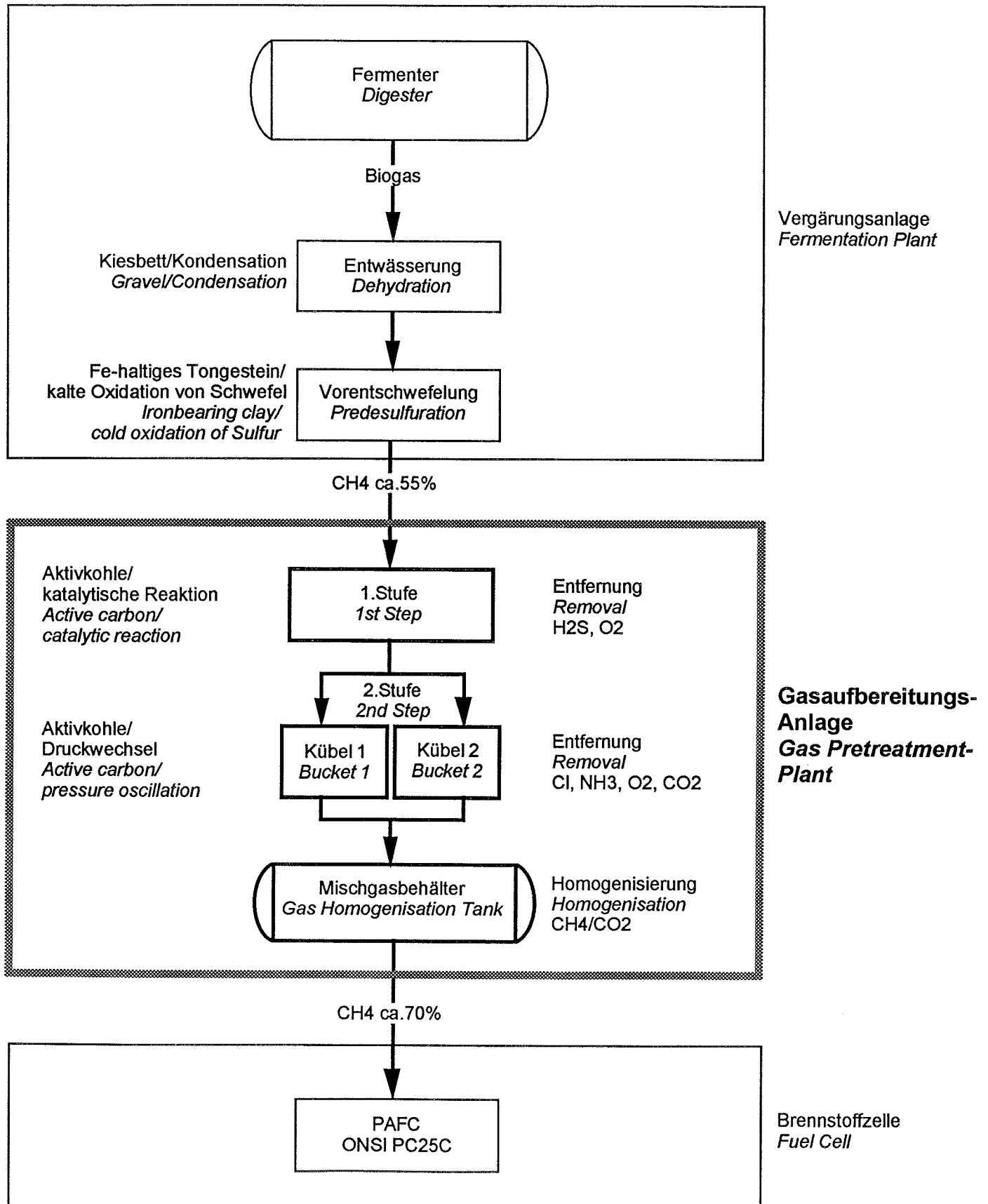
Blockschema Gasaufbereitungsanlage

Blockschema

Gasaufbereitungsanlage Carbotech

Gas Pretreatment Plant Carbotech

Probag/Sot, 20.6.97





CarboTech Anlagenbau GmbH

CarboTech-Anlagenbau GmbH · Postfach 13 01 40 · D-45291 Essen

probag Umwelttechnik AG
z.H. Herrn H. Schöttl
Rütistraße 3

CH - 5400 Baden
Telefax-Nr.: 0041 1 831 10 20

Ein Unternehmen der
CUBIS-Gruppe

Franz-Fischer-Weg 51
D-45307 Essen
Telefon 02 01 / 172-04
Telefax 02 01 / 172-1382



Geschäftsführung:
Prof. Dr.-Ing. Karl Knoßlauch
Dr.-Ing. Kai Krabiell

Bankverbindung:
Commerzbank AG Essen
Nr. 4 300 992 (BLZ 360 400 39)

Sitz der Gesellschaft: Essen
Amtsgericht Essen HRB 9850

Unser Zeichen	CT-AN/Gi-Co
Ihr Ansprechpartner	Herr Giessler
Telefon	0201 / 172 1937
Telefax	0201 / 172 1382
Datum	04.06.1997

Unsere Angebots-Nr.: CAE 70603

Sehr geehrter Herr Schöttl,

bezüglich der Fragen in Ihrem Fax vom 26.05.1997 zum Projekt „BEW Biogas für Brennstoffzellen“ und der damit verbundenen Biogasreinigung, möchten wir Ihnen folgendes mitteilen:

Die uns vorliegende Analyse des zu reinigenden Biogases enthält 4 Gaskomponenten (O_2 / NH_3 / Cl / H_2S) die entfernt bzw. abgereichert werden sollen. Erforderlich wird in diesem Falle eine Anlage bestehend aus 3 Behältern die mit verschiedenen Trennmaterialien gefüllt sind. Diese 3-Behälter-Version ist eine 2-stufige Reinigungsanlage und garantiert einen kontinuierlichen Betrieb über einen Zeitraum von mehr als 8.500 h / a bezogen auf die Standzeit der Trennmaterialien.

Die 1. Stufe ist eine H_2S -Feinreinigung und wird notwendig, da ansonsten durch die Anwesenheit von O_2 die restlichen Anteile von H_2S zu elementarem Schwefel katalytisch umgesetzt werden und damit die Kapazität der in Stufe 2 befindlichen Trennmaterialien mindert. Gleichzeitig werden aber Verunreinigungen wie z.B. leichte Öle gebunden die nicht aufgeführt sind, jedoch in Spuren meist vorhanden sind.

Die 2. Stufe zur Entfernung von Chlor und Ammoniak besteht aus 2 Behältern die parallel und zyklisch betrieben werden.

Im Gegensatz zur Chlorabscheidung, dieser Vorgang ist irreversibel, erfolgt die Ammoniakabscheidung (NH_3), adsorptiv und ist reversibel, denn das Adsorptionsmittel wird anschließend mittels Unterdruck regeneriert, indem die adsorptiv gebundenen Komponenten desorbieren und als Abgas anfallen. Dieser Vorgang in der 2. Stufe läuft wie beschrieben zyklisch ab, d.h., es erfolgt mehrmals pro Stunde eine Behälterumschaltung. Durch diesen zyklischen Betrieb der 2. Stufe erfolgt zwangsläufig eine Erhöhung des Methangehaltes, da während der Beladung und Abscheidung des NH_3 sich keine Gleichgewichtsbeladung einstellen kann (sonst NH_3 - Durchbruch) und somit verbleibt adsorptiv ein Teil des Kohlendioxid auf dem Trennmaterial und wird später bei der Regeneration des Trennmaterials desorbiert und ebenfalls als Abgas anfallen.

Diese Vorgänge werden mittels einer SPS automatisch gesteuert und eventuelle Störungen in einer Verriegelungskette berücksichtigt.

Die beschriebene Reinigungsanlage ist komplett auf einen Grundrahmen montiert, verrohrt und elektrisch verdrahtet. Anlageninterne elektrische Bauteile sind in Ex ausgeführt, nicht in Ex ist der Steuerkasten. Ein Mischgasbehälter ist nicht im Richtpreis enthalten.

A6

Angebot/Anlagenbeschrieb Gasaufbereitungsanlage

Der Richtpreis der Reinigungsanlage frei Essen beträgt **200.000,-- DM**

Als alternative zu der genannten Reinigungsanlage bieten wir Ihnen eine Druckwechselanlage zur Anreicherung des Methans auf ≥ 95 Vol.-% bei gleichzeitiger Reinigung zu einem Richtpreis von **420.000,-- DM** frei Essen an.

Die Abmessungen der Reinigungsanlage liegen bei etwas 3,0 x 2,0 x 2,0 m (LxBxH).
Das Gesamtgewicht liegt bei ca. 2.000 kg.

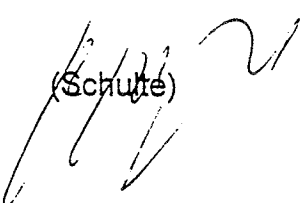
Die elektrische Anschlußleistung der Reinigungsanlage beträgt ca. 7 kW
(380 V / 50 Hz).

Die Lieferzeit der Reinigungsanlage beträgt ca. 5 Monate.

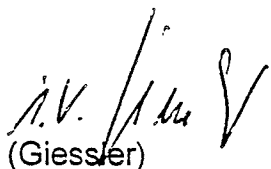
Wir hoffen, diese Angaben helfen Ihnen im Moment weiter. Für Rückfragen stehen wir Ihnen selbstverständlich gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

CarboTech-Anlagenbau GmbH



(Schulte)



(Giessler)

el.

CarboTech-Anlagenbau GmbH · Postfach 13 01 40 · D-45291 Essen

probag Umwelttechnik AG
z.H. Herrn Herbert Schöttl
Rütistraße 3
CH - 5400 Baden
Telefax-Nr.: 0041 1 831 10 20

Ein Unternehmen der
CUBIS-Gruppe

Franz-Fischer-Weg 61
D-45307 Essen
Telefon 02 01 / 172-04
Telefax 02 01 / 172-1382



Geschäftsführung:
Prof. Dr.-Ing. Karl Knoblauch
Dr.-Ing. Kai Krabiell

Bankverbindung:
Commerzbank AG Essen
Nr. 4 300 992 (BLZ 360 400 39)

Sitz der Gesellschaft: Essen
Amtsgericht Essen HRB 9850

Unser Zeichen	CT-AN/Gi-Co
Ihr Ansprechpartner	Herr Giessler
Telefon	0201 / 172 1937
Telefax	0201 / 172 1382
Datum	X 17.06.1997

Sehr geehrter Herr Schöttl,

bezüglich Ihrer Fragen zu unserem Angebot CAE 70603 einer Anlage zur Reinigung von Biogas und Ihrem Telefongespräch mit unserem Herrn Giessler möchten wir Ihnen folgendes mitteilen.

Frage 1: Es wird in der 1. Stufe Schwefelwasserstoff in Verbindung mit Sauerstoff katalytisch zu elementarem Schwefel umgesetzt. Die Auslegung der Katalysatorfüllung hat nach Daten Ihrer Gasanalyse eine Standzeit von ca. 2 Jahren, so daß ca. 75 kg Katalysatormaterial pro Jahr entsorgt werden müssen.

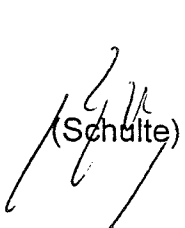
Frage 2: Beantwortet durch Frage 1.

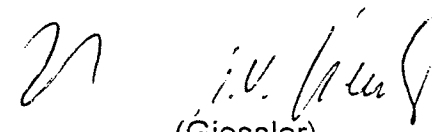
- Frage 3: Der Methangehalt wird auf ca. 70 ± 5 Vol.-% ansteigen, da eine Kohlendioxidadsorption (CO_2) nicht zu vermeiden ist. Dieser Anstieg der Methankonzentration verläuft aber nicht gleichmäßig, d.h. zu Beginn der Beladung der parallel gefahrenen Behälter der 2. Stufe fällt eine sehr hohe Methankonzentration an, die während der Beladung fällt, da Kohlendioxid durchbricht. Dieser Verlauf der Methankonzentration erfordert einen Behälter zur Vergleichmäßigung des Gases. Die Kosten belaufen sich auf ca. 8.000,-- DM.
- Frage 4: Beantwortet durch Frage 3.
- Frage 5: Die angegebenen Abmessungen sowie Gewicht und Anschlußleistung beziehen sich auf die Reinigungsanlage wie beschrieben.
- Frage 6: ca. 75 kg pro Jahr Katalysatormaterial aus der H_2S Feinreinigung
ca. 75 kg pro Jahr Katalysatormaterial aus der Chlorabscheidung.
Diese Zahlen gelten unter der Voraussetzung der uns vorliegenden Gasanalyse.

Wir hoffen, diese Angaben entsprechen Ihrer Vorstellung. Für Rückfragen stehen wir Ihnen selbstverständlich gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

CarboTech-Anlagenbau GmbH


(Schulte)


(Giessler)

A7

Literatur

Literatur

- [1] BEW Forschungsprogramm *Piles à combustible*.
Zahlreiche bisherige Studien gemäss
• Rapports annuels 1995, Projekte Nr. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 14, 15
• Rapports annuels 1996, Projekte Nr. 1-7
- [2] Nguyen D.Lan, SIG Services Industriels Genève
BEW Projet GAZEL-SIG Pile à combustible au gaz naturel 95, 96, 97
- [3] Ascoli A., Univ. Mailand, 96:
PAFC fed by biogas produced by the anaerobic fermentation of the waste waters of a beet-sugar refinery
- [4] Trocciola J.C., IFC/ONSI/USA und Spiegel R.J., US E.P.A., 95:
Utilization and control of landfill methane by fuel cells.
- [5] Toshiba Corporation, Tokyo/Yokohama, 96:
FCPP Application to utilize anaerobic digester gas
- [6] FCN Nr.3/96, Fuel Cell Institut/Washington
- [7] Vergärung biogener Abfälle aus Haushalt, Industrie und Landschaftspflege, arbi&probag 91,
BEW Schriftreihe Nr.47