

REN  
(E.M.)



Bundesamt für Energiewirtschaft  
Office fédéral de l'énergie  
Ufficio federale dell'energia  
Uffizi federal da l'energia

Best. Nr. 30771

Programm Biomasse

1038 / 1038

**Bericht Projektdossier**  
Bitte diesen Bericht nicht entnehmen!  
Bei Verwendung:  
Bericht bei ENET anfordern.

# Kompo-Mobil

## Biogasnutzung in Fahrzeugen

ausgearbeitet durch:  
**Nova Energie, Tänikon**

im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energiewirtschaft**

September 1997

Schlussbericht

# **Kompo-Mobil**

## **Biogasnutzung in Fahrzeugen**

### **Schlussbericht**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Kompo-Mobil I (Anlage Rümlang)</b>	
<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>1. Zielsetzung des Projektes</b>	<b>8</b>
<b>2. Gasaufbereitung</b>	<b>8</b>
2.1 Evaluation Aufbereitungsanlage	
2.2 Anlagenbeschrieb	
2.3 Messungen	
2.4 Gasqualität	
2.5 Energiebedarf	
2.6 Betrieb der Anlage	
2.7 Kosten	
<b>3. Fahrzeuge</b>	<b>17</b>
3.1 Personenwagen	
3.2 Lastkraftwagen	
<b>4. Substitution fossiler Energieträger</b>	<b>26</b>
<b>5. Zielerreichung des Projektes</b>	<b>26</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>28</b>
<b>Kompo-Mobil II (Anlage Bachenbülach)</b>	
<b>Zusammenfassung</b>	<b>29</b>
<b>1. Zielsetzung des Projektes</b>	<b>32</b>
<b>2. Gasaufbereitung</b>	<b>32</b>
2.1 Evaluation der Aufbereitungsanlage	
2.2 Anlagenbeschrieb	
2.3 Messungen	
2.4 Gasqualität	
2.5 Energiebedarf	
2.6 Betrieb und Optimierung der Anlage	
2.7 Kosten	
<b>3. Vergleich von Autogas mit Wärme-Kraft-Kopplung</b>	<b>41</b>
3.1 Wärme-Kraft-Kopplung in Bachenbülach	
3.2 Wirtschaftlichkeit von Autogas und Wärme-Kraft-Kopplung	
<b>4. Substitution fossiler Energieträger</b>	<b>44</b>
<b>5. Zielerreichung des Projektes</b>	<b>44</b>
<b>6. Ausblick</b>	<b>45</b>

## Einleitung

Der vorliegende Bericht rapportiert die Resultate der beiden Projekte Kompo-Mobil I und Kompo-Mobil II.

Kompo-Mobil I hatte zum Ziel, technische Apparate für die Gasreinigung, die Kompression und die Lagerung von Biogas aus der Kompogasanlage Rüm- lang zu evaluieren und zu testen. Im weiteren sollten benzinbetriebene Per- sonenwagen und dieselbetriebene Lastwagen für den Biogasbetrieb umge- rüstet werden.

Die Gasaufbereitungsanlage mit einer Leistung von  $12 \text{ Nm}^3/\text{h}$  konnte im Herbst 1993 in Betrieb genommen werden. Messungen an der Anlage zeig- ten, dass die erwarteten Qualitätswerte ( $\text{CH}_4$ -, Wasserdampf- und Schwefel- wasserstoffgehalt) knapp eingehalten werden konnten. Der Energiebedarf der gesamten Aufbereitung beläuft sich auf rund einen Drittel des Heizwertes des aufbereiteten Methangases.

Sechs Personenwagen sind auf Methanbetrieb umgerüstet worden und leg- ten während der dreijährigen Projektdauer 80'000 km mit Biogas als Treib- stoff zurück. Ein mit einem Gasmotor ausgerüsteter LKW legte 40'000 km mit Methangas zurück. Die Umrüstung der Fahrzeuge und der Betrieb mit aufbe- reitetem Biogas erweist sich als problemlos.

Das Ziel des Projektes Kompo-Mobil II bestand darin, die Leistungswerte der Aufbereitungsanlage zu erhöhen sowie den Energieverbrauch und die Inve- stitionskosten zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, ist gegenüber Kompo- Mobil I ein anderes Gasaufbereitungsverfahren eingesetzt worden: Moleku- larsiebtechnologie bei Kompo-Mobil II gegenüber Druckwasserwäsche bei Kompo-Mobil I. Die Gasaufbereitungsanlage Kompo-Mobil II ist bei der Kom- pogasanlage in Bachenbülach realisiert worden (Inbetriebnahme 1995).

Die Zielsetzungen konnten vollumfänglich erreicht werden. Die Investitions- kosten lagen trotz doppelter Leistung ( $26 \text{ Nm}^3/\text{h}$  aufbereitetes Biogas) um rund einen Drittel unter denjenigen von Kompo-Mobil I. Der Energieverbrauch der Aufbereitung konnte um mehr als zwei Drittel auf 8% vom Heizwert des aufbereiteten Gases gesenkt werden.

Die Schlussberichte der beiden Projekte Kompo-Mobil I und Kompo-Mobil II werden im vorliegenden Rapport ohne weitere Diskussions gemeinsam ver- öffentlicht. Die Berichte entsprechen den Fassungen wie sie bei Abschluss der Projekte vorlagen.

## **Abstract**

This report presents the results of two projects, the Kompo-Mobil I and the Kompo-Mobil II.

### **Kompo-Mobil I**

The aim of the Kompo-Mobil I was to test and evaluate the technical equipment used in the purification, compression and storage of biogas from the Rümplang Kompogas plant. In addition, petrol-powered cars and diesel-powered lorries were to be converted to run on biogas.

The process used at the gas conditioning plant in Rümplang was assessed on the basis of the required gas quality, the operating experience of other European plants and a comparison of investment costs. The process in question includes the adsorption of hydrogen sulphide on active coal, the removal of carbon dioxide by washing with pressurised water and the removal of water vapour using molecular sieve dryers. The plant has an output capacity of 12 nm<sup>3</sup> of methane gas per hour. The gas conditioning plant was commissioned in the autumn of 1993 and, in its three years of existence, around 20,000 m<sup>3</sup> of biogas have been conditioned and bottled during 1850 hours of operation.

Measurements taken at the plant have demonstrated that the water vapour content and the hydrogen sulphide content can be permanently lowered to less than 5 ppm. The methane content of the purified biogas reaches values of around 93%. The whole conditioning operation requires a substantial amount of energy, amounting to around a third of the calorific value of the conditioned methane gas.

Six cars were converted to methane operation and had covered 80,000 km running on biogas by the end of the project. The exhaust emission values recorded were typical for vehicles running on natural gas (low CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> values, but relatively high HC values). The vehicles' performance proved to be around 10% lower than that of petrol-driven vehicles, while the energy consumption, i.e. the actual gas consumption recorded, was comparable. With regular vehicle maintenance, the vehicle behaviour was not significantly different to that of petrol-powered vehicles. A heavy goods vehicle fitted with a gas-powered engine covered 40,000 km running on methane gas.

## **Kompo-Mobil II**

The aim of the Kompo-Mobil II project was to increase the performance values of the conditioning plant, while simultaneously reducing the associated energy consumption and investment costs. To achieve this goal, a different gas conditioning method from that of the Kompo-Mobil I was used, namely, molecular sieve technology for the Kompo-Mobil II, as against the pressurised water washing procedure used in the case of its predecessor. The Kompo-Mobil II gas conditioning plant was set up at the Kompogas plant in Bachenbülach (commissioned in 1995).

The most important features of the gas conditioning plant in Bachenbülach are its four-stage compressor (compression up to 250 bar), its fuel depot (44 pressurised containers, each with a capacity of 80 litres), its filling station and its purification plant. Molecular sieve technology (pressure swing adsorption) is used to remove the carbon dioxide. In the first stage of the procedure, the water vapour is condensed in a cold drier at approx. 4°C. Any remaining water vapour is adsorbed in the molecular sieve. The hydrogen sulphide is removed using active coal. The plant produces 26 nm<sup>3</sup> of methane gas per hour.

The Kompo-Mobil II project enabled the relevant quality-related and financial objectives to be achieved. The methane content in the conditioned biogas reaches values of 96% to 98%. The calorific value of approx. 35 MJ/nm<sup>3</sup> is somewhat higher than that of natural gas. The dew point of the conditioned biogas at ambient pressure is constantly lower than minus 65°C, and no hydrogen sulphide has been detected in the purified biogas.

The energy requirements for the conditioning process are around 20 kW of electricity per hour. This corresponds to 8% of the calorific value of the conditioned methane gas.

The investment costs for the entire conditioning plant amounted to approximately 660,000 CHF. Based on an assumed annual operation of 4500 hours, the specific costs are around 10 centimes per kWh gas. This compares with a price of 90 centimes per litre of petrol.

## **Conclusions**

As a result of the developments which have been helped on by the two Kompo-Mobil projects, tried and tested biogas conditioning plants are available today requiring little energy to produce good quality gas. The firms concerned are actively involved in the market and are directly implementing the experience thus acquired in the setting-up of new plants. In this way, the

two pilot plants in Rümlang and Bachenbülach have made a significant contribution to the increased use of biogas as a fuel.

## **Kompo-Mobil I**

Biogasnutzung in Fahrzeugen (Anlage Rümlang)

### **Zusammenfassung**

#### **Zielsetzung**

Die Zielsetzung des Projektes ist die Umstellung eines dieselbetriebenen Lastwagens und eines benzinbetriebenen Lieferwagens oder Personenwagens auf Biogasbetrieb mit entsprechenden Untersuchungen auf dem Prüfstand und im Praxisbetrieb. Neben dem eigentlichen Umbau der Motoren ist die Evaluation und der Test von technischen Apparaten zur Gasreinigung, Kompression und Lagerung des Biogases wichtiger Bestandteil des Projektes.

#### **Gasaufbereitungsanlage**

Das Verfahren für die Gasaufbereitungsanlage in Rümlang ist aufgrund der geforderten Gasqualität, der Betriebserfahrungen anderer europäischer Anlagen und anhand von Investitionskostenvergleichen evaluiert worden. Es umfasst die Komponenten Adsorption des Schwefelwasserstoffes an Aktivkohle, Druckwasserwäsche zur Entfernung des Kohlendioxids und Molekularsiebtrockner für die Entfernung des Wasserdampfes. Die Gasaufbereitungsanlage konnte im Herbst 1993 in Betrieb genommen werden. In den letzten drei Jahren sind während 1'850 Stunden rund 20'000 m<sup>3</sup> Biogas aufbereitet und in Flaschen abgefüllt worden.

Messungen an der Anlage zeigten, dass der Wasserdampfgehalt und der Schwefelwasserstoffgehalt konstant unter 5 ppm gesenkt werden können. Der Methangehalt des gereinigten Biogases erreicht Werte von rund 93%. Der Energiebedarf der gesamten Aufbereitung ist hoch. Er beläuft sich auf rund einen Drittel des Heizwertes des aufbereiteten Methangases.

#### **Fahrzeuge**

Sechs Personenwagen sind auf Methanbetrieb umgerüstet worden und legten während der Projektdauer 80'000 km mit Biogas als Treibstoff zurück. Die Abgas-Emissionen zeigen typische Werte für Erdgas-Fahrzeuge (tiefe CO- und NO<sub>x</sub>-Werte, eher hohe HC-Werte). Gegenüber dem Benzinbetrieb

verringert sich die Leistung der Fahrzeuge um rund 10%, während der Energieverbrauch, d.h. der in der Praxis gemessene Gasverbrauch, in vergleichbarer Grösse liegt. Bei regelmässiger Wartung der Fahrzeuge unterscheidet sich das Fahrverhalten nicht wesentlich vom Benzinbetrieb. Ein mit einem Gasmotor ausgerüsteter LKW legte 40'000 km mit Methangas zurück. Insgesamt sind in diesem Projekt rund 10'000 Liter Benzin und 20'000 Liter Diesel mit Biogas ersetzt worden.

## **Kompo-Mobil II**

Nicht zuletzt dank dem Projekt Kompo-Mobil I hat sich die Marktsituation bei den Anbietern in den letzten drei Jahren stark verändert. Dies ermöglicht es heute, Gasaufbereitungsanlagen mit garantierten Leistungswerten zu kaufen. Eine gleiche Entwicklung setzte bei den Fahrzeugherstellern ein. Während vor drei Jahren aufwendige Verhandlungen mit Motorenherstellern für den Umbau auf Methangas nötig waren, bieten heute einige Fahrzeughersteller standardmässig im Werk umgebaute Fahrzeuge zum Kauf an.

Aufgrund der Messungen, welche anfangs 1995 durchgeführt worden sind, zeigte sich, dass die Gasaufbereitungsanlage einen relativ hohen Prozess-Energieverbrauch aufweist und dass der Methan-Gehalt des aufbereiteten Gases mit der gewählten Technik (Druckwasserwäsche) nicht erhöht werden kann. Zu dieser Zeit befand sich die Kompogasanlage in Bachenbülach in Bau und sollte ebenfalls mit einer Gasaufbereitungsanlage ausgerüstet werden. Dies ermöglichte, die Erfahrungen von Kompo-Mobil I rasch in die Praxis umzusetzen.

Als Zielsetzungen von Kompo-Mobil II wurde ein Methangehalt von mindestens 96% und ein Prozess-Energiebedarf von rund 10% des aufbereiteten Methangases angestrebt. Die Investitionskosten sollten bei einer Anlage mit doppelter Durchsatzleistung um rund 20% niedriger ausfallen.

Die Gasaufbereitungsanlage mit der Tankstelle in Rümlang steht für die dort in Betrieb stehenden Fahrzeuge weiterhin zur Verfügung.

## **1. Zielsetzung des Projektes**

Die Zielsetzung des Projektes ist die Umstellung eines dieselbetriebenen Lastwagens (Abfallwagen) und eines benzinbetriebenen Lieferwagens (oder Personenwagen) auf Biogasbetrieb mit entsprechenden Untersuchungen auf dem Prüfstand und im Praxisbetrieb. Neben dem eigentlichen Umbau der Motoren ist die Evaluation und der Test von technischen Apparaten zur Gasreinigung, Kompression und Lagerung des Biogases wichtiger Bestandteil des Projektes.

## **2. Gasaufbereitung**

### **2.1 Evaluation Aufbereitungsanlage**

Damit eine möglichst hohe Energiedichte auf den Fahrzeugen erreicht wird, muss das Biogas in Druckflaschen abgefüllt werden. Dies wiederum bedingt eine hohe Reinheit des Gases, um Korrosionen in den Stahlflaschen zu vermeiden. Der Schwefelwasserstoffgehalt sollte unter 5 ppm liegen, und der Wasserdampfgehalt muss so gering sein, dass dieser in den Flaschen nicht kondensiert. Bei einem Abfülldruck von 250 bar und einer Umgebungstemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  entspricht dies einem Wasserdampfgehalt von höchstens 9 ppm. Der Taupunkt bei Umgebungsdruck liegt in diesem Fall bei  $-65^{\circ}\text{C}$ . Neben diesen sicherheitstechnischen Bedingungen wurde eine Gasqualität angestrebt, welche derjenigen von Erdgas möglichst ähnlich ist. Aus diesem Grunde ist auch die Entfernung des Kohlendioxides geplant worden.

Zu Beginn des Projektes sind die vorhandenen in- und ausländischen Projekte und Veröffentlichungen zu diesem Thema studiert worden. Es zeigte sich bald, dass seit den Entwicklungsarbeiten der Eidg. Forschungsanstalt in Tänikon aus den frühen achtziger Jahren [1, 2] nur wenige weitere Untersuchungen vorgenommen worden sind. In Neuseeland und insbesondere in Holland sind einige Gasaufbereitungsanlagen mit Deponiegas in Betrieb. Drei dieser Anlagen sind besucht worden.

In Holland sind in den letzten zehn Jahren fünf Anlagen auf Deponien mit verschiedenen Aufbereitungstechnologien zur Entfernung von Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Fluoriden und Chloriden erstellt worden. Die Anlagen werden von Gastec, dem holländischen Technologiezentrum der Gaswerke, betreut. Für die Entfernung des Kohlendioxids wird in einer Anlage die Druckwasserwäsche eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird das  $\text{CO}_2$  in einer Waschkolonne unter einem Druck von 5 bis 8 bar vom Wasser absorbiert.

Während der Entspannung des Wassers wird das CO<sub>2</sub> wieder freigesetzt. Zwei weitere Anlagen setzen die sogenannte "pressure swing adsorption" ein. Das CO<sub>2</sub> wird unter Druck (2 bis 6 bar) auf Molekularsieb adsorbiert. Durch Evakuieren der Kolonnen kann das CO<sub>2</sub> wieder desorbiert werden. Schwefelwasserstoff, Fluoride und Chloride werden bei allen vier Anlagen mit verschiedenen Aktivkohlen adsorbiert. Zwei weitere Anlagen sind mit halbdurchlässigen Membranen ausgerüstet, welche für Schwefelwasserstoff und CO<sub>2</sub> durchlässiger sind als für Methan. Bei allen Projekten gelangt das gereinigte Deponiegas unter einem Druck von gut 4 bar in die Erdgasleitung.

Im Vergleich zu der geplanten Anlage in Rümlang weisen diese holländischen Verfahren dreissig bis sechzig mal grössere Durchsatzleistungen auf. Hingegen ist die geforderte Gasqualität in Holland geringer, da das holländische Gas gegenüber dem schweizerischen einen niedrigeren Heizwert aufweist. Ebenso sind die Anforderungen an den Wasserdampfgehalt geringer, da in Holland nicht auf 250 bar verdichtet wird.

Aufgrund der geforderten Gasqualität, der Betriebserfahrungen in Holland, eigener Erfahrungen aus einem Projekt an der Eidg. Forschungsanstalt in Tänikon sowie einer Kostenschätzung der einzelnen Verfahren ist für Rümlang das Verfahren mit den Komponenten Adsorption des Schwefelwasserstoffes an Aktivkohle, Druckwasserwäsche zur Entfernung des Kohlendioxids und Molekularsiebtrockner für die Entfernung des Wasserdampfes gewählt worden.

Die Gasaufbereitungsanlage ist während des Sommers 1993 aufgrund einer Simulationsstudie [3] dimensioniert, geplant und im Herbst in Betrieb genommen worden. Am 5. November 1993 konnte erstmals ein Fahrzeug mit aufbereitetem Methangas getankt und gefahren werden.

## 2.2 Anlagenbeschrieb

Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Gasaufbereitungsanlage.

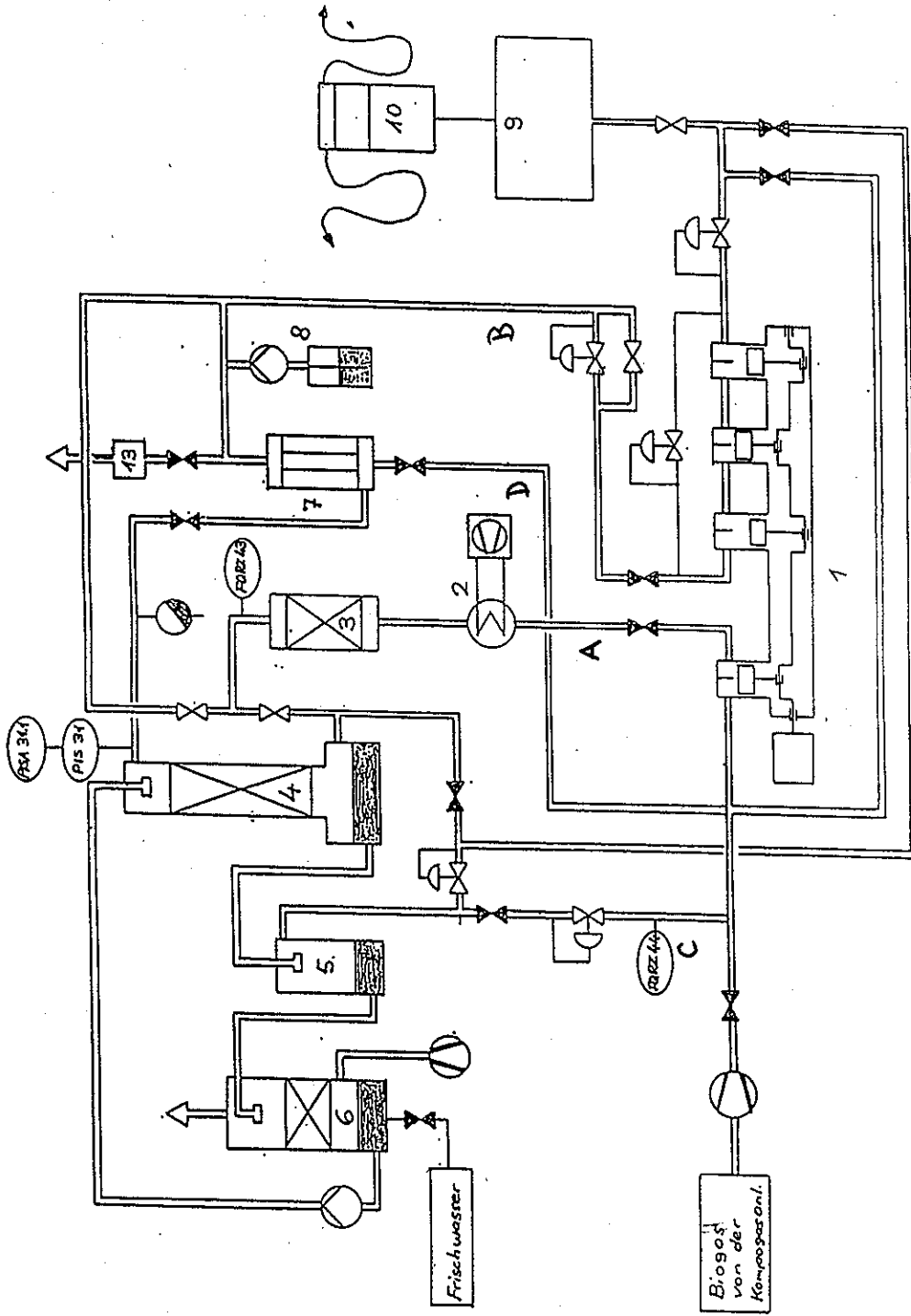
Das Biogas gelangt vom drucklosen Speicher der Kompogas-Anlage in den vierstufigen Kompressor (1), wo es in der ersten Stufe auf rund 6 bar verdichtet wird. Über den Kühler (2) fliesst das Biogas in eine mit Aktivkohle gefüllte Kolonne (3), in welcher der Schwefelwasserstoff entfernt wird. Die Waschkolonne (4) entfernt im Gegenstromverfahren das Kohlendioxid. Von hier strömt das Gas durch den Molekularsiebtrockner (7), in der das Biogas vom Wasserdampf befreit wird, und von dort zur zweiten Stufe des Kompressors. Aus Sicherheitsgründen wird zuvor ein Odorierungsmittel beigegeben

(8). Das gereinigte und auf 250 bar komprimierte Methangas wird in 15 Druckflaschen (9) mit je einer Kapazität von 50 Liter gelagert und kann an der Tankstelle (10) in die Fahrzeuge abgefüllt werden. Das mit CO<sub>2</sub> und geringen Methan-Mengen beladene Wasser aus der Waschkolonne wird zweistufig entspannt. In der ersten Stufe (5) wird bei 3 bar vor allem Methan freigesetzt, welches wieder zurückgeführt wird. In der Strippkolonne (6) wird bei Umgebungsdruck das CO<sub>2</sub> freigesetzt. Für einen optimalen Prozess wird Luft eingeblasen und etwas Frischwasser beigegeben.

Die wichtigsten Parameter (Methan-, Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Schwefelwasserstoffgehalt) werden online erfasst und auf einem Schreiber registriert. Bei Unter- oder Überschreiten der vorgegebenen Qualitätswerte wird die Anlage abgestellt. Damit kann eine konstante Qualität garantiert werden.

Die Aufbereitungsanlage ist in einem Norm-Container mit einer Länge von 6 Metern untergebracht. Die 8 Meter hohe CO<sub>2</sub>-Waschkolonne kann für einen allfälligen Transport demontiert werden. Die Gasflaschen für das Lager sind auf dem Dach des Containers montiert.

# Gasaufbereitung Kompo-Mobil



- 1 Kompressor
- 2 Kühler
- 3 H<sub>2</sub>S-Kolonne
- 4 CO<sub>2</sub> Waschkolonne
- 5 CH<sub>4</sub>-Flash
- 6 Stripper
- 7 Trockner
- 8 Odorierung
- 9 Druckspeicher
- 10 Tankstelle

Abbildung 1: Schema der Gasaufbereitungsanlage in Rümmlang

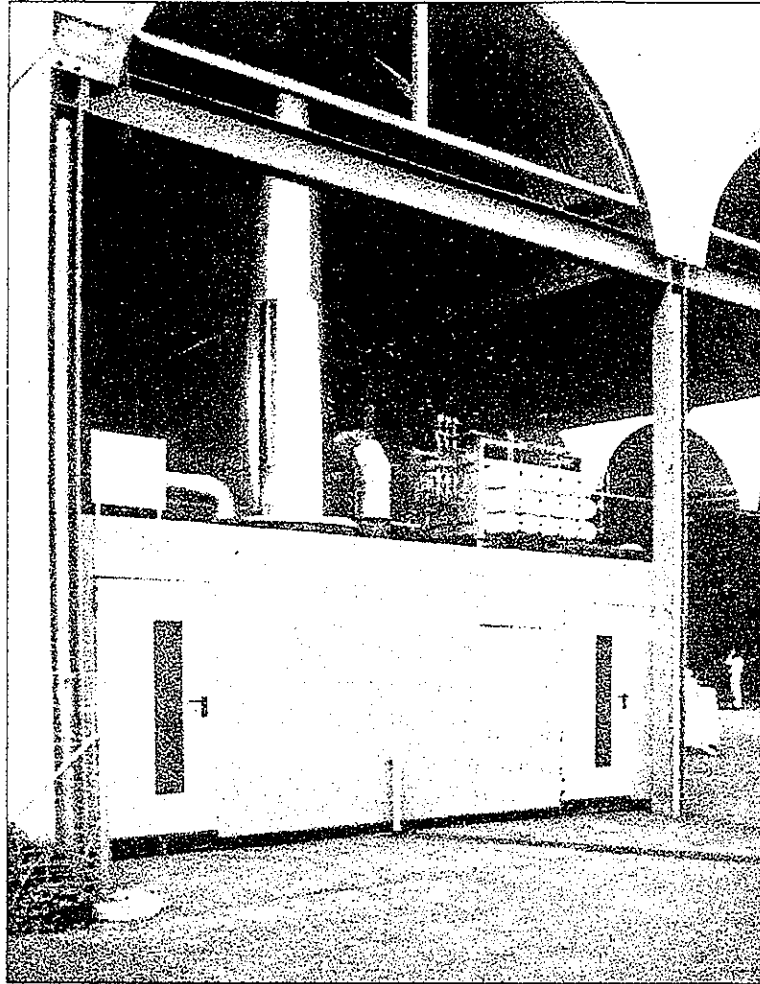


Abbildung 2: Container mit Gasaufbereitungsanlage



Abbildung 3: Tankstelle

## 2.3 Messungen

An vier Tagen sind detaillierte Messungen der Gasaufbereitungsanlage aufgezeichnet worden. Die Mittelwerte der einzelnen Tage (Messdauer 3 bis 5 Stunden) sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

	15.11.94	17.11.94	29.11.94	23.1.95
CH <sub>4</sub> -Gehalt im Rohgas (%)	55	-	58	60
CH <sub>4</sub> -Gehalt im Reingas (%)	92.5	93.0	93.0	94.0
H <sub>2</sub> O-Gehalt im Rohgas (g/m <sup>3</sup> )	ca. 20	ca. 20	ca. 20	ca. 20
H <sub>2</sub> O-Gehalt im Reingas (ppm)	< 5	< 5	< 5	< 5
H <sub>2</sub> S-Gehalt im Rohgas (ppm)	max. 30	max. 30	max. 30	max. 30
H <sub>2</sub> S-Gehalt im Reingas (ppm)	< 5	< 5	< 5	< 5
Wäscherwasser Umlauf (m <sup>3</sup> /h)	6-8	7-8	7-8	6
Zugabe an Frischwasser (m <sup>3</sup> /h)	1.85	2	2	2
Temperatur des Wäscherwassers (°C)	14-15	14	16	12
Temperatur des Rohgases (°C)	max. 54	max. 60	max. 58	max. 63
Gastemperatur nach Kühler (°C)	10	10-11	9-25	9
Anlagendruck (bar)	6.1	6.1	6.05	6.65
Druck im CH <sub>4</sub> -Flash (bar)	3.5	3.5	3.5	3.5
Flaschendruck (bar)	ca. 200	ca. 220	ca. 220	ca. 230
Aussentemperatur (°C)	11	-	7	8
Gasfluss nach 1. Stufe (Nm <sup>3</sup> /h), Punkt A	27.4	27.8	28.6	24.4
Gasfluss vor 2. Stufe (Nm <sup>3</sup> /h), Punkt B	12.3	11.4	12.8	11.1
Gasfluss aus CH <sub>4</sub> -Flash (Nm <sup>3</sup> /h), Punkt C	0.6	0.7	0.75	0.6
Gasfluss aus Trockner (Nm <sup>3</sup> /h), Punkt D	4.8	5.0	4.8	5.4
Mittlerer stündlicher Stromverbrauch (kWh)	38	38	38	36

Tabelle 1: Gemittelte Messwerte der Aufbereitungsanlage

## 2.4 Gasqualität

Der Methangehalt im Biogas erreicht Werte zwischen 92.5 und 94.0%. Biogas mit einem Methangehalt von 93% weist einen unteren Heizwert von 33.3 MJ/m<sup>3</sup> auf. Der Heizwert entspricht somit praktisch demjenigen von Erdgas.

Im Vergleich mit anderen Aufbereitungsanlagen in Europa erreicht die Rümlanger Anlage die höchsten Methangehalte.

Der Wassergehalt im aufbereiteten Biogas kann mit dem Trockner auf weniger als 5 ppm gesenkt werden. Dies entspricht bei einem Druck von 230 bar einem Taupunkt von  $-15^{\circ}\text{C}$  und bei Umgebungsdruck einem solchen von  $-65^{\circ}\text{C}$ . Schwefelwasserstoff konnte im gereinigten Biogas nicht nachgewiesen werden.

Die geplanten Werte können beim Wasserdampf und beim Schwefelwasserstoff problemlos erreicht werden, während die vorgängige theoretische Simulation der Anlage [3] durch ein holländisches Institut einen Methangehalt von 96% ergab. Die Gründe für die Abweichungen konnten nicht genau eruiert werden. Folgende Punkte dürften einen Einfluss haben:

- Die Waschkolonne weist mit 42 cm gegenüber anderen ausgeführten Anlagen einen sehr geringen Durchmesser auf. Die Randeffekte spielen damit eine grössere Rolle.
- Die in Rümlang eingesetzten Füllkörper entsprechen nicht denjenigen bei der Simulation.
- Allfällige Verunreinigungen des Waschwassers beeinträchtigen den Stoffaustausch.
- Die Simulationsrechnungen sind an holländischen Anlagen verifiziert worden, wo der Methangehalt des aufbereiteten Biogases deutlich geringer ist.

## 2.5 Energiebedarf

Der stündliche Elektrizitätsbedarf für die gesamte Aufbereitungsanlage liegt mit 36 bis 38 kWh sehr hoch. Bezogen auf den Heizwert des aufbereiteten Biogases entspricht dies genau einem Drittel.

Den grössten Anteil hat mit einer Leistung von 16 kW die Wasserpumpe für die Wäscherkolonne. Die Entfernung des  $\text{CO}_2$  verbraucht also fast die Hälfte des Elektrobedarfs der gesamten Anlage. Der Kompressor benötigt eine Leistung von rund 10 kW und das Gaskühlaggregat 4 kW. Weitere kleinere Verbraucher sind das Gastransportgebläse, das Luftgebläse für die Strip-pung, der Raumabluftventilator sowie die Messgeräte und die Steuerung.

Verschiedene Gründe tragen zum hohen Energieverbrauch bei:

- Der Wirkungsgrad der Wasserpumpe ist gering (<20%). Für die Rümli-<sup>\*</sup>ger Pilotanlage ist eine Pumpe mit möglichst grosser Regelbarkeit (1 bis 7 m<sup>3</sup>/h) gewählt worden. Dies bedingte eine Pumpe mit grossem freiem Durchgang. Pumpen mit engem Durchgang erreichen Wirkungsgrade von 50 bis 60%, sind jedoch aufwendiger zu regeln und störungsanfälliger auf Schmutzpartikel.
- Für die Spülung des Trockners (Regeneration) muss ein Drittel des Biogases von 6 auf 1 bar entspannt und somit zweimal verdichtet werden.
- Infolge der unregelmässigen Rohgasqualität konnten die einzelnen Stufen des Kompressors schlecht aufeinander abgestimmt werden. Das hat zur Folge, dass zur Aufrechterhaltung des Anlagendrucks für den CO<sub>2</sub>-Wäscher von Zeit zu Zeit ein Teil des Biogases nach der 4. Stufe auf 6 bar entspannt und erneut verdichtet werden muss.
- Sämtliche Apparate sind in einem Container plaziert. Infolge Überhitzung musste eine zusätzliche Gaskühlung installiert werden.

Frühere Praxis-Messungen beim Projekt an der FAT [2] ergaben einen Energiebedarf für die Kompression und die Trocknung von 9% bezogen auf das verdichtete Biogas. Die Vergleichbarkeit mit Rümliang ist allerdings beschränkt, da die damalige Anlage keine CO<sub>2</sub>-Entfernung aufwies (Methangehalt des gereinigten Biogases bei 60%) und die Verdichtung lediglich auf 150 bar erfolgte.

## 2.6 Betrieb der Anlage

Da die Komponentenhersteller keine Erfahrungen mit Biogas aufwiesen, mussten an der Gasaufbereitungsanlage mehrmals Nachbesserungen und Optimierungen vorgenommen werden. Dies betraf im Jahre 1994 die Nachrüstung einer Gaskühlanlage. Um im CO<sub>2</sub>-Waschturm möglichst tiefe Temperaturen zu erreichen, ist gleichzeitig der Gasfluss geändert worden. Nach der ersten Stufe des Kompressors fliesst das Gas seit 1994 durch den Kühler zur H<sub>2</sub>S-Reinigung (Aktivkohle-Kolonnen) und anschliessend in die CO<sub>2</sub>-Waschkolonnen. Weitere Optimierungen betrafen den Einbau eines Druckhalteventils für den Waschprozess sowie eine Neueinstellung des Trockners (Erhöhung der Menge an Regenerationsgas). 1995 zeigten sich Mängel an der Tankstelle, indem die automatische Umschaltung auf die einzelnen Flaschenbatterien (optimale Bewirtschaftung der Speicher) schlecht funktionierte. Diese Umschaltung wird inzwischen von Hand vorgenommen. Die Anzahl Gasflaschen ist verdoppelt worden, um die Speicherkapazität zu

vergrössern. Im weiteren musste die Wasserpumpe der Waschkolonne ersetzt werden, da der Elektromotor nicht für den 410V-Betrieb geeignet war.

Die Gasaufbereitungsanlage stand ab November 1993 - ab 1995 regelmässig - in Betrieb und erreichte folgende Einsatzzeiten:

Jahr	Betriebsstunden	In Flaschen abgefüllte Menge Methangas
1993	40 Stunden	ca. 400 m <sup>3</sup>
1994	350 Stunden	ca. 4'000 m <sup>3</sup>
1995	900 Stunden	ca. 10'000 m <sup>3</sup>
1996 (bis 1.10.96)	560 Stunden	ca. 6'000 m <sup>3</sup>
Total bis 1.10.96	1'850 Stunden	ca. 20'000 m <sup>3</sup>

Die Wartungs- und Unterhaltsarbeiten im Normalbetrieb sind relativ gering. Der Arbeitsaufwand wird vom Betriebspersonal auf rund eine Stunde pro Tag geschätzt. Die Kosten für Ersatzteile und externe Fachleute liegen im Rahmen von vergleichbaren industriellen Anlagen (ca. 4% der Investitionskosten, Fr. 30'000.- pro Jahr).

## 2.7 Kosten

Zusammenstellung der Investitionskosten Kompo-Mobil I:

Gasaufbereitung	Fr. 730'000.-
Umbau Benzinfahrzeuge	Fr. 67'000.-
Messkosten	Fr. 45'000.-
Ingenieurkosten	Fr. 110'000.-
Total	Fr. 952'000.-

Einerseits waren somit die Investitionskosten für die gesamte Gasaufbereitungsanlage und den Umbau der Benzinfahrzeuge mit Fr. 950'000.- hoch, andererseits war die Anlage in Rümlang die erste dieser Art und mit rund 1'000 Betriebsstunden pro Jahr wenig ausgelastet. Daraus resultieren sehr hohe spezifischen Kosten pro m<sup>3</sup> aufbereitetes und gespeichertes Methangas.

Allein die Stromkosten für den Betrieb der Aufbereitungsanlage ergeben bei einem Strompreis von 20 Rappen pro kWh Kosten von rund 60 Rappen pro m<sup>3</sup> aufbereitetes Gas.

Für einen wesentlich wirtschaftlicheren Betrieb müssen die Investitionskosten und der spezifische Energiebedarf gesenkt sowie die Jahresbetriebsstunden erhöht werden.

### 3. Fahrzeuge

#### 3.1 Personenwagen

##### 3.1.1 Eingesetzte Fahrzeuge

Seit Dezember 1994 standen sechs Fahrzeuge mit Otto-Motoren im Einsatz: drei Personenwagen und drei Kleinbusse. Die Kleinbusse werden im Betrieb für Fahrten auf die Baustellen eingesetzt, die Personenwagen sind sowohl geschäftlich als auch privat in Gebrauch.

Fahrzeug-Typ	Kennzeichen	Volumen Gasspeicher	Inbetriebnahme	Biogas-Kilometer bis August 1996
Ford Escort, 1.8 l	418 829	60 Liter	Dez. 94	19'000 km
Ford Mondeo, 1.8 l	314 106	60 Liter	Jan. 95	13'000 km
Ford Mondeo, 1.8 l	268 489	60 Liter	Febr. 95	16'000 km
Ford Transit, 2.0 l	563 351	2 x 80 Liter	Dez. 94	13'000 km
Ford Transit, 2.0 l	541 046	2 x 80 Liter	Jan. 95	15'000 km
Ford Transit (*)	369 883	2 x 80 Liter	Febr. 95	5'000 km

Fünf Wagen sind als neue Fahrzeuge auf Methangasbetrieb umgerüstet worden. Ein Ford Transit (\*) mit einer veralteten Motorenkonstruktion ist im August 1995 wieder auf reinen Benzinbetrieb umgerüstet worden, da ein stabiler Gasbetrieb nicht möglich war (Probleme im Leerlauf). Im weiteren sind zwei biogasbetriebene Personenwagen (Ford Escort und Ford Fiesta) von externen Kunden (ATAL, Privatperson von Bachenbülach) im Einsatz.

### 3.1.2 Umbau

Die einzelnen Fahrzeuge sind von der Firma Schmid in Zusammenarbeit mit einer spezialisierten Firma aus Holland umgerüstet worden. Die Umrüstmaterialien für den Motor (Druckminderventile, Druckregler, Gasmischer, elektronisches Zündsystem) werden standardmässig für Erdgas angeboten. Für die jeweiligen Fahrzeugtypen sind die Materialien und die Software anzupassen. Der Einbau der Gasflaschen und die Hockdruckverrohrung erfolgte durch die Firma Schmid.

Die ersten Fahrzeuge je Modell sind in Holland umgebaut und kalibriert worden. Die weiteren konnten in der Schweiz durch die Firma Schmid umgerüstet werden. Es hat sich gezeigt, dass die Umrüstung von nur wenigen Fahrzeugen recht aufwendig ist. Es handelt sich um einen Umbau eines bestehenden, für den Benzinbetrieb ausgerüsteten und optimierten Motors. Die Eingriffsmöglichkeiten sind deshalb beschränkt und die Einstellung für den Gasbetrieb kann lediglich optimiert, nicht aber maximiert werden.

Leistung und Fahrverhalten können verbessert werden, sobald die Motoren- bzw. die Fahrzeughersteller selber für Erdgasbetrieb ausgerüstete und eingestellte Fahrzeuge anbieten. In diesem Bereich ist seit dem Beginn dieses Projektes eine rasche Entwicklung im Gange. So bietet heute z.B. BMW werkseitig auf Zweistoffbetrieb (bi-fu) umgebaute Motoren an. Die Umrüstung von bestehenden Fahrzeugen dürfte bereits in wenigen Jahren nicht mehr aktuell sein. Dies erleichtert und verbilligt für den Kunden den Kauf von gasbetriebenen Fahrzeugen.

Sämtliche Fahrzeuge sind mit Biogas als Zusatztreibstoff ausgerüstet. Dies bedeutet, dass jederzeit auf Benzinbetrieb umgestellt werden kann.

Die von der Firma Schmid im Einsatz stehenden Fahrzeuge benötigten im Rahmen dieses Pilotprojektes keine gesetzliche Abnahmen, während die beiden externen Fahrzeuge gemäss üblicher Regelung mit einer Einzelabnahme und entsprechenden Emissionsmessungen in Verkehr gesetzt worden sind.

### 3.1.3 Abgasmessungen

Von einigen der auf Biogas umgerüsteten Fahrzeuge sind Abgas-Messungen nach EEG-Normen mit CNG, H-Gas (Erdgas mit hohem Heizwert) durchgeführt worden. Die jüngeren Messungen erfolgten nach der Norm EEG 93/59.

Diese findet seit Oktober 1995 auch in der Schweiz Anwendung. Die Messungen ergaben folgende Resultate.

Fahrzeug: Ford Escort ZH 418 829

Mess-Datum: 8.10.93

Mess-Norm: EEG 91/441

Treibstoff: CNG, H-Gas

	Messwert (g/km)	Grenzwert (g/km)	Vergleich zu Grenzwert
CO (Korr. Faktor 1.2)	1.32	2.72	49%
CO <sub>2</sub>	167.71		
HC	0.33		
NO <sub>x</sub>	0.09		
HC + NO <sub>x</sub> (Korr. Faktor 1.2)	0.50	0.97	52%

Fahrzeug: Ford Mondeo ZH 314 106

Mess-Datum: 25.11.1993

Mess-Norm: EEG 91/441

Treibstoff: CNG, H-Gas

	Messwert (g/km)	Grenzwert (g/km)	Vergleich zu Grenzwert
CO (Korr. Faktor 1.2)	1.30	2.72	48%
CO <sub>2</sub>	179.66		
HC	0.41		
NO <sub>x</sub>	0.26		
HC + NO <sub>x</sub> (Korr. Faktor 1.2)	0.80	0.97	82%

Fahrzeug: Ford Escort (Kundenfahrzeug)

Mess-Datum: 14.11.95

Mess-Norm: EEG 93/59

Treibstoff: CNG, H-Gas

	Messwert (g/km)	Grenzwert (g/km)	Vergleich zu Grenzwert
CO (Korr. Faktor 1.2)	1.00	3.16	32%
CO <sub>2</sub>	158.93		
HC	0.33		
NO <sub>x</sub>	0.10		
HC + NO <sub>x</sub> (Korr. Faktor 1.2)	0.51	1.13	45%

Fahrzeug: Ford Fiesta (Kundenfahrzeug)

Mess-Datum: 15.12.95

Mess-Norm: EEG 93/59

Treibstoff: CNG, H-Gas

	Messwert (g/km)	Grenzwert (g/km)	Vergleich zu Grenzwert
CO (Korr. Faktor 1.2)	1.95	2.72	72%
CO <sub>2</sub>	138.76		
HC	0.26		
NO <sub>x</sub>	0.08		
HC + NO <sub>x</sub> (Korr. Faktor 1.2)	0.41	0.97	42%

Fahrzeug: Ford Transit (neues Fahrzeug)

Mess-Datum: 24. Januar 1996

Mess-Norm: EEG 93/59

Treibstoff: CNG, H-Gas

	Messwert (g/km)	Grenzwert (g/km)	Vergleich zu Grenzwert
CO (Korr. Faktor 1.2)	0.36	3.16	11%
CO <sub>2</sub>	223.5		
HC	0.24		
NO <sub>x</sub>	0.16		
HC + NO <sub>x</sub> (Korr. Faktor 1.2)	0.48	1.13	42%

Die gültigen Grenzwerte können bei allen Messproben eingehalten werden.  
In den meisten Fällen werden diese um mindestens 50% unterschritten.

Die Messwerte zeigen für Erdgasfahrzeuge typische Werte. Im Vergleich zu benzinbetriebenen Fahrzeugen ergeben sich niedrigere CO- und NO<sub>x</sub>-Werte, während die HC-Werte etwas höher liegen [4, 5].

Bei der Kalibrierung der Fahrzeuge konnte auch die Leistung der Motoren überprüft werden. Diese lag bei allen Fahrzeugen um 8 bis 11% unter der Leistung im Benzinbetrieb.

Eine Abgasmessung ist bei der EMPA in Düberdorf mit Methangas aus Rümlang vorgenommen worden. Die EMPA war damals noch nicht mit dem EEG-Messverfahren ausgerüstet.

Fahrzeug: Ford Escort ZH 418 829  
Mess-Datum: 9.2.1994  
Mess-Norm: US-FTP-75  
Treibstoff: Methangas aus Rümlang

	Messwert (g/km)	Grenzwert (g/km)	Vergleich zu Grenzwert
CO (Korr. Faktor 1.2)	1.69	2.1	80%
HC (Korr. Faktor 1.3)	1.24	0.25	496%
NO <sub>x</sub> (Korr. Faktor 1.1)	0.09	0.62	15%

Gegenüber den Messungen nach dem EEG-Verfahren fällt der hohe HC-Wert auf. Dies ist jedoch nicht auf den anderen Treibstoff (Methangas aus Rümlang anstelle CNG) sondern auf den langsameren Fahrzyklus der US-FTP-75-Norm zurückzuführen. Der langsamere Fahrzyklus lässt den Katalysator geringer erwärmen, womit dieser für HC weniger wirksam ist.

Die Messverfahren für Gasfahrzeuge sind im Moment in der Schweiz und in der EU heftig in Diskussion. Sowohl die Messverfahren wie auch die einsetzbaren Referenzgase werden in den nächsten Jahren den Marktbedürfnissen angepasst und neu definiert [5].

### 3.1.4 Gasverbrauch

Aufgrund der Fahrtenbücher in jedem Fahrzeug konnte der Gasverbrauch pro Kilometer ermittelt werden. Die Fahrer erfassten vor und nach jeder Betankung den Kilometerstand und die Druckanzeige des Gasspeichers.

Ebenso wurde erfasst, ob die einzelnen Fahrten in der Stadt, über Land oder auf der Autobahn erfolgten. Angenommen worden sind eine mittlere Gasqualität ( $9.25 \text{ kWh/Nm}^3$ ) und ein mittlerer Realgasfaktor ( $Z=0.82$ ) für die Verdichtung.

Fahrzeug (Kennzeichen)	Mehrheitliche Fahrten	Mittlerer Gasverbrauch ( $\text{Nm}^3/100 \text{ km}$ )	Vergleich mit Benzin ( $\text{l}/100 \text{ km}$ )	Maximale Reichweite (km)
Escort, 1.8 l (ZH 418 829)	Stadt	10.4	10.80	155
Mondeo, 1.8 l (ZH 314 106)	Autob./Überl.	8.9	9.15	180
Mondeo, 1.8 l (ZH 268 489)	Überland	9.1	9.40	175
Transit, 2.0 l (ZH 563 351)	Autob./Überl.	13.3	13.80	320
Transit, 2.0 l (ZH 541 046)	Autob./Überl.	13.2	13.70	325

Die Vollbetankung eines Fahrzeuges mit Methangas dauert rund eine Minute.

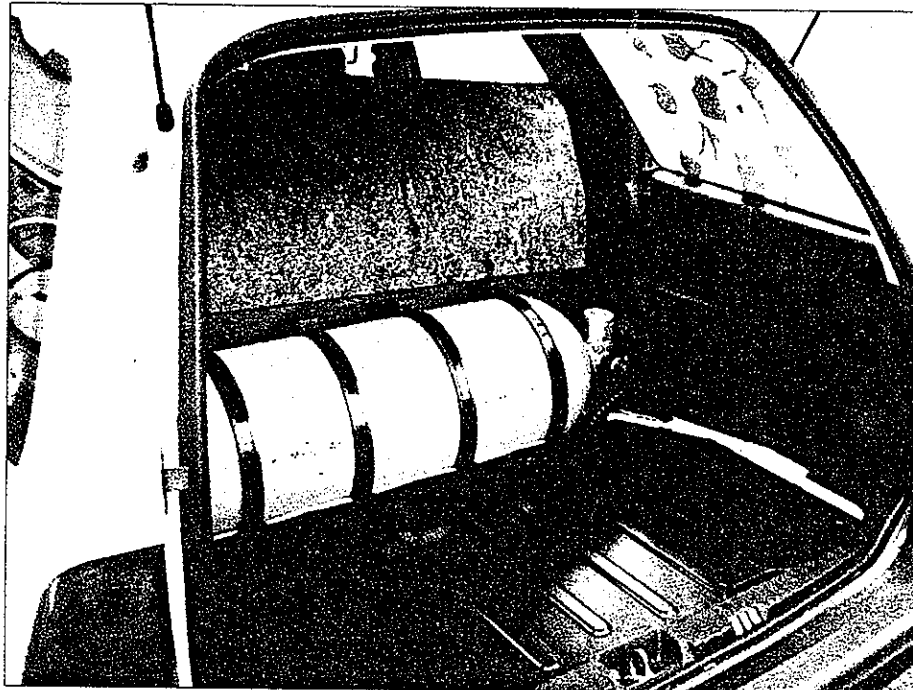


Abbildung 4: Gasspeicher im Personenwagen

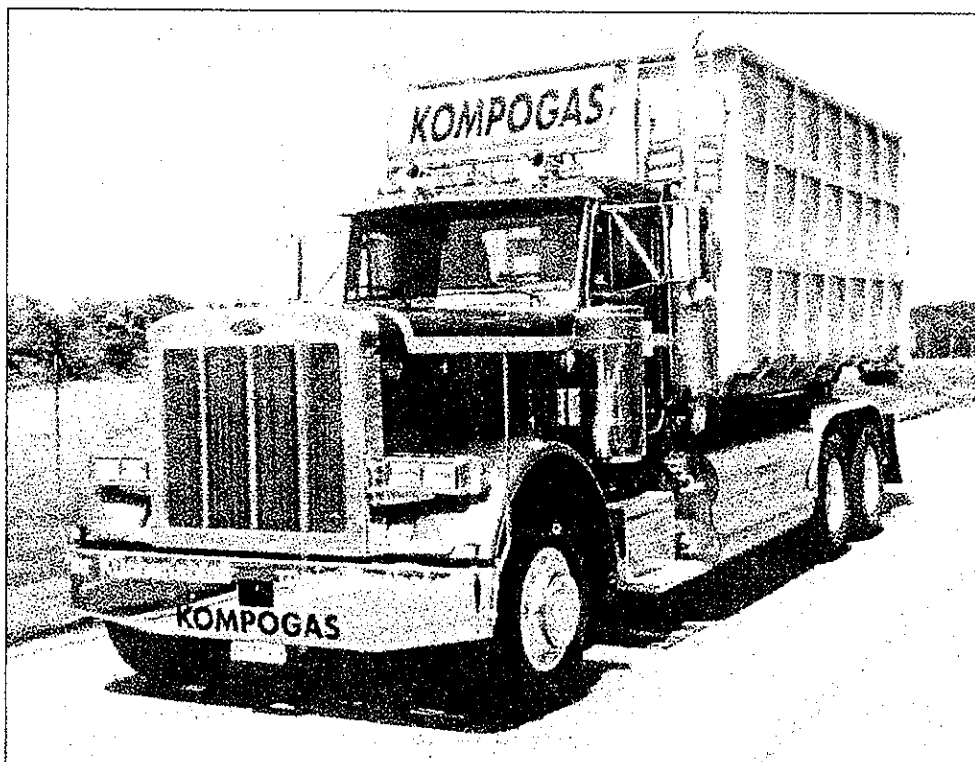


Abbildung 5: Lastkraftwagen Peterbilt

### **3.1.5 Fahrverhalten**

Gemäss Aussagen der einzelnen Fahrer ist das Verhalten des Motors im Gasbetrieb vergleichbar mit demjenigen im Benzinbetrieb. Die Elastizität ist im unteren Drehzahlbereich etwas geringer, das heisst, dass bei tieftourigem Einsatz der Motor leicht ins Stocken gerät. Die um rund 10% geringere Leistung wird für geübte Fahrer in Steigungen bemerkbar.

### **3.1.6 Wartung**

Für einen optimalen Betrieb ist der Wartung der Fahrzeuge im Vergleich zu Benzinern etwas grössere Aufmerksamkeit zu schenken. Insbesondere sind der Druckregler und die Dosiereinheit von Zeit zu Zeit zu kontrollieren und nachzujustieren.

## **3.2 Lastkraftwagen**

Nach längeren Verhandlungen mit einem Hersteller aus den USA konnte im Sommer 1995 ein LKW (Peterbilt, Leistung 275 PS) importiert werden, welcher sich für den Gasbetrieb eignet. In Abweichung zu den ursprünglichen Absichten, indem ein Zündstrahlbetrieb (Dual fuel Gas/Diesel) vorgesehen war, ist nun das Konzept mit einem Detroit-Gasmotor realisiert worden. Der ursprünglich vorgesehene Zündstrahlmotor ist infolge technischer Anfälligkeiten und einer veränderten Firmenpolitik von Detroit Diesel aus dem Markt zurückgezogen worden.

Der LKW wurde als Serienprodukt mit Dieselmotor geliefert und in der Schweiz mit einem entsprechenden Gasmotor ausgerüstet. Da der Gasmotor nur mit Automatengetriebe zu betreiben ist, musste auch das handgeschaltete Getriebe ausgewechselt werden. Der Einbau der Gasflaschen und die Gasverrohrung ist ebenfalls durch die Firma Schmid ausgeführt worden.

Der LKW, Marke Peterbilt, weist eine Leistung von 275 PS/205 kW und ein Leergewicht von 12 Tonnen auf. Die Nutzlast beträgt 14 Tonnen. Das Methangas wird in acht Druckflaschen mit je einem Inhalt von 165 Liter (total 1320 Liter) auf dem Fahrzeug gespeichert. Das Völltanken benötigt rund 12 Minuten.

Der LKW wird als Hakenfahrzeug mit variablen Grossmulden im Kurzstreckenbetrieb eingesetzt. Der stationäre Hakenbetrieb nimmt dabei einen grossen Teil der Zeit in Anspruch. Vom September 1995 bis August 1996

sind rund 40'000 km im Gasbetrieb zurückgelegt worden. Nach anfänglichen Kalibrationsschwierigkeiten funktioniert das Fahrzeug problemlos, und im Fahrverhalten ist kein Unterschied zu einem LKW im Dieselbetrieb festzustellen.

Als reines Gasfahrzeug unterliegt der LKW keiner Abgasprüfung für die Inverkehrsetzung. Da in der Schweiz keine Messeinrichtungen vorhanden sind, konnten keine Emissionsmessungen vorgenommen werden.

Vom Motorenhersteller werden die folgenden Werte für den eingesetzten Motorentyp angegeben.

Motor: Detroit Gasmotor, Model 6047-GKG8, 8.5 l Hubraum

Messwerte: Gasmotor ohne Katalysator

Norm: EURO 2 für Dieselfahrzeuge

	Messwert (g/kWh)	Norm (g/kWh)	Vergleich zu Norm
CO	2.1	4.0	52%
HC	0.7	1.1	64%
NO <sub>x</sub>	1.9	7.0	27%
PM (Partikel)	0.04	0.15	27%

Der durchschnittliche Biogasverbrauch betrug 66 Nm<sup>3</sup> auf 100 km, was einem Dieserverbrauch von 61 Litern entspricht. Davon dürfte rund ein Drittel des Verbrauchs auf den stationären Betrieb entfallen. Eine Tankfüllung erlaubt eine mittlere Reichweite von rund 480 km und unbeladen eine maximale Reichweite von 600 km. Gegenüber einem Dieselmotor verbraucht der Gasmotor bedingt durch den geringeren Motorenwirkungsgrad 10 bis 20% mehr Treibstoff [4].

In den nächsten Monaten soll ein zweiter LKW für Biogas gekauft werden. Wie bei den Personenwagen ist auch bei den LKW's auf der Anbieterseite eine Entwicklung zum Angebot von gasbetriebenen Fahrzeugen im Gange. Dieses zweite Fahrzeug wird fertig ausgerüstet und eingestellt auf Erdgas von den USA importiert.

#### **4. Substitution fossiler Energieträger**

Im Projekt Kompo-Mobil I in Rümlang sind seit der Inbetriebnahme (November 1993 bis August 1996) rund 20'000 m<sup>3</sup> Methangas mit einem Energiegehalt von 670 GJ aufbereitet und in Flaschen abgefüllt worden.

Die im Einsatz stehenden Personen- und Lastkraftwagen haben insgesamt 120'000 km mit Biogas zurückgelegt und damit rund 10'000 Liter Benzin und über 20'000 Liter Dieselöl ersetzt. Dies entspricht einer substituierten Energiemenge von rund 1'000 GJ. Die Betankung mit Methangas erfolgte in Rümlang. Ab Sommer 1995, nachdem die zweite Gasaufbereitungsanlage in Bachenbülach in Betrieb stand, ist insbesondere der Lastkraftwagen auch in Bachenbülach betankt worden.

Bei einer Auslastung von 3'500 Stunden pro Jahr ist die Gasaufbereitungsanlage Rümlang in der Lage, jährlich rund 40'000 m<sup>3</sup> Biogas in Flaschen abzufüllen. Damit lassen sich jährlich 40'000 Liter Benzin ersetzen und der CO<sub>2</sub>-Ausstoss um jährlich 100'000 kg vermindern. Dank der gegenüber benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeugen geringeren Schadstoffe (insbesondere NO<sub>x</sub> und Partikel gegenüber Diesel) leistet die Anlage einen zusätzlichen Beitrag an die Luftreinhaltung.

#### **5. Zielerreichung des Projektes Kompo-Mobil I**

Die im Projekt vorgegebenen Ziele sind mehrheitlich erfüllt worden: Evaluation, Planung und Betrieb einer Gasaufbereitungsanlage mit Biogas-Tankstelle, Umbau von Personenwagen (Otto-Motoren) von Benzin- auf Biogasbetrieb mit entsprechenden Messungen. Infolge der aktuellen und zukünftigen Angebote auf dem Markt ist der Lastkraftwagen nicht zu einem Dual fuel-Betrieb (Diesel/Biogas) umgebaut, sondern direkt mit einem reinen Gasmotor ausgerüstet worden. Abgasmessungen an den Motoren konnten lediglich an den Personenwagen vorgenommen werden.

Die Messungen und Erfahrungen an dieser ersten Anlage haben die Mängel und das Optimierungspotential aufgezeigt. Das Folgeprojekt Kompo-Mobil II setzt diese Erkenntnisse in die Praxis um. Die wichtigsten Punkte sind:

**Gasqualität:** Das gewählte Verfahren mit Druckwasserwäsche stösst bezüglich des erreichbaren Methangehaltes an die technischen Grenzen. Im neuen Projekt wird deshalb ein Molekularsiebverfahren eingesetzt.

**Stromverbrauch:** Der hohe Stromverbrauch ist einerseits auf das Verfahren Druckwasserwäsche und andererseits auf die nicht optimal aufeinander abgestimmten Komponenten (Kompressoren und Trockner weisen grosse Umlaufmengen an Biogas auf) zurückzuführen. Kompo-Mobil II wird als Gesamtanlage mit garantierten Leistungswerten gekauft.

**Marktentwicklung:** Sowohl die beteiligten wie auch die weiteren im Markt tätigen Unternehmen haben ihre Technik dank dem in Rümlang ausgewiesenen Marktbedürfnis in den letzten drei Jahren stark verbessert. Dies ermöglicht es heute, im Gegensatz zu 1993 komplette Gasaufbereitungsanlagen mit garantierten Leistungswerten zu kaufen. Eine gleiche Entwicklung setzte bei den Fahrzeugherstellern ein. Während vor drei Jahren aufwendige Verhandlungen mit Motorenherstellern für den Umbau auf Biogas nötig waren, bieten heute einige Fahrzeughersteller standardmässig im Werk umgebaute Fahrzeuge zum Kauf an.

Das Ziel des Projektes Kompo-Mobil II wird darin bestehen, einen wichtigen Beitrag zu dieser Entwicklung zu leisten, womit das Know-how weiter verbreitet wird und die Anlagen damit kostengünstiger erstellt werden können.

## Literaturverzeichnis

- [1] Fankhauser J. und Moser A.: Studie über die Eignung von Biogas als Treibstoff für Landwirtschaftstraktoren. FAT-Berichte Nr. 18. Eidg. Forschungsanstalt 8356 Tänikon. 1983.
- [2] Fankhauser J., Ammann H., Egger K. und Stadler E.: Erfahrungen mit Biogas als Treibstoff für Landwirtschaftstraktoren. FAT-Berichte Nr. 27. Eidg. Forschungsanstalt 8356 Tänikon. 1985.
- [3] Wever J.L.: Simulation waterwash-process. Studie Gastec, Nederlands Centrum voor Gastechologie. July 1993.
- [4] Diverse Autoren: Erdgas statt Abgas. Erdgas-Nutzfahrzeuge in der Schweiz: Studien und Praxiserfahrungen. Nationale Fachtagung vom 11. September 1996 in Biel. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW. Zürich.
- [5] Bach Ch., u.a.: Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen. Teilbericht Empfehlung für die Bewertung der Abgasemissionen anlässlich der Typenprüfung. EMPA Dübendorf. Mai 1996

## **Kompo-Mobil II**

Biogasaufbereitungsanlage (Anlage Bachenbülach)

### **Zusammenfassung**

#### **Zielsetzung**

Die Zielsetzung des Projektes ist Erstellung und Betrieb einer Gasaufbereitungsanlage (Gasreinigung und Verdichtung, Leistung 26 Nm<sup>3</sup> pro Stunde) in Bachenbülach für die Nutzung des Biogases in Fahrzeugen. Aus den Erfahrungen der ersten derartigen Anlage in Rümlang (Kompo-Mobil I) sollen folgende qualitativen Eckdaten erreicht werden: Methangehalt über 96% (Erdgasqualität), Schwefelwasserstoffgehalt unter 5 ppm, Wasserdampfgehalt unter 10 ppm. Der Energiebedarf für die Aufbereitung soll weniger als 13% des Energieinhaltes des abgefüllten Methangases betragen. Gegenüber Kompo-Mobil I sind deutlich tiefere Investitionskosten anzustreben.

#### **Gasaufbereitungsanlage**

Die wichtigsten Merkmale der Gasaufbereitungsanlage in Bachenbülach sind der vierstufige Kompressor (Verdichtung bis 250 bar), das Tanklager (44 Druckflaschen mit je 80 Liter Inhalt), die Tankstelle und die Reinigungsanlage. Zur Entfernung des Kohlendioxids wird die Molekularsiebtechnik (pressure swing adsorption) eingesetzt. Der Wasserdampf kondensiert in einer ersten Stufe im Kältetrockner bei ca. 4° C aus. Der restliche Wasserdampf adsorbiert im Molekularsieb. Der Schwefelwasserstoff wird mittels Aktivkohle entfernt. Die Leistung der Anlage beträgt 26 Nm<sup>3</sup> Methangas pro Stunde. Während der letzten eineinhalb Jahre sind 42'000 m<sup>3</sup> Methangas mit einem Energiegehalt von gegen 1'500 GJ aufbereitet und in Flaschen abgefüllt worden.

Die qualitativen und finanziellen Zielsetzungen konnten mit dem Projekt Kompo-Mobil II erreicht werden. Der Methangehalt im aufbereiteten Biogas erreicht Werte von 96% bis 98%. Der Heizwert liegt mit rund 35 MJ/Nm<sup>3</sup> etwas höher als derjenige von Erdgas. Der Taupunkt des aufbereiteten Biogases bei Umgebungsdruck liegt dauernd unter minus 65° C, und Schwefelwasserstoff konnte im gereinigten Biogas nicht nachgewiesen werden.

Der Energiebedarf für die Aufbereitung beträgt stündlich rund 20 kWh Elektrizität. Bezogen auf den Heizwert des aufbereiteten Methangases entspricht dies 8%.

$y = 92\%$

Die Investitionskosten für die gesamte Aufbereitungsanlage beliefen sich auf rund Fr. 660'000.-. Bei angenommenen jährlichen Betriebszeiten von 4500 Stunden ergeben sich spezifische Kosten von rund 10 Rappen pro kWh Gas. Dies entspricht vergleichsweise einem Preis von 90 Rappen pro Liter Benzin.

### Vergleich von Autogas mit Wärme-Kraft-Kopplung

Anhand der bisherigen Investitions- und Betriebskosten sind die beiden in Bachenbülach installierten Nutzungen verglichen worden. Unter der Annahme, dass das Biogas „gratis“ zur Verfügung steht (finanziert durch die Entsorgungsgebühren der Kompogas-Anlage), ergeben sich folgende Werte pro m<sup>3</sup> Rohbiogas. Mit der der WKK-Anlage kann ein Überschuss von 8 Rappen m<sup>3</sup> Biogas erzielt werden. Beim Verkauf des Gases als Autogas resultiert ein Überschuss von 23 Rappen (ohne Abgaben wie Mineralölsteuer und Zollzuschlag) bzw. ein Verlust von 10 Rappen (mit Abgaben) pro m<sup>3</sup> Rohgas. Unter den heutigen rechtlichen Bedingungen ist die Verwertung des Biogases in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen gegenüber dem Autogas wirtschaftlich interessanter. Dies gilt mindestens für eine breitere Anwendung, da die Anlage in Bachenbülach als Pilotanlage von den Abgaben befreit ist. Sollte allerdings der Treibstoff aus erneuerbaren Energien ohne Abgaben an den Staat verkauft werden können, wird die Autogas-Nutzung auch aus finanzieller Sicht interessant.

Andere heute in Erprobung stehende Bio-Treibstoffen (Methanol, Aethanol, RME) sind im Vergleich zu Methangas aus Biogas wesentlich teurer.

### Fazit für die Praxis/Ausblick

Mit den Entwicklungen, welche dank den beiden Kompo-Mobil-Projekten vorangetrieben worden sind, stehen heute praxiserprobte Gasaufbereitungsanlagen für Biogas zur Verfügung, welche bei geringem Energieeinsatz eine gute Gasqualität liefern. Die beteiligten Firmen sind im Markt tätig und setzen die Erfahrungen direkt in neuen Anlagen um. Die beiden Pilotanlagen in Rümlang und Bachenbülach haben damit einen wesentlichen Beitrag für die vermehrte Nutzung von Biogas als Treibstoff geleistet.

Aufgrund der Erfahrungen in Bachenbülch kann die Wirtschaftlichkeit der Autogas-Nutzung weiter verbessert werden. Die Investitionskosten dürften bei einer neuen Anlage um rund Fr. 200'000.- niedriger ausfallen. Bei genügender grosser Nachfrage nach Bio-Treibstoff erlaubt die Gasaufbereitung eine jährliche Betriebsdauer von rund 5500 Stunden. Mit diesen Randbedingungen belaufen sich die Kosten auf rund 60 Rappen pro Liter Benzinäquivalent.

## 1. Zielsetzung des Projektes

Die Zielsetzung des Projektes ist Erstellung und Betrieb einer Gasaufbereitungsanlage (Gasreinigung und Verdichtung, Leistung 26 Nm<sup>3</sup> pro Stunde) in Bachenbülach für die Nutzung des Biogases in Fahrzeugen. Aus den Erfahrungen der ersten derartigen Anlage in Rümlang (Kompo-Mobil I) sollen folgende qualitativen Eckdaten erreicht werden:

- Das Reingas weist einen Methangehalt von mindestens 96% auf (Erdgasqualität).
- Der maximale Schwefelwasserstoffgehalt beträgt 5 ppm. Der Taupunkt bei Umgebungsbedingungen ist tiefer als -65° C (entspricht einem Wasserdampfgehalt von 10 ppm).
- Der Energiebedarf für die Reinigung und Verdichtung beträgt bei einer Durchsatzleistung von 45 m<sup>3</sup> Rohgas pro Stunde maximal 13% des Heizwertes des aufbereiteten Methangases.
- Gegenüber Kompo-Mobil I sollen die Investitionskosten bei doppelter Durchsatzleistung rund 20% tiefer liegen.

## 2. Gasaufbereitung

### 2.1 Evaluation der Aufbereitungsanlage

Nicht zuletzt dank dem Betrieb von Kompo-Mobil I haben die im Markt tätigen Firmen Angebote für gesamte Aufbereitungsanlagen entwickelt. Verschiedene europäische Firmen sind zur Offertstellung für Kompo-Mobil II eingeladen worden. Als Bedingung mussten die erwähnten Eckdaten garantiert werden.

Die Gaskompression, Lagerung und Tankstelle konnte die Firma Sulzer-Burckhardt AG aus Basel liefern. Sie bringt die Erfahrungen aus dem Projekt Kompo-Mobil I mit. Die Gasaufbereitungsanlage lieferte die Firma Carbotech GmbH aus Essen. Carbotech verfügt über eine langjährige Erfahrung im Bereich der Deponiegasaufbereitung. Um den Energieverbrauch möglichst gering zu halten, wird für die Entfernung des CO<sub>2</sub> die Molekularsiebtechnik (pressure swing adsorption) eingesetzt.

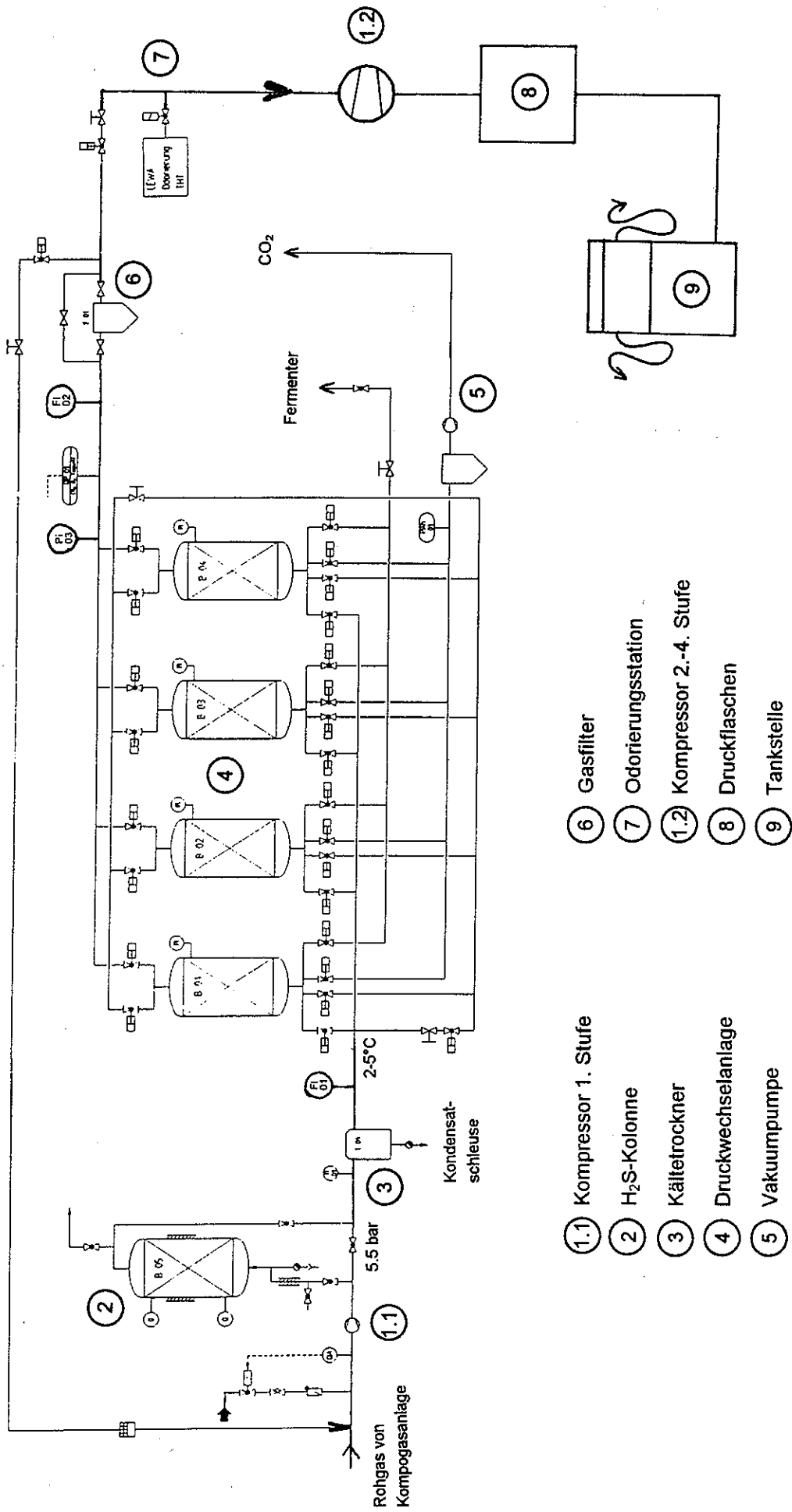
Die Gasaufbereitungsanlage ist im Sommer 1995 geplant und gebaut worden. Sie konnte im September 1995 in Betrieb genommen werden.

## 2.2 Anlagenbeschreibung

Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Gasaufbereitungsanlage.

Das Biogas gelangt vom drucklosen Speicher der Kompogas-Anlage über ein Druckerhöhungsgebläse in den Kompressor, wo es in der ersten Stufe (1) auf rund 6 bar verdichtet wird. In einer mit Aktivkohle gefüllten Kolonne (2) wird dem Biogas der Schwefelwasserstoff entzogen ( $H_2S$ -Stufe). Über den nachgeschalteten Kältetrockner (3) fliesst das Biogas bei rund  $5^\circ C$  in die Druckwechselanlage (4). Die vier Kolonnen sind mit speziellem Molekularsieb gefüllt, damit sowohl das Kohlendioxid als auch der Wasserdampf entfernt werden kann. Mit einer aufwendigen Steuerung sind die vier Kolonnen so geschaltet, dass möglichst wenig Gas für die Regeneration des Molekularsiebs entspannt wird und dass möglichst kein Methan an die Umgebung abfliesst. Die erste Kolonne ist für die Produktion in Betrieb und bereitet bei 6 bar das Rohgas zu Methangas auf. Die zweite Kolonne steht in einer ersten Phase im Druckausgleich zur evakuierten Kolonne (Druckabfluss bis etwa 4 bar) und wird in einer zweiten Phase auf 1 bar entspannt. Das abfliessende Gas gelangt zurück in den Biogas-Fermenter. Die dritte Kolonne wird von 1 bar auf 0.1 bar evakuiert. Der Gasinhalt besteht im wesentlichen aus  $CO_2$ , das über die Vakuumpumpe an die Umgebung abgegeben wird. In der vierten Kolonne wird der Druck zweistufig wieder aufgebaut: In der ersten Stufe mit Druckausgleich aus der zweiten Kolonne (bis etwa 3 bar) und in der zweiten Stufe mit Rohgas aus der ersten Kompressorstufe (bis 6 bar). Von der Druckwechselanlage strömt das Gas durch den Gasfilter (5) in die Odo-rierungsstation (6); und anschliessend zur zweiten, dritten und vierten Stufe des Kompressors (7). Das gereinigte und auf maximal 250 bar komprimierte Methangas wird in 44 Druckflaschen (8) mit einer Kapazität von je 80 Litern gelagert. Die Druckflaschen sind zu drei Gaslagern geschaltet (22 Flaschen in der Low Bank, je 11 Flaschen in der Middle und High Bank). Damit können möglichst viele Fahrzeuge an der Tankstelle (9) mit maximalem Druck be-tankt werden.

Die wichtigsten Parameter (Sauerstoff-, Kohlendioxid-Gehalt und Taupunkt) werden online erfasst und auf einem Schreiber registriert. Bei Unter- oder Überschreiten der vorgegebenen Qualitätswerte wird die Anlage abgestellt. Damit kann eine konstante Qualität garantiert werden. Der Schwefelwasserstoffgehalt wird von Hand (Dräger-Röhrchen) regelmässig gemessen.



- 1.1 Kompressor 1. Stufe
- 2 H<sub>2</sub>S-Kolonne
- 3 Kältetrockner
- 4 Druckwechselanlage
- 5 Vakuumpumpe
- 6 Gasfilter
- 7 Odorierungsstation
- 1.2 Kompressor 2.-4. Stufe
- 8 Druckflaschen
- 9 Tankstelle

Abbildung 1: Schema der Gasaufbereitungsanlage in Bachenbühlach

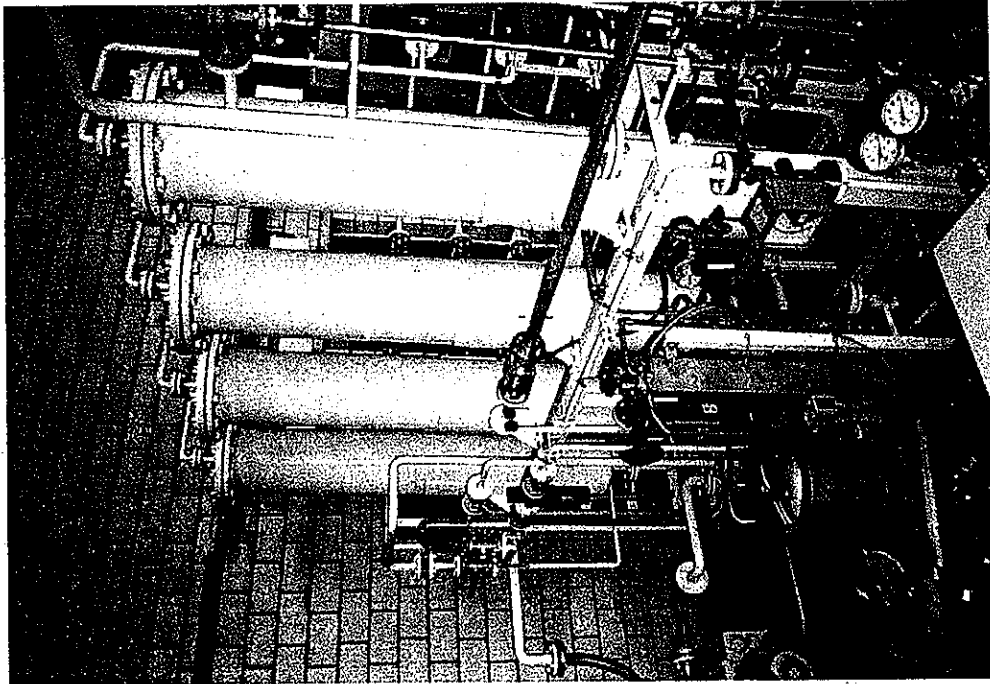


Abbildung 2: Gasaufbereitungsanlage mit den vier Molekularsiebkolonnen

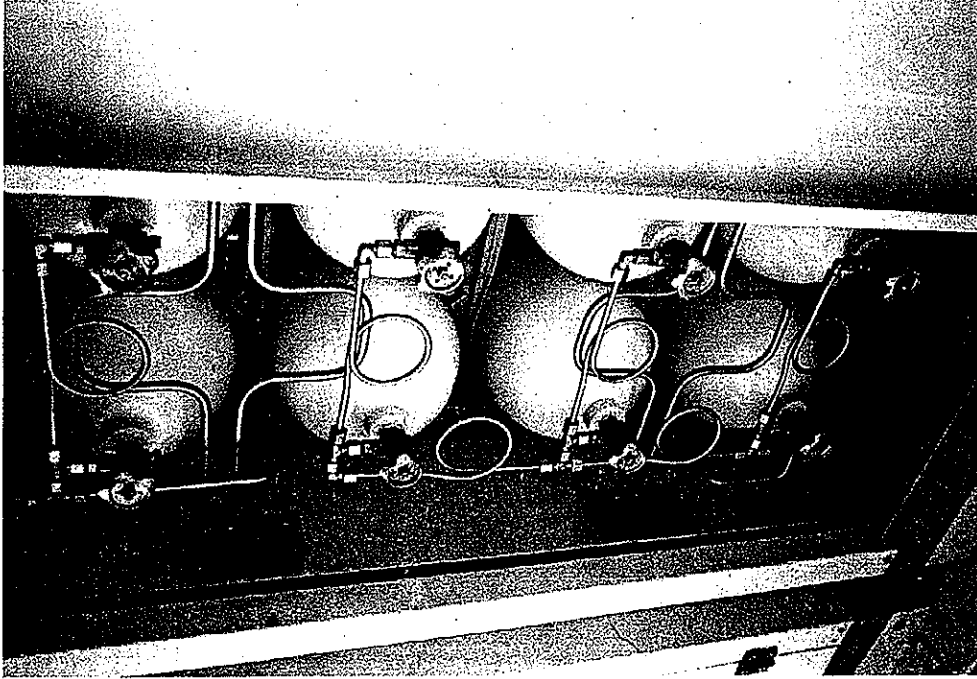


Abbildung 3: Druckflaschen als Gasspeicher

## 2.3 Messungen

Im Dezember 1996 und im April 1997 sind Messungen der Gasaufbereitungsanlage aufgezeichnet worden. Die Mittelwerte der einzelnen Tage (Messdauer 1 bis 6 Stunden) sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt.

Dezember 1996	11.12.96	12.12.96	13.12.96	16.12.96
CH <sub>4</sub> -Gehalt im Rohgas, bei 5°C (%)	60	59	57	60
CO <sub>2</sub> -/H <sub>2</sub> O-Gehalt im Rohgas (%)	39/1	40/1	42/1	39/1
CH <sub>4</sub> -Gehalt im Reingas (%)	95.7	96.1	96.1	96.2
CO <sub>2</sub> -/O <sub>2</sub> -Gehalt im Reingas (%)	4.0/0.3	3.6/0.3	3.7/0.2	3.5/0.3
Taupunkt bei Umgebungsdruck (°C)	-72	-72	-72	-71
H <sub>2</sub> S-Gehalt im Rohgas (ppm)	50	-	-	-
H <sub>2</sub> S-Gehalt im Reingas (ppm)	< 5	-	-	-
Temperatur des Rohgases beim Eintritt in den Kompressor (°C)	ca. 55	ca. 55	ca. 55	ca. 55
Gastemperatur nach Kühler (°C)	5	5	5	5
Anlagendruck am Eingang/ Ausgang (bar)	6.2/5.8	6.3/5.9	6.2/5.7	6.2/5.9
Flaschendruck Beginn/Ende (bar)	180/220	195/250	240/255	195/255
Aussentemperatur (°C)	ca. 8	ca. 8	ca. 8	ca. 8
Gasfluss Rohgas (Nm <sup>3</sup> /h)	33.5	33.5	34	34
Gasfluss Reingas (Nm <sup>3</sup> /h)	20	20	19	20
Mittlerer stündlicher Stromverbrauch (kWh)	16.0	15.7	16.0	16.0
Stromverbrauch im Verhältnis zum Energiegehalt des Reingases (%)	8.0	7.9	8.5	8.1

Tabelle 1: Gemittelte Messwerte der Anlage vom Dezember 1996

April 1997	9./10.4.97	11.4.97	14.4.97	15./16.4.97
CH <sub>4</sub> -Gehalt im Rohgas, bei 5°C (%)	57	56	63	61
CO <sub>2</sub> -/H <sub>2</sub> O-Gehalt im Rohgas (%)	42/1	43/1	36/1	38/1
CH <sub>4</sub> -Gehalt im Reingas (%)	97.5	96.9	98.0	97.5
CO <sub>2</sub> -/O <sub>2</sub> -Gehalt im Reingas (%)	2.4/0.1	3.1/0.0	1.8/0.2	2.5/0.0
Taupunkt bei Umgebungsdruck (°C)	-65	-66	-66	-68
H <sub>2</sub> S-Gehalt im Rohgas (ppm)	-	-	-	60
H <sub>2</sub> S-Gehalt im Reingas (ppm)	-	-	-	<2
Temperatur des Rohgases beim Eintritt in den Kompressor (°C)	ca. 75	ca. 75	ca. 75	ca. 75
Gastemperatur nach Kühler (°C)	4	4	4	4
Anlagendruck am Eingang/ Ausgang (bar)	6.3/6.1	6.2/6.0	6.3/6.1	6.2/6.0
Flaschendruck Beginn/Ende (bar)	160/260	230/260	190/215	150/210
Aussentemperatur (°C)	ca. 10	ca. 12	ca. 9	ca. 7
Gasfluss Rohgas (Nm <sup>3</sup> /h)	44.5	44	44	44
Gasfluss Reingas (Nm <sup>3</sup> /h)	26	25.5	25.5	26
Mittlerer stündlicher Stromverbrauch (kWh)	20.6	20.1	20.6	19.9
Stromverbrauch im Verhältnis zum Energiegehalt des Reingases (%)	8.2	8.1	8.3	7.8

Tabelle 2: Gemittelte Messwerte der Aufbereitungsanlage vom April 1997

Um die Durchflussleistung zu erhöhen, ist im März 1997 vor der ersten Kompressorstufe ein zusätzliches Druckerhöhungsgebläse installiert worden. Das Gebläse liefert einen Vordruck von rund 300 mbar. Mit dieser Massnahme konnte die Leistung der Anlage um rund 30% auf 26 Nm<sup>3</sup> pro Stunde erhöht werden. Die Leistung entspricht damit dem Planungswert. Im weiteren ist zwischen den beiden Messzyklen das Molekularsieb ersetzt worden. Der Methangehalt im Reingas ist dadurch um rund 1.5% angestiegen.

## 2.4 Gasqualität

Der Methangehalt im aufbereiteten Biogas erreicht Werte von 96% bis 98%. Biogas mit einem Methangehalt von 97% weist einen unteren Heizwert von 34.8 MJ/Nm<sup>3</sup> auf. Der Heizwert ist somit etwas höher als derjenige von Erdgas mit 33.8 MJ/Nm<sup>3</sup>. Die Gasqualität lag zu Beginn des Betriebes Ende 1995 bei rund 99% Methan und hat sich bis März 1997 kontinuierlich auf 96% verschlechtert. Mit der Auswechslung des Molekularsiebes stieg der Methangehalt wieder auf rund 97.5%.

Der Taupunkt des aufbereiteten Biogases bei Umgebungsdruck liegt dauernd unter minus 65° C. Der Zielwert kann damit eingehalten werden. Schwefelwasserstoff konnte im gereinigten Biogas nicht nachgewiesen werden.

Die geplanten Qualitätswerte werden beim Methan, beim Wasserdampf und beim Schwefelwasserstoff auch bei längerem Betrieb erreicht.

## 2.5 Energiebedarf

Der stündliche Elektrizitätsbedarf für die gesamte Aufbereitungsanlage lag bis März 1996 bei 16 kWh und stieg nach der Leistungserhöhung (ab April 1997) auf gut 20 kWh an. Bezogen auf den Heizwert des aufbereiteten Methangases entspricht dies in beiden Fällen rund 8%.

Folgende Apparate beziehen elektrischen Strom und sind im Energiebedarf enthalten.

Apparat	installierte elektrische Leistung
Vordruckgebläse 1	2.5 kW
Vordruckgebläse 2 (zusätzlich ab April 1997)	3.3 kW
Kompressor	18.5 kW
Kühlaggregat	0.57 kW
Vakuumpumpe	1.5 kW
Anlagensteuerung und Messgeräte	0.4 kW
Steuerung und Ventilator an der Tankstelle	0.25 kW
Total installierte elektrische Leistung (bis März 97)	23.7 kW
Total installierte elektrische Leistung (ab April 97)	27.0 kW

Tabelle 3: Installierte elektrische Leistungen der einzelnen Apparate der Gasaufbereitungsanlage

Gegenüber der Gasaufbereitungsanlage Kompo-Mobil I in Rümlang ist der spezifische Energiebedarf pro m<sup>3</sup> Gas rund viermal geringer. Folgende Verbesserungen haben dies ermöglicht.

- Systemwechsel von Druckwasserwäsche auf Molekularsiebtechnik: Bei der Anlage in Rümlang verbraucht die Wasserpumpe für die Druckwasserwäsche (Leistung 16 kW) sehr viel Energie, während die Anlage Bachenbülach mit einer Leistung von 1.5 kW (Vakuumpumpe) auskommt.

- Leistungserhöhung: Kompo-Mobil II weist rund die doppelte Durchflussleistung auf. Der spezifische Energiebedarf wird damit geringer.
- Regeneration des Molekularsiebs: Für die Regeneration des Molekularsiebes (Evakuierung) wird bei Kompo-Mobil II lediglich etwa 15% des Biogases entspannt und in die Biogasanlage bzw. an die Umgebung abgeleitet, während bei Kompo-Mobil I dieser Wert doppelt so gross ist.
- Optimierungen: Die einzelnen Stufen des Kompressors sind besser aufeinander abgestimmt. Im weiteren benötigt der Gaskühler gegenüber Kompo-Mobil I bedeutend weniger Energie.

## 2.6 Betrieb und Optimierung der Anlage

Die Gasaufbereitungsanlage stand vom September 1995 bis April 1997 während 2100 Stunden in Betrieb. In dieser Zeit sind rund 42'000 m<sup>3</sup> aufbereitetes Methangas in Flaschen abgefüllt worden.

Die Firma Schmid AG beurteilt die Inbetriebnahme und den bisherigen Betrieb als im Rahmen von üblichen industriellen Anlagen. Zu Beginn mussten die einzelnen Komponenten aufeinander abgestimmt und die Einstellungen optimiert werden. Die Messgeräte und das Aufzeichnungsgerät sind einmal ersetzt worden.

Im März 1997 wurde zur Leistungserhöhung ein zusätzliches Vordruckgebläse installiert. Gleichzeitig ist das Molekularsieb ersetzt und der Gasfluss geändert worden. Gegenüber der ursprünglichen Installation (Abbildung 1) wird das Biogas vor der ersten Kompressorstufe durch den Aktivkohlefilter (Entfernung des Schwefelwasserstoffes) geleitet. Damit kann der Aktivkohlefilter mit einer höheren Temperatur betrieben und die Wirkung desselben verbessert werden.

Die Wartungs- und Unterhaltsarbeiten im Normalbetrieb sind relativ gering. Sie umfassen Kontrollarbeiten, Eichungen der Messgeräte, Ersatz von Filter, Ölwechsel etc. Der regelmässige Arbeitsaufwand wird vom Betriebspersonal auf rund 10 Minuten pro Tag geschätzt. Die periodischen Service-Arbeiten nehmen nochmals etwa gleich viel Zeit in Anspruch. Die Kosten für Ersatzteile und externe Fachleute liegen im Rahmen von vergleichbaren industriellen Anlagen (ca. Fr. 15'000.- pro Jahr). Der Arbeits- und Wartungsaufwand ist kaum von den Betriebsstunden abhängig. Wichtiger sind die Anzahl der Einschaltvorgänge.

## 2.7 Kosten

Zusammenstellung der Investitionskosten Kompo-Mobil II (ohne Gebäudekosten):

Kompressoranlage mit Druckspeicher und Tankstelle	Fr. 255'000.-
Gasaufbereitung komplett	Fr. 214'000.-
Bauinstallation und Einbindung in die Kompogasanlage	Fr. 108'000.-
Verkleidung und Montage	Fr. 54'000.-
Ingenieurkosten (Planung und Überwachung)	Fr. 26'000.-
Total	Fr. 657'000.-

Zusätzliche Kosten im Rahmen des Pilotprojektes:

Diverse Anpassungen und Änderungen	Fr. 33'000.-
Messprogramm und Auswertung	Fr. 19'000.-

Bei einem Strompreis von 20 Rappen pro kWh betragen die Stromkosten für den Betrieb der Aufbereitungsanlage rund 15 Rappen pro m<sup>3</sup> aufbereitetem Gas, bzw. 1.5 Rappen pro kWh Gas.

Tabelle 4 zeigt die spezifischen Kosten in Abhängigkeit der jährlichen Betriebsstunden.

*Kapazität 26 Nm<sup>3</sup>/h (out) 21.5 Nm<sup>3</sup>/h (in) ≈ 300 kWh*

Betriebsstunden	(Std./a)	1'500	3'000	<u>4'500</u>
Biogas-Aufbereitung	(m <sup>3</sup> /a)	66'000	132'000	198'000
Methangas-Aufbereitung	(m <sup>3</sup> /a)	39'000	78'000	117'000
Äquivalente Menge Benzin	(Liter/a)	42'280	84'560	126'840
Amortisation und Zins	(Fr.)	74'240	74'240	74'240
Reparatur und Unterhalt	(Fr.)	13'140	13'140	13'140
Arbeitsaufwand für Bedienung	(Fr.)	7'200	7'200	7'200
Stromkosten (15 Rp. pro m <sup>3</sup> Methangas)	(Fr.)	5'850	11'700	17'550
Jahreskosten	(Fr.)	100'430	106'280	112'130 ✓
Kosten pro m <sup>3</sup> Biogas	(Fr.)	1.52	0.81	0.57
Kosten pro m <sup>3</sup> Methangas	(Fr.)	2.58	1.36	0.96 ✓
Kosten pro kWh Gas	(Rp.)	26.6	14.1	<u>9.9</u> ✓
Kosten pro Liter Benzin	(Fr.)	2.38	1.26	<u>0.88</u>

Tabelle 4: Spezifische Kosten in Abhängigkeit der jährlichen Betriebsstunden

Die Daten basieren auf der Anlage, wie sie seit April 1997 installiert ist, sowie folgenden Grundlagen: Heizwert Benzin: 32.1 MJ pro Liter, Heizwert Biogas: 21.5 MJ pro Nm<sup>3</sup>, Heizwert Methangas: 34.8 MJ pro Nm<sup>3</sup>, Annuität: 11.3% (12 Jahre Amortisation, 5% Zins), Reparatur- und Unterhaltskosten:

*9.7 kWh pro Nm<sup>3</sup>*

Jährlich 2% der Investitionskosten, Arbeitsaufwand für die Bedienung der Anlage: 120 Stunden pro Jahr (Ansatz: Fr. 60.- pro Stunde)

Aufgrund der ersten Monate dieses Jahres dürfte die Anlage 1997 während rund 2000 Stunden in Betrieb sein. An der Tankstelle in Bachenbülach wird das Methangas für Fr. 0.70 pro Liter Benzinäquivalent verkauft.

### 3. Vergleich von Autogas mit Wärme-Kraft-Kopplung

#### 3.1 Wärme-Kraft-Kopplung in Bachenbülach

Das in der Kompogasanlage Bachenbülach produzierte Biogas wird zu rund 75% in einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage in Strom und Wärme umgewandelt. Rund ein Viertel des Biogases wird als Autogas genutzt.

Installiert sind drei WKK-Anlagen mit je einer elektrischen Nennleistung von 85 kW. Der elektrische Wirkungsgrad wird mit 31.5%, der thermische mit 47% angenommen. Die Anlagen können gleitend gefahren werden und liefern im Jahresdurchschnitt stündlich 70 kWh Strom. Der Biogasverbrauch beträgt 37 m<sup>3</sup> pro Stunde. 1996 standen die Anlagen je rund 5000 Stunden in Betrieb. Die produzierte Wärme wird zu einem Drittel für den Betrieb der Kompogasanlage genutzt, während die restliche Wärme über Kühlanlagen an die Umgebung abgegeben wird.

$$\frac{70}{37 \times 6} = 31.5\%$$

$$\frac{70}{3 \times 85} = 27.5\%$$

Die gesamten Investitionskosten betragen Fr. 750'000.-. Die Unterhaltskosten der ersten Betriebsjahre belaufen sich auf rund 4 Rappen pro produzierte kWh Strom. Für Gesamtrevisionen, welche jeweils nach 20'000 Betriebsstunden fällig sind, werden weitere 2 Rappen eingesetzt.

Die Tabelle 5 gibt eine Übersicht der Produktionsdaten, und die Tabelle 6 zeigt die Kosten der Wärme-Kraft-Kopplungsanlage.

Betriebsstunden (je Aggregat)	(Std./a)	5'000
Biogas-Aufbereitung (3 Aggregate)	(m <sup>3</sup> /a)	555'000
Stromproduktion	(kWh/a)	1'050'000
Wärmeproduktion	(kWh/a)	1'550'000
Genutzte Wärme	(kWh/a)	520'000

$$\Rightarrow \frac{1'050'000}{70 \times 3} = 5000 \text{ Std}$$

Tabelle 5: Jährliche Produktionsdaten der drei Wärme-Kraft-Kopplungsaggregate

$$\frac{555'000 \times 6}{1'550'000} =$$

	Wärme-Kraft-Kopplungsaggregate	(Fr.)	450'000.-
	Steuerung	(Fr.)	100'000.-
	Einbindung, Kamin, Gebäude	(Fr.)	150'000.-
	Planung und Bauleitung	(Fr.)	50'000.-
	Total Investitionskosten	(Fr.)	750'000.-
	Amortisation und Zins (11.3%)	(Fr.)	84'750.- ✓
	Reparatur, Unterhalt, Bedienung (6 Rp./kWh)	(Fr.)	63'000.- ✓
	Jahreskosten	(Fr.)	148'000.- ✓
	Kosten pro m <sup>3</sup> Biogas	(Fr.)	0.27 ✓
	Kosten pro kWh Gas (Rp.)	(Rp.)	4.4 ✓

**Tabelle 6:** Investitions- und Jahreskosten der drei Wärme-Kraft-Kopplungsaggregate

### 3.2 Wirtschaftlichkeit von Autogas und Wärme-Kraft-Kopplung

Die Kompogasanlage in Bachenbülach produziert jährlich rund 680'000 m<sup>3</sup> Biogas. Davon werden rund 75% in der Wärme-Kraft-Kopplungsanlage in Strom und Wärme umgewandelt und rund 25% als Autogas genutzt. Für einen Wirtschaftlichkeitsvergleich wird davon ausgegangen, dass die Biogasproduktion durch die Entsorgungsgebühren finanziert ist. Für den Betriebsteil Nutzung steht das Biogas gratis zur Verfügung.

Die Biogasnutzung ergibt somit einen zusätzlichen Gewinn oder Verlust, bzw. einen positiven oder negativen Deckungsbeitrag an den Betrieb der gesamten Kompogasanlage. Um die unterschiedlichen Leistungsgrößen der beiden Systeme miteinander vergleichen zu können, wird der Gewinn bzw. der Verlust auf einen m<sup>3</sup> Biogas (von der Anlage geliefertes Rohgas) umgerechnet.

Die Ergebnisse liefern einen Hinweis darauf, welches System einen grösseren Ertrag, bzw. Verlust erzeugt. Die Genauigkeit muss insofern relativiert werden, als dass die Kosten (z.B. Bedienung, Gebäude) nicht exakt den einzelnen Betriebsteilen zugeordnet werden können.

Die Erträge der Wärme-Kraft-Kopplungsanlage werden nach üblichen Ansätzen gerechnet, d.h. 16 Rappen pro produzierte kWh Strom und 4.5 Rappen pro genutzte kWh Wärme. Beim Autogas werden zwei verschiedene Erträge gerechnet. Zum einen wird der aktuelle Benzinpreis von Fr. 1.25 pro

\* 
$$\frac{10070 \text{ Rp.} \times (0.10 + 0.05)}{10'000 \text{ t/a}} = 150.- / \text{t} \quad (\checkmark)$$

Liter (Variante A) eingesetzt. Dieser Betrag geht vollumfänglich als Ertrag in die Rechnung, wenn der Bund die Steuern und den Zollzuschlag (total 75 Rappen pro Liter Benzin) erlässt. Zum zweiten ergibt sich ein Ertrag von Fr. 0.50 pro Liter Benzin (Variante B), wenn die Abgaben an den Bund entrichtet werden müssen. Als Pilotanlage ist die Kompogasanlage in Bachenbülach von den Abgaben befreit. Im Rahmen einer breiteren Anwendung müssen diese Kosten gemäss heutiger rechtlicher Grundlagen (Mineralölsteuerverordnung MinöStV vom 20. November 1996) jedoch in Betracht gezogen werden. Aktuell wird das Methangas an der Tankstelle in Bachenbülach für Fr. 0.70 pro Liter Benzinäquivalent verkauft.

Die Tabelle 7 gibt eine Übersicht der Wirtschaftlichkeitsdaten der beiden Systeme. Die Autogas-Nutzung wird mit der Variante 4'500 Betriebsstunden (gemäss Kap. 2.7), die WKK-Anlage gemäss Kap. 3.1 berechnet.

		Autogas	WKK-Anlage
Anzahl Betriebsstunden	(Std./a)	4'500	5'000
Biogas-Verarbeitung	(m <sup>3</sup> /a)	198'000	555'000
Jahreskosten	(Fr.)	112'000.-	148'000.-
Äquivalente Menge Benzin	(Liter/a)	127'000	
Ertrag Autogas A (Fr. 1.25 pro Liter)	(Fr./a)	159'000.-	
Ertrag Autogas A pro m <sup>3</sup> Biogas	(Fr.)	0.80	
Ertrag Autogas B (Fr. 0.50 pro Liter)	(Fr./a)	93'000.-	
Ertrag Autogas B pro m <sup>3</sup> Biogas	(Fr.)	0.47	
Stromproduktion	(kWh/a)		1'050'000
Genutzte Wärme	(kWh/a)		520'000
Ertrag WKK-Anlage	(Fr./a)		190'000.- *
Ertrag WKK pro m <sup>3</sup> Biogas	(Fr.)		0.34
Gewinn A	(Fr./a)	46'000.-	43'000.-
Gewinn A pro m <sup>3</sup> Biogas	(Fr.)	0.23	0.08
Gewinn(+)/Verlust(-) B	(Fr./a)	-19'000.-	43'000.-
Gewinn(+)/Verlust(-) B pro m <sup>3</sup> Biogas	(Fr.)	-0.10	<u>0.08</u>

*Handwritten notes:*  
 10 Rp / m<sup>3</sup>  
 ~ 10 Rp / kWh  
 cf. 5.40

**Tabelle 7: Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen Autogas und Wärme-Kraft-Kopplung**

Der Bereich Biogasverwertung der Kompogasanlage Bachenbülach liefert mit der Wärme-Kraft-Kopplungsanlage einen jährlichen „Gewinn“ von rund Fr. 43'000.- an den Gesamtbetrieb. Die Nutzung des Biogases in Fahrzeugen ergibt einen „Gewinn“ von Fr. 46'000.-, sofern keine Steuern und Zollzuschläge abgeliefert werden müssen. Unter Einbezug dieser Abgaben würde ein jährlicher Verlust von Fr. 19'000.- resultieren.

*Handwritten calculation:*  

$$\frac{198'000.- - 1'050'000 \cdot 0.16}{520'000} = 4.2 \text{ Rp / kWh}$$
 (0.15)  
 (0.2)

Pro m<sup>3</sup> Biogas kann mit der WKK-Anlage ein Überschuss von 8 Rappen erzielt werden. Beim Verkauf des Gases als Autogas resultiert ein Überschuss von 23 Rappen (ohne Abgaben) bzw. ein Verlust von 10 Rappen (mit Abgaben) pro m<sup>3</sup> Rohgas. Unter den heutigen rechtlichen Bedingungen ist die Verwertung des Biogases in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen gegenüber dem Autogas wirtschaftlich interessanter. Dies gilt mindestens für eine breitere Anwendung, da die Anlage in Bachenbülach als Pilotanlage von den Abgaben befreit ist. Sollte allerdings der Treibstoff aus erneuerbaren Energien ohne Abgaben verkauft werden können -wie dies 1996 in den schweizerischen Räten diskutiert worden ist-, wird die Autogas-Nutzung auch aus finanzieller Sicht interessant.

#### **4. Substitution fossiler Energieträger**

Im Projekt Kompo-Mobil II in Bachenbülach sind seit der Inbetriebnahme (September 1995 bis April 1997) rund 42'000 m<sup>3</sup> Methangas mit einem Energiegehalt von gut 1460 GJ aufbereitet und in Flaschen abgefüllt worden.

Bei einer Auslastung von 4500 Stunden pro Jahr ist die Gasaufbereitungsanlage Bachenbülach in der Lage, jährlich gegen 120'000 m<sup>3</sup> aufbereitetes und in Flaschen abgefülltes Methangas zu produzieren. Dies erlaubt, jährlich 130'000 Liter Benzin zu ersetzen und den CO<sub>2</sub>-Ausstoss um über 280'000 kg zu vermindern.

#### **5. Zielerreichung des Projektes Kompo-Mobil II**

Die im Projekt vorgegebenen Ziele konnten erreicht werden.

- Gasqualität: Der Methangehalt liegt über 97%, der Taupunkt unter minus 65° C und der Schwefelwasserstoff kann vollständig entfernt werden.
- Der Energiebedarf für die Aufbereitung beträgt rund 8% in Bezug auf den Heizwert des aufbereiteten Methangases. Gegenüber der Aufbereitungsanlage im Projekt Kompo-Mobil I in Rümlang konnte der Energiebedarf pro m<sup>3</sup> Methangas auf rund einen Viertel gesenkt werden.
- Die gesamten Investitionskosten sind gegenüber der ersten Anlage (Kompo-Mobil I) trotz doppelter Durchsatzleistung rund 25% geringer.

- Dank den geringeren Investitions- und Betriebskosten konnten die spezifischen Kosten gegenüber Kompo-Mobil I um rund einen Faktor 4 gesenkt werden. In Bachenbülach belaufen sich diese unter der Annahme von jährlich 4500 Betriebsstunden auf 10 Rappen pro kWh Methangas.

Aufgrund der Entwicklungen, welche dank den beiden Kompo-Mobil-Projekten vorangetrieben worden sind, stehen heute praxiserprobte Gasaufbereitungsanlagen für Biogas zur Verfügung, welche bei geringem Energieeinsatz eine gute Gasqualität liefern. Die beteiligten Firmen sind im Markt tätig und setzen die Erfahrungen direkt in neuen Projekten um.

## 6. Ausblick

Mit den Erfahrungen in Bachenbülach kann die Wirtschaftlichkeit der Autogas-Nutzung weiter verbessert werden. Die Investitionskosten dürften bei einer neuen Anlage um rund Fr. 200'000.- niedriger ausfallen. Bei genügender grosser Nachfrage nach Bio-Treibstoff erlaubt die Gasaufbereitung eine jährliche Betriebsdauer von rund 5500 Stunden. Mit diesen Randbedingungen betragen die Kosten rund 60 Rappen pro Liter Benzinäquivalent.

$$\begin{aligned} &\rightarrow \text{Ca. } 650-200 \\ &= 460 \text{ kF} \\ &\text{für Ca.} \\ &200'000 \\ &\text{m}^3/\text{a} \end{aligned}$$

Andere heute in Erprobung stehende Bio-Treibstoffen (Methanol, Aethanol, RME) sind im Vergleich zu Methangas aus Biogas wesentlich teurer. Dies liegt insbesondere daran, dass Biogas im Rahmen der Verwertung häuslicher Abfälle als Nebenprodukt anfällt und die eigentliche Produktionsanlage hauptsächlich durch die Entsorgungsgebühren finanziert ist. Demgegenüber müssen bei anderen Bio-Treibstoffen die gesamten Kosten (Anbau, Ernte, Aufbereitung etc.) mit dem Ertrag aus dem Treibstoff gedeckt werden.

Inwieweit die energiepolitischen Diskussionen die Rahmenbedingungen für erneuerbare Energien verändern, werden die nächsten Jahre zeigen. Verschiedene aktuelle Anstrengungen (z.B. Lenkungsabgabe, Solarinitiative) zeigen positive Ansätze zu einer Verbesserung.