



Jahresbericht 24. Dezember 2009

Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen

Phase II: Bau und Betrieb eines
Funktionsmusters

Schlussbericht

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Biomasse und Verbrennung
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Apex AG
Industriestrasse 31
CH-4658 Däniken
www.apex.eu.com

Autoren:

Ueli Oester, Apex AG, info@apex.eu.com

BFE-Bereichsleiter: Sandra Hermle

BFE-Programmleiter: Sandra Hermle

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 151865 / 101564

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	4
1. Ausgangslage	5
1.1. Einleitung	5
2. Ziel der Arbeit	9
2.1. Neues Funktionsmuster	9
3. Methode/ Ergebnisse	10
3.1 Hauptmodule und Schlüsselkomponenten	10
3.2. Schlüsselkomponenten	10
3.3. Überprüfung der Schlüsselkomponenten	15
3.4. Versuche mit Erdgas	16
3.5. Versuche mit Methan-Kohlendioxid-Gemisch (Syngas)	17
3.6. Resultate	22
3.7. Wirtschaftlichkeit und Abschätzung für die Kleinserienfertigung	24
3.8. Synergien mit Erdgastankstellen	25
3.9. Zulassungsanforderungen	25
3.10. Vorschläge für eine Informationskampagne für potentielle Kunden	26
4. Diskussion	26
5. Schlussfolgerungen	27
Anhang	28

Zusammenfassung

Anärob produziertes Biogas von Bauernhöfen und kleineren Kläranlagen weist lediglich einen Methananteil von ca. 55% auf. Der Rest ist hauptsächlich Kohlendioxid (CO_2). Zur Fahrzeugbetankung ist ein Methananteil von 80 bis 90% nötig.

Versuche zeigten, dass sich die kryogene Gastrennung zur Abscheidung von Kohlendioxid eignet.

Das Hauptziel dieser Arbeit war das Auslegen und Erstellen eines Funktionsmusters, das mit landwirtschaftlichem Biogas betrieben werden kann. Kohlendioxid und Wasserdampf sollen so stark abgeschieden werden, das mit dem gereinigten Biogas Fahrzeuge betrieben werden können.

Grossanlagen zur Biogasaufbereitung existieren. Diese sind für Produktionsmengen ab $100\text{Nm}^3/\text{h}$ ausgelegt und zu teuer für kleine Biogasmengen landwirtschaftlicher Biogasanlagen.

Funktionsmuster

Aus unseren Vorarbeiten ist bekannt, dass sich Biogas aufgrund seiner Restfeuchtigkeit nicht direkt durch den Joule-Thomson-Effekt abkühlen lässt. Vereisungen verunmöglichen dies.

Ein Funktionsmuster mit zwei getrennten Kreisläufen wurde gebaut. Im Kühlkreislauf wird trockenes Erdgas/Biogas als Kühlmittel verdichtet und anschliessend in einer Düse entspannt. Der Druckabfall bewirkt eine starke Temperaturabnahme. In speziell entwickelten, kompakten Wärmetauschern wird Biogas durch das Kühlmittel gekühlt bis Kohlendioxid kondensiert und in einem Abscheider anfällt. Das abgeschiedene Kohlendioxid wird an die Umgebung abgegeben.

In Versuchen mit synthetischem Biogas (55%Methan, 45% CO_2) wurde erstmals Kohlendioxid abgeschieden und das aufbereitete Biogas in eine Gasflasche verdichtet. Mit einem Gasanalysegerät wurde aufgezeigt, dass mehr als 50% des enthaltenen Kohlendioxids abgeschieden werden konnten, was einem Methananteil von 80% entspricht. Die Anlage lief instabil und erforderte einen grossen manuellen Bedienungsbedarf. Aus diesem Grund wurde das Reinigungsmodul komplett überarbeitet. Das R+I-Schema blieb weitgehend gleich.

Resultate

Das Anfahrverhalten der Anlage ist gut. Nach 15 Minuten sind die Temperaturen soweit abgesenkt, dass eine CO_2 -Abscheidung eintritt. Die Versuche demonstrierten einen relativ stabilen Betrieb mit kleinem manuellem Bedienungsbedarf, den zukünftig eine SPS-Steuerung übernehmen kann.

Mit dem neuen Reinigungsmodul wurden Messungen mit Syngas (55% Methan, 45% CO_2) und landwirtschaftlichem Biogas (51%Methan, 40% CO_2 , 9% Rest) durchgeführt. In beiden Fällen konnten wir einen Methananteil von maximal 65% erreichen. Die Gasanteile aus den Prozessberechnungen stimmen ziemlich gut mit den gemessenen Temperatur / Druckprofilen überein.

Das landwirtschaftliche Biogas weist einen hohen Wassergehalt auf. Zwischen Rohgasverdichter und Reinigungsmodul ist ein Nachkühler und Wasserabscheidung installiert. Damit erzielten wir einen stabilen Betrieb, bisher ohne Beeinträchtigung durch den Wassergehalt im Rohgas.

Weiteres Vorgehen

Der Abscheidegrad von CO_2 muss stark verbessert werden. Die wichtigsten Parameter dazu haben wir identifiziert und Verbesserungen eingeleitet.

Weitere Versuche mit landwirtschaftlichem Biogas sind notwendig, um die Wassertoleranz des Reinigungsmoduls weiter zu erhärten und den angestrebten Methananteil von 80...90% zu erzielen. Dies soll uns im Laufe des 2010 gelingen.

1. Ausgangslage

In der Studie Phase I wurden verschiedene Möglichkeiten zur Trennung von CO_2 und Methan untersucht. Diese Analyse hat gezeigt, dass Prinzipversuche unerlässlich, um die Machbarkeit und die wirtschaftlichen Grenzen zu ermitteln.

Eine abschliessende Beurteilung der Machbarkeit und der Wirtschaftlichkeit der Aufbereitung von kleineren Biogasmengen kann erst im Versuch ermittelt werden.

In der Phase II soll ein Funktionsmuster für die experimentelle Verfahrensuntersuchung aufgebaut werden. Damit soll die Separierbarkeit von Methan und CO_2 durch Kondensation ermittelt werden.

Anfänglich wird für die Prinzipversuche ein Gasgemisch (Syngas 55% CH_4 / 45% CO_2) als Ausgangsprodukt verwendet. Anschliessend wird die Anlage mit bäuerlichem Biogas betrieben.

1.1. Einleitung

Um Biogas als Treibstoff für Fahrzeuge verwenden zu können, sollte der Methananteil mindestens 80...90Vol% betragen. Landwirtschaftlich produziertes Biogas besteht hauptsächlich aus Methan (ca.55%) und Kohlendioxyd (CO_2 , ca. 45%). Für die Fahrzeugbetankung muss das Kohlendioxid vom Methan abgeschieden werden und das gereinigte Biogas in trockener Form vorliegen.

In einem vorangegangenen Projekt von Wirtschaftsingenieurstudenten wurde eine Marktstudie für eine Biogastankstelle auf Bauernhöfen durchgeführt. Das Resultat war, dass sich Biogas-Landwirte durchaus vorstellen können, parallel zum existierenden BHKW, eine Biogastankstelle zu betreiben, statt als Anlagenerweiterung ein zweites BHKW zu installieren. Bedingung ist: die Anschaffungs- und Betriebskosten bzw. die Wirtschaftlichkeit darf nicht schlechter sein als ein zweites BHKW.

Es existieren bereits Anlagen zur Biogasaufbereitung für grosse Biogasmengen, doch solche sind um ein Vielfaches zu teuer für den Einsatz auf einem Bauernhof oder einer Kläranlage.

1.1.1. Verfahrensprinzip

Methan weist einen starken Joule-Thomson-Effekt auf. Durch Expansion von Methan kann eine starke Temperaturabsenkung erreicht werden. Wird Biogas bei einem bestimmten Druck genügend gekühlt, wird Kohlendioxid kondensiert und als Flüssigkeit abgeschieden.

Biogas kann aufgrund seinem hohen Feuchtigkeitsgehalt nicht direkt in einer Düse expandiert und abgekühlt werden ohne Vereisung der Expansionsdüse. Aus diesem Grund ist im entwickelten System ein geschlossener Methan-Kühlkreislauf integriert (siehe: Bild 1: vereinfachtes Prinzipschema).

Das Kühlmittel wird in einem Verdichter auf ca. 170 bar komprimiert und durchströmt eine Düse. Der Druckabfall über der Düse bewirkt eine starke Temperatursenkung des Kühlmittels. Im nachfolgenden Wärmetauscher kühlt sich das Biogas ab, sodass sich Kohlendioxid verflüssigt und im Abscheider vom Biogas getrennt werden kann. Das aufbereitete Biogas wird in einem Gasbehälter gespeichert und steht für die Fahrzeugbetankung bereit.

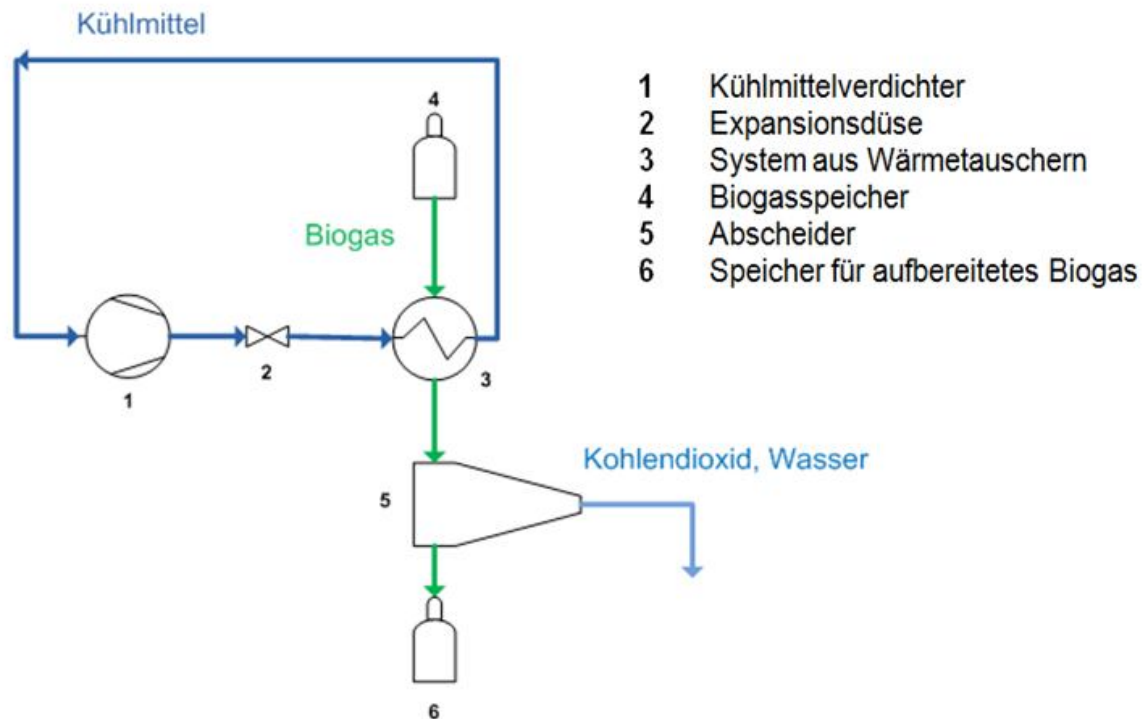


Abbildung 1: Vereinfachtes Prinzipschema

1.1.2. Ziel

Das Ziel ist das Erstellen und Dokumentieren eines Funktionsmodells für die Biogasaufbereitung, Verdichtung, Speicherung und Fahrzeugbetankung.

Teilmodule

Der eine Verdichter komprimieren das Kühlmittel in einem geschlossenen Kreislauf. Der zweite Verdichter komprimiert das rohe Biogas. Das Reinigungsmodul bildet das Herzstück der Anlage und besteht aus mehreren Wärmetauschern, einer integrierten Düse zur Expansion, einem Wasserabscheider und einem Abscheider für Kohlendioxid. Das Kohlendioxid wird an die Umwelt abgegeben.

Der Verdichter für die Speicherung des gereinigten Biogases, das Flaschenbündel und die Fahrzeugbetankungsvorrichtung entsprechen dem Stand der Technik. Diese Module sind vielfach erprobt und werden durch die Apex AG als BONSAI-Tankstelle vertrieben (siehe Anhang: BONSAI-Tankstelle).

1.1.3. Arbeiten im Vorfeld

Zum Thema der vorliegenden Arbeit wurden bereits vier Berichte verfasst, welche sich mit unterschiedlichen Aspekten befassten. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse der einzelnen Berichte beschrieben (siehe: Literaturverzeichnis im Anhang)

Zwischenbericht Phase I¹

In einer Untersuchung von verschiedenen Trennverfahren von Methan und Kohlendioxid standen die kryogene Gastrennung, die Membrantrennung und die Druckwechseladsorption zur Auswahl.

Ein direkter Vergleich der genannten drei Verfahren zeigte, dass die Entspannungskondensation am meisten Vorteile bringt und somit weiterverfolgt wird. Als Kriterien zu dieser Bewertung galten: Investitionskosten, Betriebskosten, Wartungsaufwand, Zukunft, Ausbeute und Energiebedarf.

¹ Vgl.: Oester Ueli. (2006): Zwischenbericht I

Die theoretischen Analysen lassen noch keine endgültigen Schlüsse zu, welches Gastrennungungsverfahren sich wirklich am besten für die Biogasaufbereitung eignet. Prinzipversuche sind daher unerlässlich.

Erste Versuche mit der Verdichtung von Rohgas wurden in einem vierstufigen, ölfreien Hochdruckverdichter (FuelMaker Typ C3, Fördermenge ca. 2.5 Nm³/h) vorgenommen. Die dritte Verdichtungsstufe wies nach einer Betriebszeit von 140 Stunden starke Abriebe auf, da Wasser und CO₂ dort ausfallen und zu Kolbenringverschleiss führen. Alle nicht behandelten Schrauben, die in Kontakt mit dem Biogas standen, wiesen Rostspuren auf.

Zwischenbericht Phase II²

Der zweite Zwischenbericht diskutierte die ersten Prinzipversuche.

Die Machbarkeit der Biogasreinigung mittels kryogener Gastrennung für kleine Biogasmengen scheint nach den ersten Vorversuchen möglich. Die Hauptkriterien dazu sind:

- Erreichen genügend tiefer Temperaturen durch gute Isolation
- Die Verdichter- und Abscheidertechnologien sind erhältlich, müssen aber für diese Anwendung angepasst werden (z.B. Korrosion, Druckbereiche, Steuerung)
- Die Entspannungsdestillation sollte keine beweglichen Teile enthalten und dadurch wartungsarm sein

Die Versuche sind nicht weit genug fortgeschritten, um verlässlichere Aussagen zu treffen. Konstruktionsänderungen und weitere Versuche sind unumgänglich.

Auch in diesem Verfahren wird sich Methanschlupf einstellen. Die Menge muss im Versuch ermittelt werden mit dem Ziel, den Methanschlupf so gering wie möglich zu halten. Mögliche Varianten zur Minimierung der Methanemissionen an die Atmosphäre sind einerseits das Rückführen in die Biogasproduktionsanlage und andererseits das Abfackeln.

Der erreichbare Methananteil sollte 90% übersteigen, um eine gute motorische Verbrennung zu erzielen. Für die Einspeisung ins Erdgasnetz ist Erdgasqualität zu erreichen. Ein weiteres Kriterium ist der minimale Methanschlupf.

Die Membrantrennung wird von der Berner Fachhochschule in Burgdorf untersucht.

Eine erste Anlage von QuestAir Technologies Inc. (Druckwechseladsorption) ist im Rheintal in Betrieb. Der Erfolg der Anlage wird beobachtet.

Marktstudie³

Die marktseitige Situation wurde von vier Wirtschaftsingenieurstudenden untersucht. Ihre Empfehlungen für die Firma Apex AG besagen, dass ein grosses Interesse an der Nutzung von Biogas als Treibstoff vorhanden ist. Im Allgemeinen wird die Entwicklung einer günstigen und einfachen Biogasaufbereitungsanlage sehr begrüsst. Ausschlaggebend ist der Preis einer entsprechenden Anlage, da die KEV, Ökostromzulagen und der Landwirtschaftsbonus vor allem Blockheizkraftwerke unterstützen bzw. die ökologische Nutzung von Biogas zur Stromproduktion.

² Vgl.: Oester Ueli. (2008): Zwischenbericht II

³ Vgl.: Cazin Andreas, Fischer David, Dietrich Pascal, Lüthi Samuel. (2008): Marktabklärung für kleinere Biogasaufbereitungsanlagen

Projektarbeit 5⁴

Als Projektarbeit an der FHNW in Windisch wurde die Expansion von Biogas bzw. das Erreichen von möglichst tiefen Temperaturen untersucht. Damit kann Kohlendioxid kondensiert und abgeschieden werden. Aus dieser Arbeit konnten zwei Hauptaspekte entnommen werden:

- Unaufbereitetes Biogas kann nicht direkt in einer Düse expandiert werden, denn die Feuchtigkeit im Gas ist zu hoch. Die Düse vereist und verstopft. Aus diesem Grund wird ein geschlossener Kühlkreislauf benötigt. In Wärmetauschern wird das Biogases abgekühlt, damit Kohlendioxid kondensiert.
- Um genügend tiefe Temperaturen für die Kohlendioxidabscheidung zu erreichen, muss das Kühlmittel selbst vor der Expansion vorgekühlt werden. In einem Versuch mit Erdgas als Kühlmittel konnten so Temperaturen von ca. -110°C erreicht werden.

⁴ Vgl.: Ritter David. (2008): Projektarbeit 5. Prozessoptimierung: Treibstoffproduktion aus Biogas

2. Ziel der Arbeit

2.1. Neues Funktionsmuster

Aus unseren Vorarbeiten ist bekannt, dass sich Biogas aufgrund seiner Restfeuchtigkeit nicht direkt durch den Joule-Thomson-Effekt abkühlen lässt. Vereisungen verunmöglichen dies.

Ein neues Funktionsmuster mit zwei getrennten Kreisläufen wurde gebaut. Im Kühlkreislauf wird trockenes Erdgas/Biogas als Kühlmittel verdichtet und anschliessend in einer Düse entspannt. Der Druckabfall bewirkt eine starke Temperaturabnahme. In speziell entwickelten, kompakten Wärmetauschern wird das Biogas durch das Kühlmittel gekühlt, bis Kohlendioxid kondensiert und in einem Abscheider anfällt. Das abgeschiedene Kohlendioxid wird an die Umgebung abgegeben.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist das Erstellen eines Funktionsmusters zur Abscheidung von Kohlendioxid gemäss dem untenstehenden Schema.

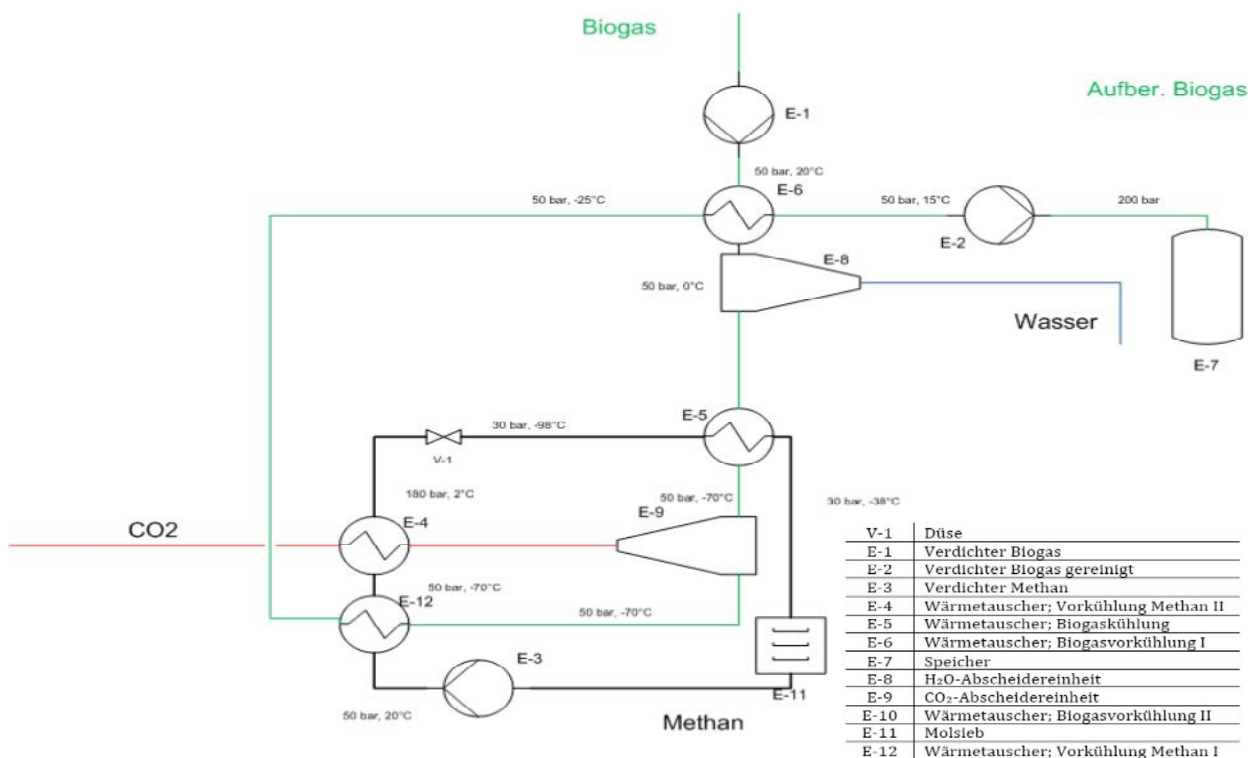


Abbildung 2: Grundschemata

Die eingetragenen Drücke und Temperaturen entsprechen den ersten Daten der Auslegerechnungen. Als grundsätzliche Annahmen für die Auslegung gelten die Eingangstemperaturen von Biogas und Kühlmittel in das System nach dem Verdichter. Diese Temperaturen sind Erfahrungswerte.

Zur Überprüfung der Anlage wird synthetisches Biogas (Syngas bestehend aus 55Vol% Methan und 45Vol% Kohlendioxid) verwendet. Es wird ein Reinheitsgrad von 90% Methananteil angestrebt. Die Rahmenbedingungen für den dargestellten Prozess sind:

- Eingangsdruck Methan (vor Düse): ca. 180 bar, ca. 110bar bei Düse mit 0.3mm Ø
- Ausgangsdruck Methan (nach Düse): ca. 30 bar, ca. 0bar bei Düse mit 0.3mm Ø
- Druck Biogas: ca. 50...60 bar
- Fördermenge Methan: 2.5Nm³/h bis ca. 5Nm³/h
- Fördermenge Biogas: ca. 3Nm³/h

Die Fördermengen von Kühlmittel und Biogas können je nach Bestückung der Anlage variieren.

3. Methode / Ergebnisse

3.1. Hauptmodule und Schlüsselkomponenten

Im Prozess als Schlüsselkomponenten identifiziert sind die Düse, die Abscheider, die Wärmetauscher und die Verdichter. Diese Komponenten sind einerseits Neuentwicklungen oder bestehende Module mit neuem Einsatzbereich.

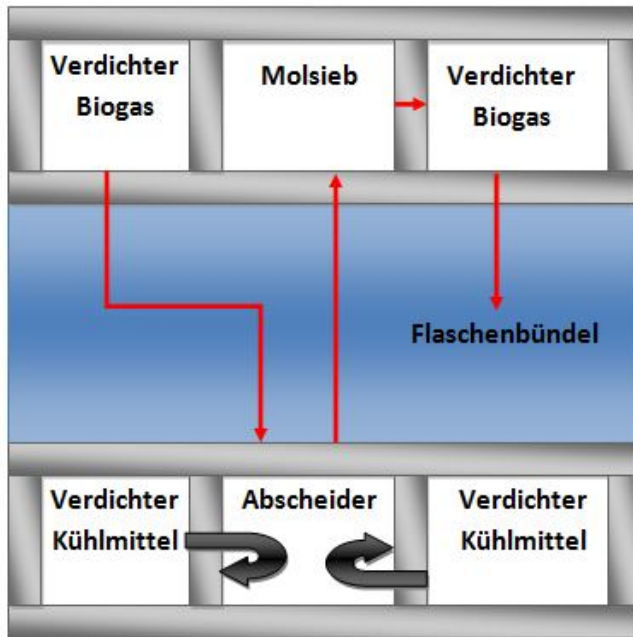


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Anlage

Gesamtanlage bestehend aus:

Rohbiogasverdichter, Reinigungseinheit (Abscheider), Kühlmittelverdichter, Biogasverdichter (gereinigt), Flaschenbündel für die Fahrzeugbetankung

Das Gesamtsystem ist auf einem Stahlrahmen montiert, bestückt mit vier Verdichtern der Marke FuelMaker®, Reinigungsmodul und einem Flaschenbündel mit sechs Hochdruckflaschen für die Speicherung des gereinigten Biogases zur Fahrzeugbetankung. Die gesamte Einheit kann mit einem Stapler verschoben werden.

Die Trennung von Kühlmittelkreislauf und Biogaskreislauf ist ersichtlich.

3.2. Schlüsselkomponenten

3.2.1. Prozessschema

Die Entwicklung des Prozessschemas war ein iterativer Prozess und basierte hauptsächlich auf den Erkenntnissen von Versuchen. Die Anordnung der Komponenten hat sich während des Projektverlaufes stetig verändert und neue Komponenten sind hinzugekommen.

Die schwarzen Leitungen beinhalten das Kühlmittel. Dieses wird im Verdichter E-3 auf 180 bar komprimiert, bevor es anschliessend im ersten Wärmetauscher E-12 durch das aufbereitete Biogas vorgekühlt wird. Im Wärmetauscher E-4 wird es durch das abgeschiedene Kohlendioxid weiter vorgekühlt. Durch das Passieren der Düse V-1 kühlt sich das Gas stark bis auf ca. -100°C ab. Im Wärmetauscher E-5 kühlt das Kühlmittel den Biogasstrom ab, sodass Kohlendioxid kondensiert und im Abscheider E-17 vom aufbereiteten Biogasstrom getrennt wird. Das Biogas tritt in das System, indem es im Verdichter E-1 auf 50-60 bar komprimiert wird. Anschliessend wird es durch das Kühlmittel vorgekühlt auf ca.

0°C, Wasser wird im Abscheider E-20 abgeschieden und das Biogas wird weiter vorgekühlt, bevor es den Wärmetauscher E-17 durchströmt. Nach dem Passieren des Wärmetauschers E-12 wird das Biogas auf ca. 200 bar verdichtet und im Speicher E-7 gesammelt.

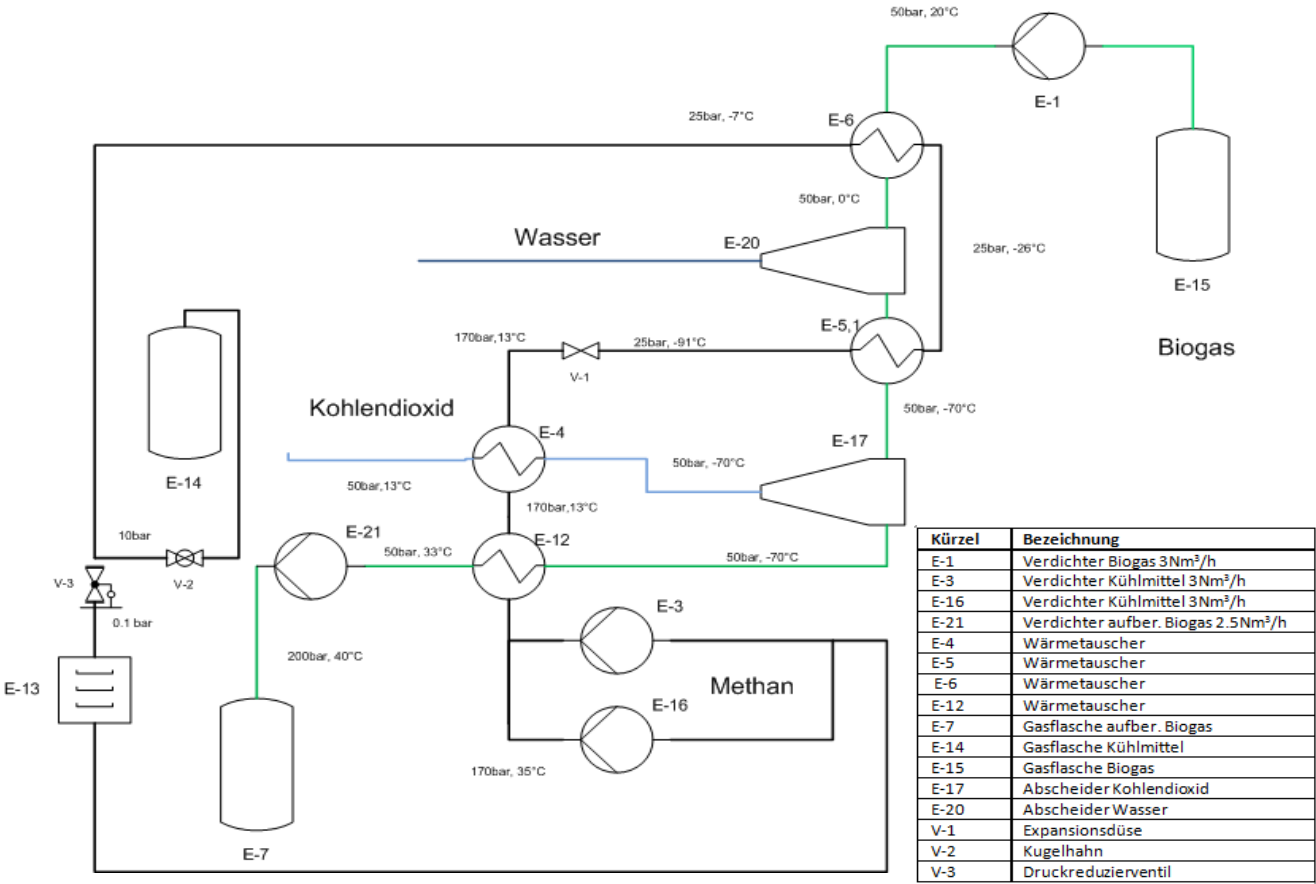


Abbildung 4: Prozessschema der Gesamtanlage

3.2.2. Kühlmittelverdichter

Die Verdichter sind vierstufige, ölfreie Kolbenverdichter des Typs FuelMaker® . Sie werden zur Erdgasverdichtung eingesetzt und arbeiten bei einem Eingangsdruck von 100mbar bis zu einem Maximaldruck von 200bar. Der Strombedarf ist ca. 1.2...1.5 KW pro Verdichter.

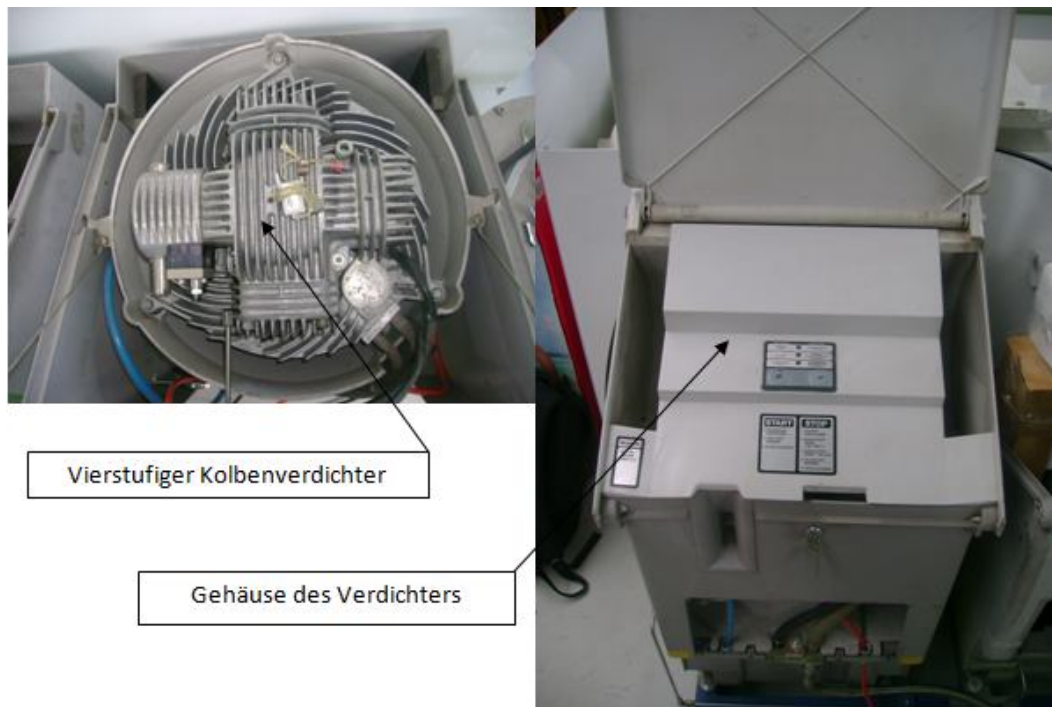


Abbildung 5: FuelMaker® Typ FM4

Die Fördermenge der Verdichter beträgt ca. $2.3 \dots 3 \text{ Nm}^3/\text{h}$, je nach Verdichtertyp. Für die Versuche mit dem Kühlmittelkreislauf wurden zwei verschiedene Typen verwendet (Booster mit $3 \text{ Nm}^3/\text{h}$ und normaler Verdichter mit $2.3 \text{ Nm}^3/\text{h}$). So kann die Fördermenge für den Eingangsdruck in die Düse variiert und die optimale Fördermenge für die gewünschte Druckdifferenz über der Düse bestimmt werden.

3.2.3. Verdichter Biogas

Die Verdichter für Biogas sind identisch mit denjenigen für das Kühlmittel. Auch hier wurde ein Booster und ein normaler Verdichter eingesetzt.



Abbildung 6: Biogasverdichter (links für Rohgas, rechts für das gereinigte Biogas)

3.2.4. Reinigungsmodul

Das Herzstück der Anlage bildet das Abscheidermodul. Es beinhaltet Wärmetauscher, die Expansionsdüse und die Abscheider.

Die Abbildung 7 und 8 zeigen den Zusammenbau des ersten Reinigungspakets für die Versuche mit Syngas. Das Modul weist keine beweglichen Teile auf und ist kompakt gebaut. Aufgrund der tiefen Temperaturen im System wurden alle Rohrleitungen isoliert. In der Skizze ist die Isolation nicht ersichtlich und auf dem Bild aus Anschauungsgründen teilweise entfernt.

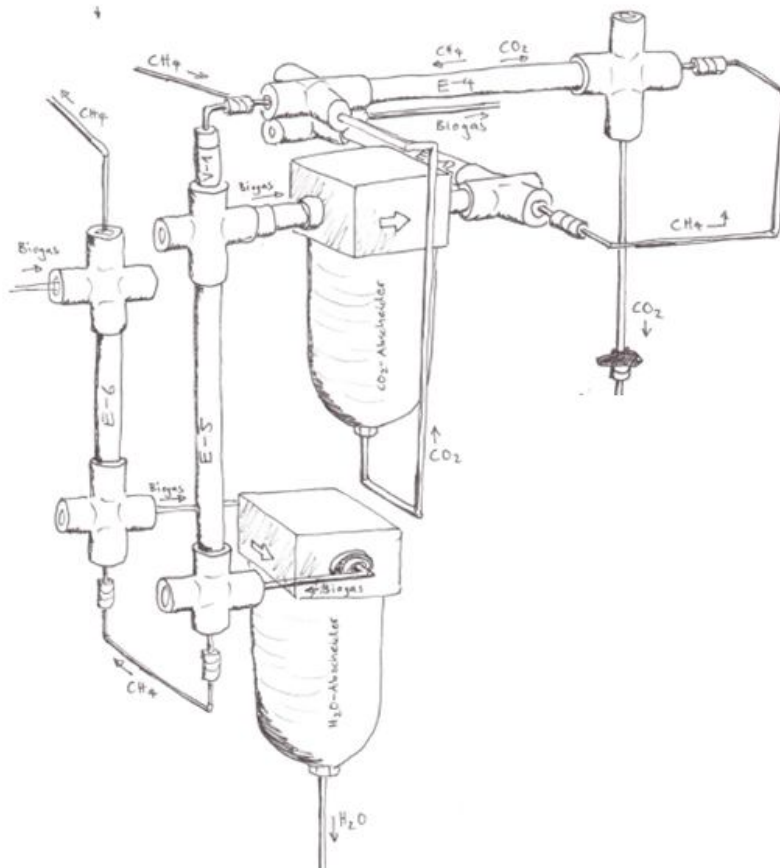


Abbildung 7: 3-D-Skizze des ersten Reinigungsmoduls

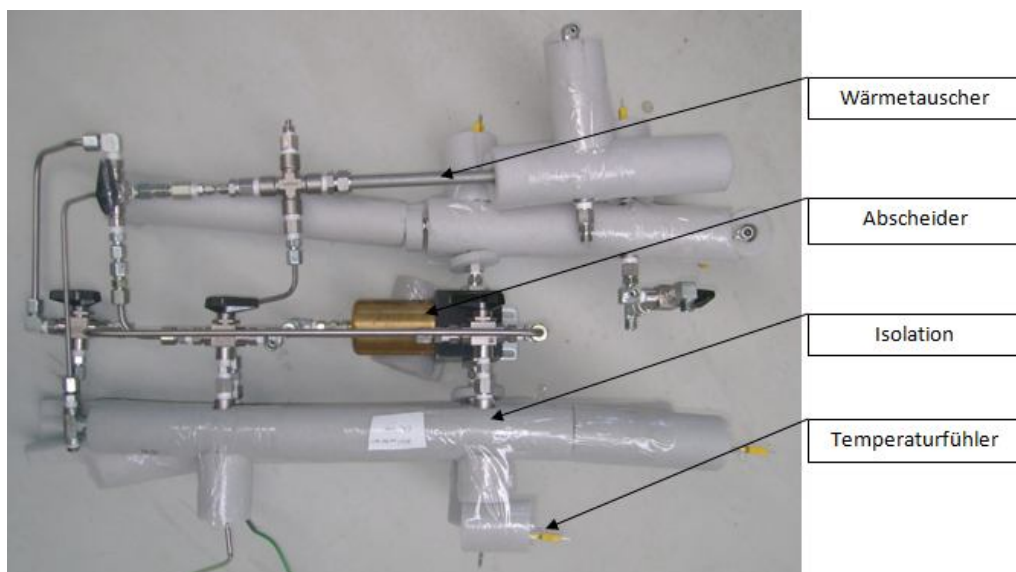


Abbildung 8: Foto des ersten Reinigungsmoduls



Abbildung 9: In die Anlage integriertes Reinigungsmodul

Eine optimale Isolation der Komponenten ist sehr wichtig. In einem Vorprojekt konnten wir zeigen, dass mit guter Isolation der Kälteverlust um ca. 50% tiefer ausfällt als ohne Isolation. Als Isolationsmaterial dienten handelsübliche Rohrisolationsstangen.

Um Kohlendioxid effizient abscheiden zu können, muss das Biogas bis auf eine Temperatur von mindestens -50 bis -60°C gekühlt werden. Bei den Auslegungsrechnungen wurde mit einer Temperatur von -70°C gerechnet.

3.2.5. Wärmetauscher

Da die Stoffflüsse (Biogas und Kühlmittel) getrennt werden müssen, muss die Wärme des Biogases über Wärmetauscher an das Kühlmittel übertragen werden. Der Temperaturbereich der Wärmetauscher erstreckt sich von ca. 40°C bis ca. -90°C . Alle verwendeten Wärmetauscher werden nach demselben Prinzip aufgebaut und unterscheiden sich lediglich durch ihre Länge. Der Aufbau der Wärmetauscher ist eine Neuentwicklung.

3.2.6. Düse

Bei einem gegebenen Massenstrom kann mit der Düse das Druckverhältnis eingestellt werden. Je kleiner der Düsendurchmesser, desto grösser das Druckverhältnis und desto grösser die Temperaturabsenkung. Die Wahl des Düsendurchmessers wird bestimmt durch die notwendige Kühlleistung, das minimale Temperaturniveau sowie dem kleinsten Düsendurchmesser für zuverlässigen Betrieb (Verunreinigung, Vereisungsgefahr, siehe Abbildung 11).

Vereisungen können auftreten, weil das Kühlmittel im geschlossenen Kreislauf eine minimale Restfeuchtigkeit aufweist. Aus diesem Grund strömt es stets durch eine Molsiebpackung.



Abbildung 10: Düse Typ 264 RX 30

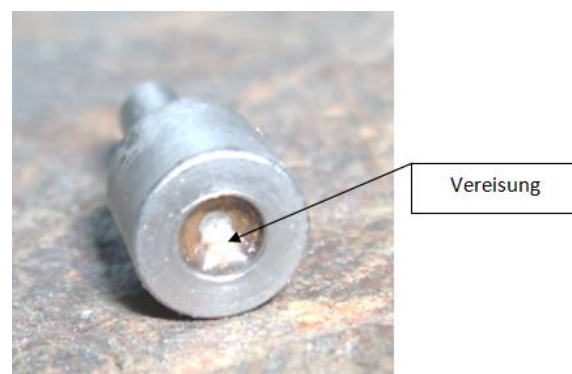


Abbildung 11: Düse mit Vereisungen

3.2.7. Abscheider

Die Gehäuse der Abscheider sind für den Betriebsdruck von 60bar ausgelegt. Entscheidend für den Reinheitsgrad des aufbereiteten Biogases ist der Abscheidungswirkungsgrad für die kondensierenden Bestandteile (Wasserdampf, CO₂-Nebel).

3.3. Überprüfung der Schlüsselkomponenten

Die Überprüfung der Schlüsselkomponenten beinhaltet eine rechnerische Auslegung und eine Überprüfung in Versuchen. So konnten die Einflüsse auf die Schlüsselkomponenten untersucht werden. Der Gesamtprozess kann aufgeteilt werden in drei Teilprozesse:

- Expansion: Druckabfall in der Düse
- Wärmeübertragung: Temperaturprofil in den Wärmetauschern
- Abscheidung: von Wasser und Kohlendioxid

3.3.1. Wärmetauscher

Die Validierung der Berechnungen von Wärmetauschern und die Expansion in der Düse wurden durch Versuche durchgeführt. Die Temperaturen und Drücke wurden gemäss dem Schema in Abbildung 12 gemessen. Die Abscheider konnten nicht überprüft werden, da der Versuch mit Erdgas gefahren wurde und somit keine Kondensation von Bestandteilen des Gases stattfand.

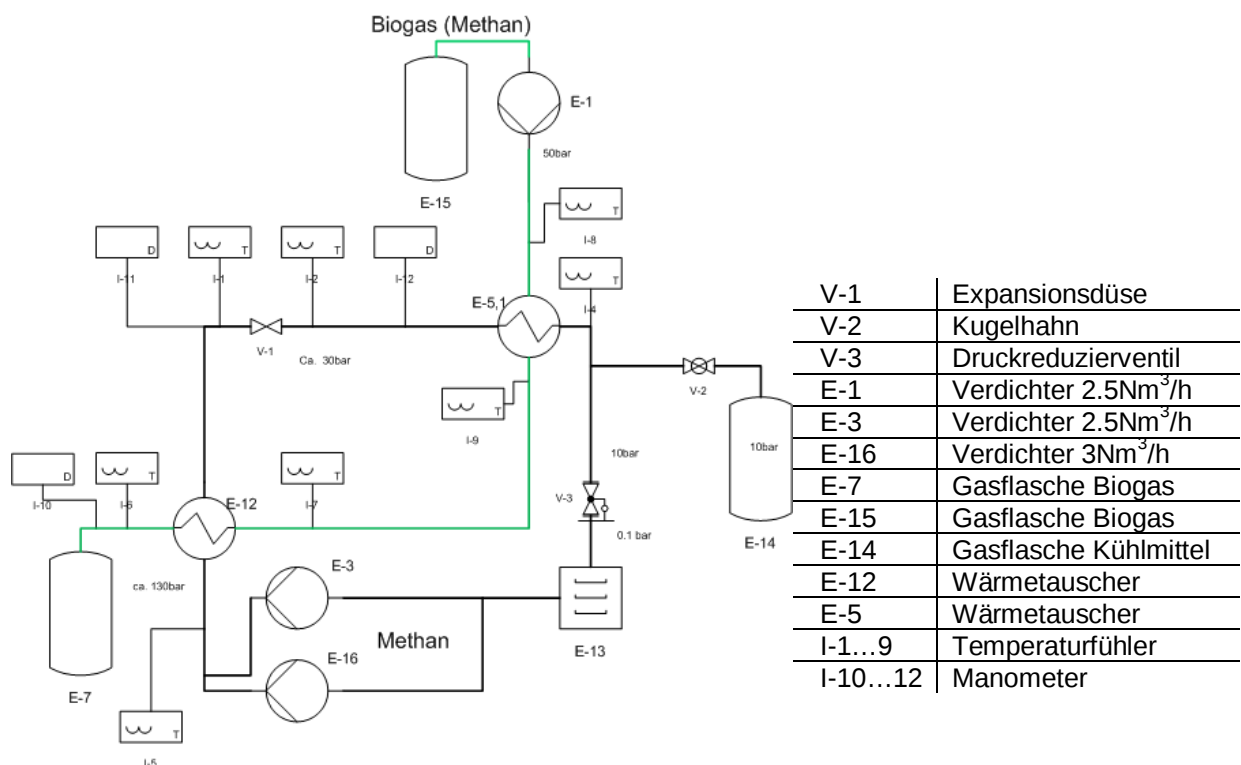


Abbildung 12: Schema des Versuchsaufbaus (ohne Sicherheitsventile dargestellt)

Validierung der Wärmetauscher mittels Simulation und Versuch

Um eine erste Abschätzung über die Richtigkeit der Wärmetauscherauslegung treffen zu können, wurde die Wärmeübertragung simuliert und anschliessend mit den Ergebnissen der Rechnung verglichen. Die Simulation wurde im Programm ANSYS ICEM 11.0 durchgeführt. Die Simulation ergab einen realistischen Temperaturverlauf.

Die Wärmetauscherrechnung konnte mit den Messdaten aus dem Versuch wiederholt werden.

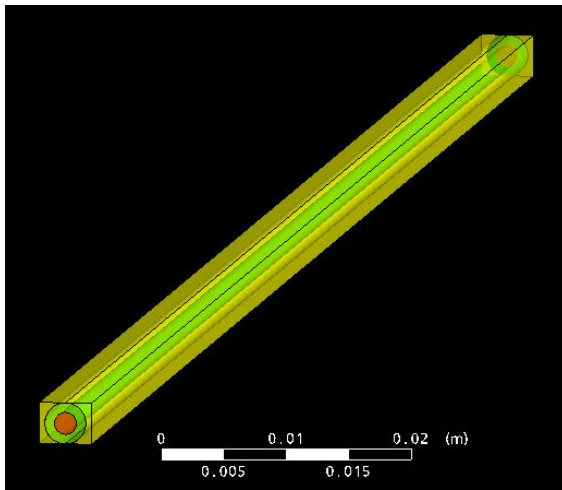


Abbildung 13: Geometrie der Simulation

3.3.2. Abscheider

Als Abscheider für Wasser und Kohlendioxid wurden jeweils gleiche Module eingesetzt. Mit unterschiedlichen Koaleszenzfilter-Einsätzen kann die Abscheidungsqualität untersucht werden.

Eine aussagekräftige Überprüfung kann bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht gemacht werden, dazu fehlen weitere Messungen mit verschiedenen Filterporenweiten. Es wurde lediglich festgestellt, dass Kohlendioxid abgeschieden werden kann.

3.4. Versuche mit Erdgas

Der Versuch wurde mit einem Booster und einem normalen FuelMaker® zur Verdichtung des Kühlmittels durchgeführt. Daraus resultierte eine Fördermenge von $5.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bei einer Gastemperatur von $+28^\circ\text{C}$. Das Erdgas wurde mit einem FuelMaker® mit einer Fördermenge von $2.8 \text{ Nm}^3/\text{h}$ in das System gespeist. Der Druck des Kühlmittels beim Eintritt betrug 180bar, beim Austritt 20bar. Die Umgebungstemperatur betrug 21.8°C .

Das Kühlmittel kühlt sich innerhalb weniger Minuten von 28°C auf -50°C ab.

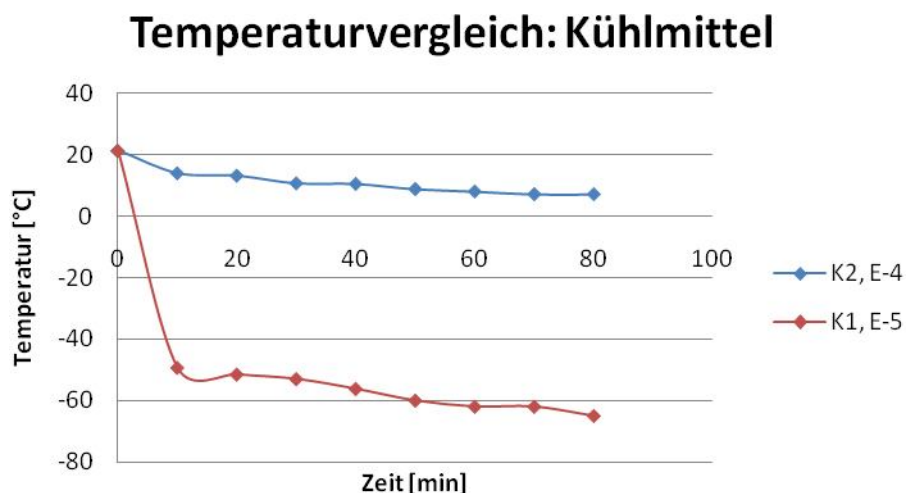


Abbildung 14: Temperaturverlauf: Kühlmittel

(K2,E-4:Austritt aus Vorkühler E-4; K1,E-5: Eintritt in Wärmetauscher E-5)

Die Ein- und Austrittstemperaturen des Abscheiders wurde ebenfalls gemessen. Bei einem adiabaten System müssten die Temperaturen identisch sein. Da der Abscheider jedoch eine grosse Masse aufweist, die ebenfalls von Raumtemperatur bis auf die Betriebstemperatur gekühlt werden muss, sind die Temperaturen nicht identisch. Obschon die Masse des Abscheiders im Verhältnis zu den weiteren Komponenten erheblich ist, beträgt die Temperaturdifferenz nach achtzig Minuten lediglich 6.4°C. Dies ist auf die Isolation des Abscheiders zurückzuführen. Der Abscheider wurde nicht mit Isolationsstangen isoliert sondern mit handelsüblichem Styropor ummantelt.

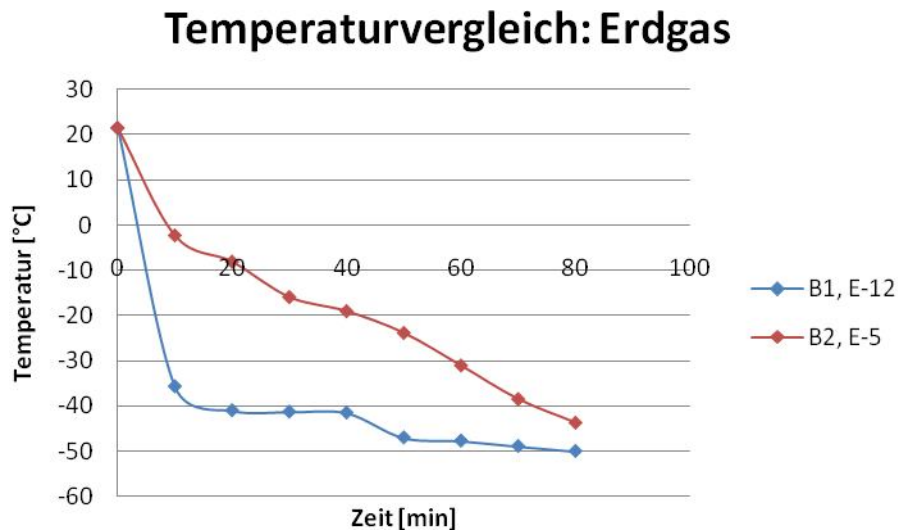


Abbildung 15: Temperaturverlauf: Erdgas (Biogasprozess)
(B1,E-12:Eintritt in Abscheider E-17; B2,E-5: Austritt aus Abscheider E-17)

3.5. Versuche mit Methan-Kohlendioxid-Gemisch (Syngas)

3.5.1. Erste Abscheidungsversuche

Das Ziel dieses Versuches war die Abscheidung von Kohlendioxid. Nachdem die Temperaturen im Abscheider im Bereich von -65°C liegen sollte die CO₂-Abscheidung vom Biogas gelingen. Das aufbereiteten Gas wird in einer Gasflasche gesammelt und das Kohlendioxid mit einem Abgasanalysegerät Typ Anapol S200 gemessen.

Die Zusammensetzung des Ausgangsmischgases ist gegeben mit 55Vol% Methan und 45Vol% Kohlendioxid. Die Fördermengen waren identisch mit früheren Versuchen, die Umgebungstemperatur betrug 21°C, die Ein- und Austrittsdrücke des Kühlmittels 170bar und 20bar.

Die Messresultate entsprachen nicht den Erwartungen. Da die Kühlmitteltemperatur beim Eintritt in den Wärmetauscher E-5 nicht unter -51° sank, wurde der Versuch abgebrochen.

Die Rahmenbedingungen waren mehrheitlich identisch mit vorgängigen Versuchen, doch die Temperaturen sanken weniger stark. Die Beobachtungen während des Versuches lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es wurde kein Kohlendioxid abgeschieden.
- Das Kühlmittel konnte nicht genügend vorgekühlt werden.
- Es traten Leckagen im Kühlkreislauf auf. → Es musste Kühlmittel nachgespeist werden.
- Ein weiteres Absenken der Kühlmitteltemperatur beim Eintritt in E-5 war nicht möglich.
- Das Diagramm (Abbildung 16) zeigt, wie die genannten Tatsachen zusammenhängen.

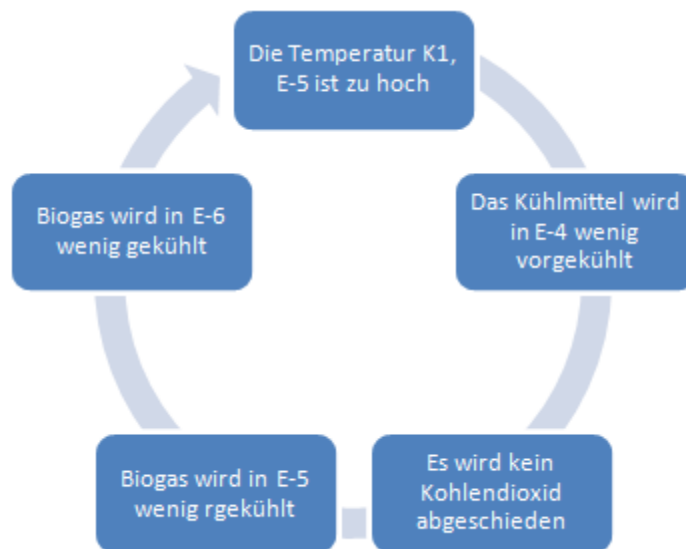


Abbildung 16: „Teufelskreis“ der Biogasabkühlung

Beim Eintreten einer der oben dargestellten Einflussfaktoren werden alle anderen negativ beeinflusst. Es wird davon ausgegangen, dass der Prozess stabil läuft, sobald sich die angenommenen Temperaturen der Berechnung eingestellt haben. Das Anfahrverhalten der Anlage wurde nicht berücksichtigt.

Für einen weiteren Versuch wurde die Anlage erneut umgebaut.

3.5.2. Verbesserung des Anfahrverhaltens durch Vorkühlung

Die Anlage wurde zuerst im Kreislauf betrieben und so vorgekühlt. Damit erreichte sie die ausgelegten Betriebsbedingungen. Mit einem zugeschalteten, zweiten Kühlmittelverdichter sank die Temperatur rasant und erreichte ein Minimum von -83°C .

Zum Vergleich: In einem Prinzipversuch der Expansion von vorgekühltem Erdgas (siehe „Projektarbeit 5“ von D.Ritter,2009) konnten mittels Vorkühlung tiefe Temperaturen bis zu -110°C erreicht werden.

CO₂-Abscheidung

Mit dem vorgekühlten Reinigungsmodul gelang mit synthetischem Biogas (55%Methan, 45%CO₂) die CO₂-Abscheidung. Das aufbereitete Biogas wurde in eine Gasflasche verdichtet. Die Messung ergab 20.3 Vol% Kohlendioxidanteil. Mit einem Abgasanalysegerätes wurde aufgezeigt, dass mit dem Anfangsgehalt von 45% somit mehr als 50% des enthaltenen Kohlendioxids abgeschieden werden konnte (siehe „Schlussbericht“ von D.Ritter,2009). Dies entspricht einem Reinheitsgrad von 80% Methananteil.

Zum Vergleich wurde der Kohlendioxidgehalt von Biogas aus einer anderen Aufbereitungsanlage (ex-Carbotech, Essen) gemessen, die während Jahren in Biel einen LKW betankte. Der Methananteil aus dieser Anlage war 80%.

Betriebsverhalten

Die Anlage lief sehr instabil und erforderte einen grossen manuellen Bedienungsbedarf. Diese Tatsache führte zu einen weiteren Umbau der Anlage.

3.5.3. Neukonstruktion Reinigungsmodul

Das Reinigungsmodul wurde komplett überarbeitet mit weitgehend gleich gebliebenem R+I-Schema. Alle Prozessanschlüsse und Druckmessstellen sind ausserhalb des Isolationspakets montiert. Die Temperaturfühler (Typ K-Thermoelemente) messen an neuralgischen Punkten im Reinigungsmodul.



Abbildung 17: Neues Reinigungsmodul (inkl. Isolation)

Das Anfahrverhalten der Anlage ist gut. Nach 15 Minuten sind die Temperaturen soweit abgesenkt, dass eine CO₂-Abscheidung eintritt. Die Versuche demonstrierten einen relativ stabilen Betrieb mit kleinem manuellem Bedienungsbedarf, den zukünftig eine SPS-Steuerung übernehmen kann.

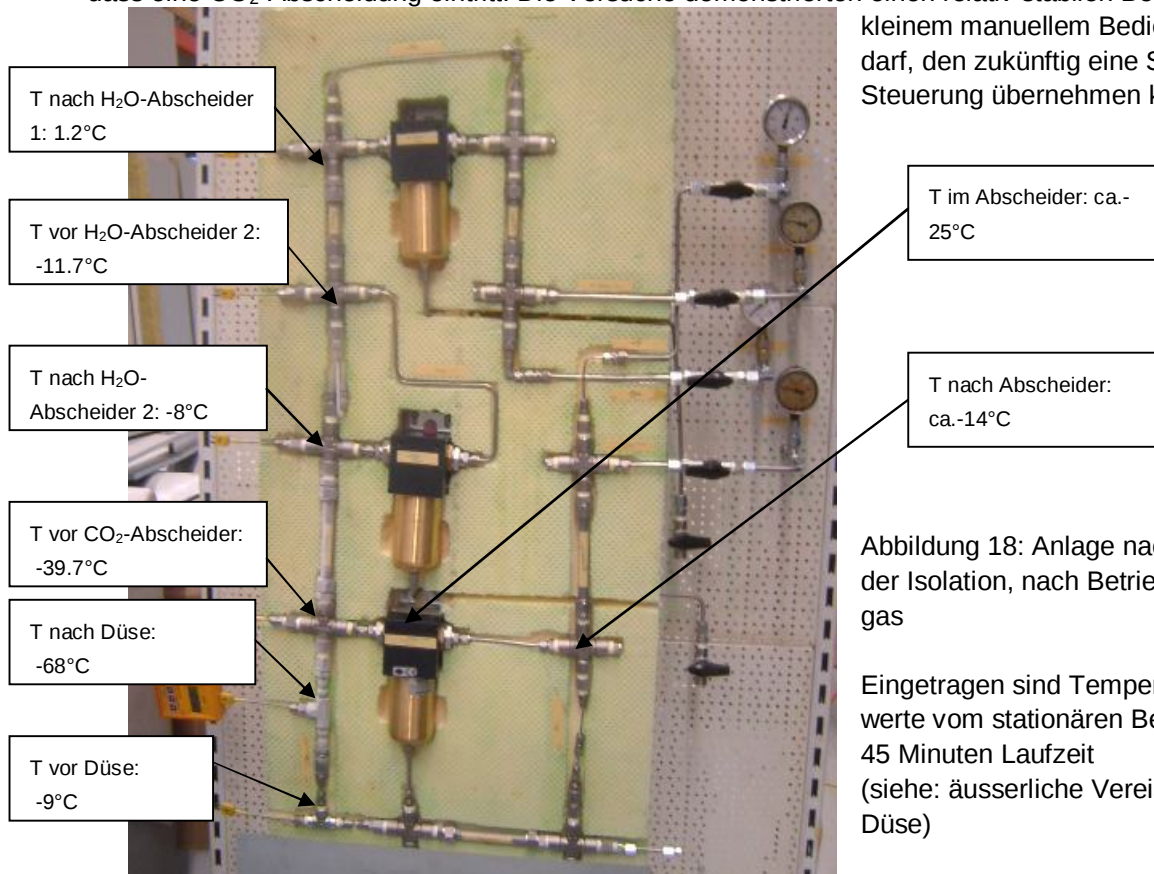


Abbildung 18: Anlage nach Öffnen der Isolation, nach Betrieb mit Biogas

Eingetragen sind Temperaturmittelwerte vom stationären Betrieb, nach 45 Minuten Laufzeit (siehe: äusserliche Vereisung der Düse)

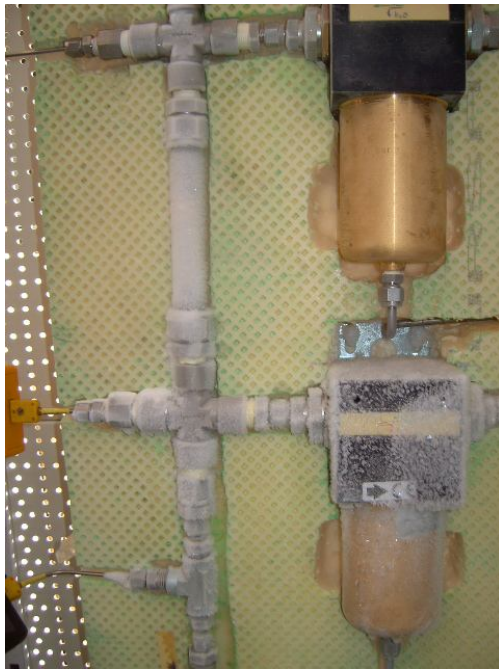


Abbildung 19: Starke, äusserliche Vereisung im Bereich Düse/CO₂-Abscheider

3.5.4. Vergleich von Experiment und Rechnung für die CO₂-Abscheidung

Mit dem neuen Reinigungsmodul wurden Messungen zuerst mit Syngas (55% Methan, 45% CO₂) und anschliessend mit landwirtschaftlichem Biogas (51% Methan, 40% CO₂, 9% Rest) durchgeführt. In beiden Fällen konnten wir einen Methananteil von maximal 65% erreichen. Die Gasanteile aus den Prozessberechnungen stimmen ziemlich gut mit den gemessenen Temperatur / Druckprofilen überein.

Das landwirtschaftliche Biogas weist einen hohen Wassergehalt auf. Nach dem Rohgasverdichter war ein Nachkühler und Wasserabscheidung installiert, vor dem Eintritt ins Reinigungsmodul. Damit erzielten wir einen stabilen Betrieb, bisher ohne Beeinträchtigung durch den Wassergehalt im Rohgas.

Betriebsdruck gemessen	Temp. gemessen vor CO ₂ -Abscheider	Anteil y CO ₂ gerechnet [%]	Anteil y CO ₂ gemessen [%]	Abweichung Konzentration
60 bar, +/- 5 bar	-19.4°C (höchster Wert im Messzyklus)	38	41.1	3.1
60 bar, +/- 5 bar	-41°C (tiefster Wert im Messzyklus)	22	30.8	8.8
60 bar	ca. 25°C (am Ort der Abscheidung)	33	31	2

Abbildung 20: Resultate für Anfangskonzentration 45% (Syngas)

Grund der Differenz:

Bei einem Betriebsdruck von 60 bar und Abscheidertemperatur von -41°C sollte sich eine CO₂-Konzentration von ca. 22% einstellen. Der gemessene CO₂-Anteil war ca. 31%.

Nachmessungen ergaben, dass die effektive Temperatur im Abscheider bei etwa -25°C lag, was einer gerechneten CO₂-Konzentration von 33% entspricht. Somit stimmen Messung und Rechnung gut überein.

Zielwert:

Um den Zielwert von max. 20% CO₂ zu erreichen müssen wir bei 60 bar am Abscheidepunkt eine Gastemperatur von mindestens -45°C erreichen.

Dazu ist eine bessere Isolation und Massereduktion des Abscheiders nötig!

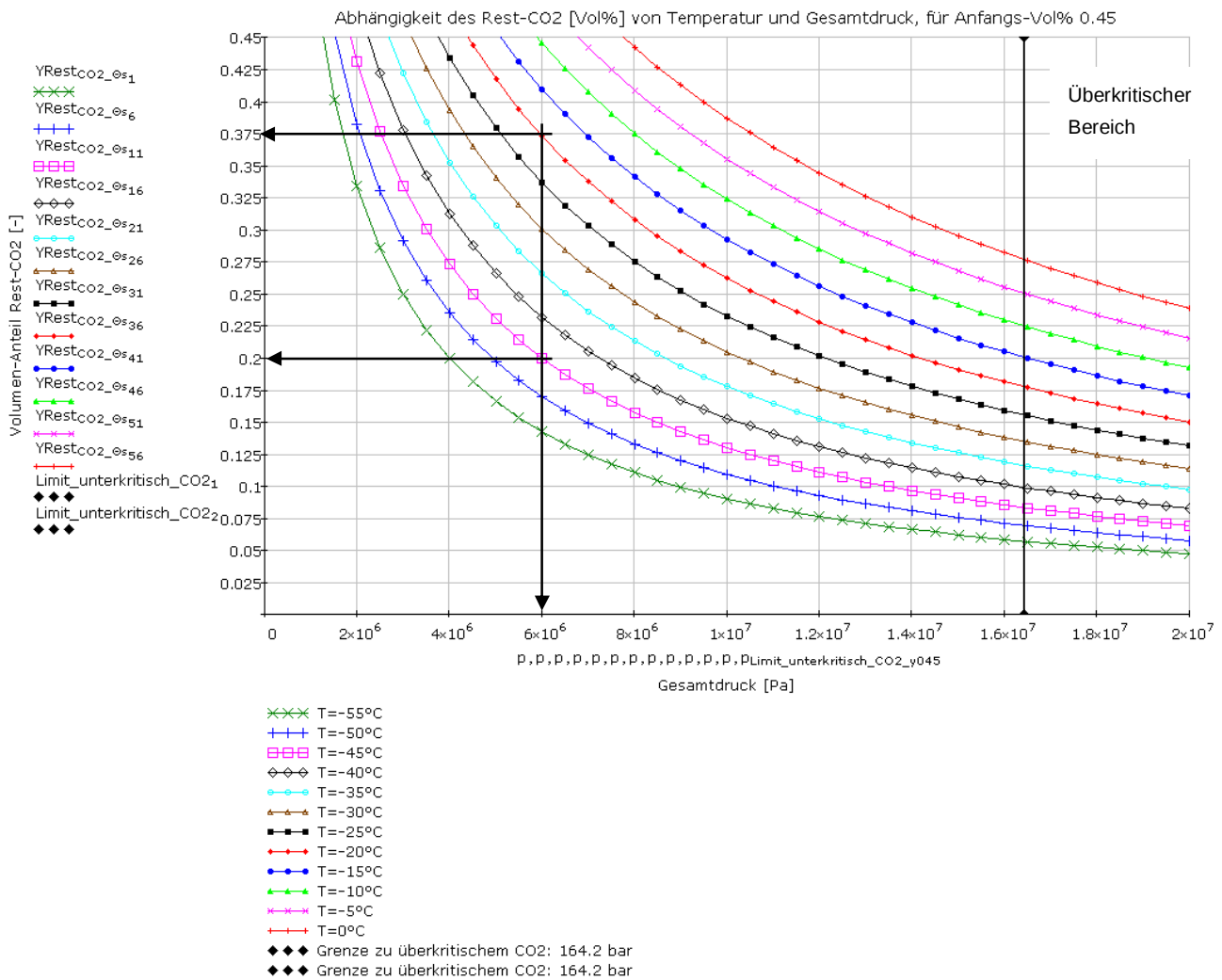


Abbildung 21: CO₂-Konzentrationsdiagramm

3.5.5. Grenzen des Prozesses

Die Tabellen in Abbildung 22 zeigen die Grenzen des kryogenen Prozesses auf:

Grenzen des kryogenen Prozesses bei Anfangskonzentration CO₂ = 45% (Syngas)

Grenze für nasses Abscheiden:	Gegeben durch Tripelpunkt	T= -56.56°C
Grenze für unterkritischen Prozess:	Gegeben durch kritischen Druck (73.9 bar) und Anfangskonzentration (resp. Angangs-Partialdruck)	pLimit=164.22 bar (bei y.CO ₂ =45%)
Ergibt ein erreichbares Minimum von ca. 5.6% Rest-CO₂		

Grenzen des kryogenen Prozesses bei Anfangskonzentration CO₂=40% (Rohes Biogas von Barmettler-Anlage):

Grenze für nasses Abscheiden:	Gegeben durch Tripelpunkt	T= -56.56°C
Grenze für unterkritischen Prozess:	Gegeben durch kritischen Druck (73.9 bar) und Anfangskonzentration (resp. Angangs-Partialdruck)	pLimit=184.75 bar (bei y.CO ₂ =40%)
Ergibt ein erreichbares Minimum von ca. 4.8% Rest-CO₂		

Abbildung 22: Grenzen des Prozesses für Syngas und Biogas bei eingestellten Rahmenbedingungen

3.5.6. Wasserabscheidung vor dem Reinigungsprozess

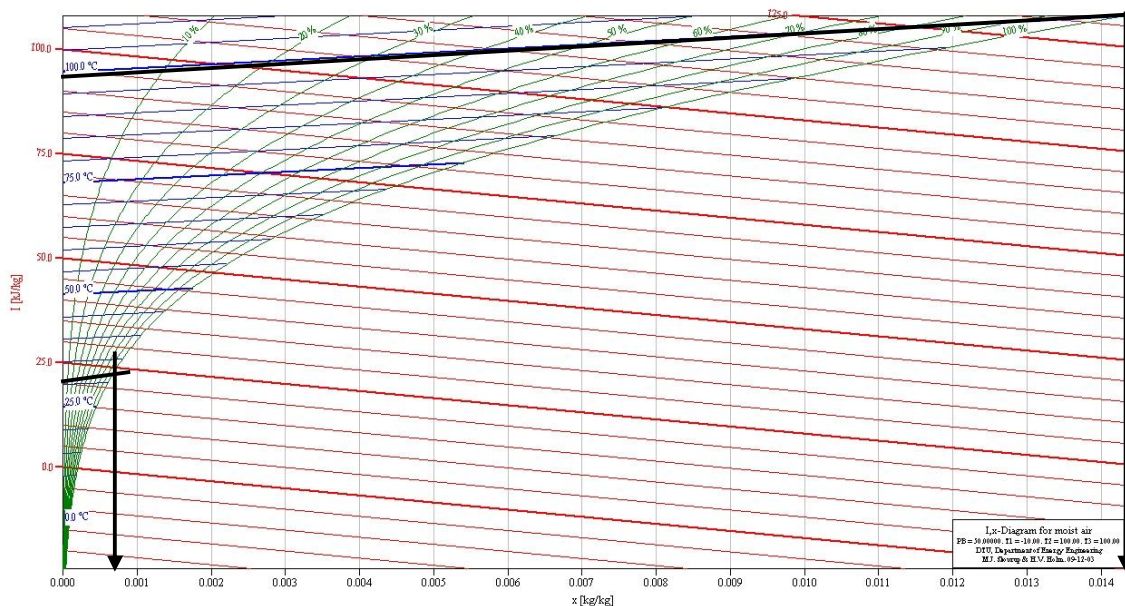


Abbildung 23: Mollier-Diagramm für feuchte Luft als Abschätzung für den Feuchtegrad beim Eintritt in das Reinigungsmodul

Bei genügend guter Wasserabscheidung nach dem Rohgasverdichter und vor dem Reinigungsmodul sollten auch mit Biogas keine Vereisungsprobleme auftreten. Dies konnten wir im Versuch bisher bestätigen.

3.6. Resultate

3.6.1. Verdichter

Als Verdichter kommen für den Kältekreislauf und die Rohgasverdichtung nur ölfreie Hochdruckverdichter in Frage. Kleinste Verunreinigungen (z.B. Wasserdampf im Kühlmittelstrom) führen zu Vereisungen und zum Abbruch des Kühlprozesses. Die eingesetzten, ölfreien Verdichter haben sich sehr gut bewährt.

Für die nachfolgende Verdichtung des gereinigten Biogases zur Fahrzeugbetankung können auch ölgeschmierte Verdichter eingesetzt werden.

3.6.1. Wärmetauscher

Die Wärmetauscher sind eine Eigenentwicklung und wurden selbst gefertigt. Die Funktionalität konnte in Versuchen und im Vergleich mit Berechnungen bestätigt werden.

Ein Vorteil dieser Art von Wärmetauscher ist deren Einfachheit.

3.6.2. Expansion

Der kontrollierte Druckabfall über der Düse und deren Einbau, Position und Durchmesser erforderte einige Untersuchungen und Änderungen.

Wichtig ist die Gasqualität mit geringstem Wassergehalt, um eine Vereisung der Düse zu verhindern. Die Zwischenschaltung einer Molsiebpackung entzog dem Gas die Restfeuchte und ermöglichte einen stabilen Kühlmittelbetrieb.

3.6.3. Wasserabscheider

Die eingesetzten Wasserabscheider sind handelsübliche Bauteile. Sie haben sich bewährt, soweit wir dies während der kurzen Versuchszeit ermitteln haben können.

3.6.4. Abscheider für Kohlendioxid

Die Abscheidereinheit konnte in dieser Arbeit nicht vollständig untersucht werden. Weitere Tests zur Bestimmung der optimalen Porenweite und Optimierung des Abscheidungswirkungsgrads sind unumgänglich. Ausserdem muss der Abscheider redimensioniert werden. Damit soll das Anfahrverhalten und die Isolation verbessert werden.

3.6.5. Biogasaufbereitung

Kohlendioxid wurde von Biogas abgeschieden, der Reinheitsgrad beträgt jedoch nicht 90%, sondern zwischen 70 und 80%, je nach Prozessrahmenbedingungen.

Das Potential des Prozesses konnte erhärtet werden. Die Voraussetzung dafür ist, dass wir die konstant tiefen Temperaturen über eine längere Zeitspanne an dem Ort erzielen können, wo die CO₂-Abscheidung geschehen soll.

Für diese Anforderungen ist ein Redesign des Moduls Düse/Abscheider sowie weitere Versuche notwendig.

3.6.7. Weiteres Vorgehen

Der Abscheidegrad von CO₂ muss stark verbessert werden. Die wichtigsten Parameter dazu haben wir identifiziert und Verbesserungen eingeleitet.

Weitere Versuche mit landwirtschaftlichem Biogas sind notwendig, um die Wassertoleranz des Reinigungsmoduls weiter zu erhärten und den angestrebten Methananteil von 80...90% zu erreichen. Dies ist unser Projektziel für 2010.



Abbildung 24: Funktionsmuster der Biogasaufbereitungsanlage:

- Grüne Verdichter: für rohes bzw. gereinigtes Biogas
- Graue Verdichter: 2 wahlweise zuschaltbare Kühlmittelverdichter
- Gelb: Reinigungsmodul
- Weiss: Speichermodul für aufbereitetes Biogas (6x80 Liter @ max. 250 bar)

3.7. Wirtschaftlichkeit und Abschätzung für die Kleinserienfertigung

3.7.1. Wirtschaftlichkeit

Die erzielten Messungen sind ermutigend und demonstrieren das Potential des eingeschlagenen Weges. Eine abschliessende Beurteilung der Machbarkeit und der Wirtschaftlichkeit der Aufbereitung von kleineren Biogasmengen kann erst nach erfolgten Pilotversuchen beim Biogaslandwirt ermittelt werden.

Die Marktabklärung der Fachhochschule Nordwestschweiz (3) hat das wirtschaftliche Potential der Biogasaufbereitung zu Treibstoff im Vergleich mit konventioneller Verstromung von Biogas aufgezeigt. Die Anlage darf nicht teurer in Anschaffung und Betrieb zu stehen kommen, als ein zweites, parallel betriebenes BHKW (Anlagekosten je nach Grösse ca. CHF 200'000).

Abschätzung des Verkaufspreises für eine kleine Biogastankstelle:

Rohgasverdichter	CHF	20'000
Kälteverdichter	CHF	20'000
Reinigungsmodul	CHF	30'000
Einfache Kleintankstelle(siehe Bild: BONSAI)	CHF	50'000 (ohne Messung der Betankungsmenge)
Übergeordnete Steuerung	CHF	20'000
Montage, Inbetriebsetzung und Abnahmen	CHF	10'000
Total (exkl. MWST)	CHF	150'000

Option:

Einfache Zapfsäule mit Tankdatenerfassung	CHF	30'000
---	-----	--------

Annahme:

Zu Vergleichszwecken sind in der obigen Aufstellung bauliche Massnahmen sind nicht eingeschlossen. Diese sind auch für ein weiteres BHKW notwendig und in etwa die gleichen Grössenordnung wie für die Biogastankstelle.

Betriebskosten

Wartungskosten:	3 Verdichter à CHF 1'000 pro Wartungsintervall von 3'000 Betriebsstunden Gasproduktion pro Wartungsintervall: $3'000 \times 2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ergibt: 6000 Nm^3 Wartungskosten: 0.50 CHF/Nm³
Stromverbrauch	3 Verdichter à 1.2 kWh für 2 Nm^3 ergibt Stromaufwand von 1.8 kWh/Nm^3 Stromkosten: 0.36 CHF/Nm³ (bei Strompreis von 0.2 CHF/kWh)

Total variable Betriebskosten: 0.86 CHF/Nm³ bzw. 0.74 CHF / Benzin äquiv.

3.7.2. Notwendige Serienproduktionsgrösse

Pilotanlagen können weitgehend aus bestehenden Anlagenteilen und durch Abänderung marktüblicher Module gebaut werden.

Das Schlüsselmodul „Reinigungspaket“ kann in Kleinserien gebaut werden (ab 5 Stk.).

Das aufwändigste Modul ist der Bau einer spezifischen Gesamtanlagensteuerung.

Damit eine anlagenspezifische Steuerung entwickelt werden kann, sollten mindestens 20...50 baugleicher Anlagen gebaut werden können.

Für Seriengrössen ab ca. 50 Stk. kann durch Serienproduktion mit folgende Kosten/Preisreduktionen gerechnet werden:

• Rohgasverdichter	10%	CHF	2'000
• Kälteverdichter	10%	CHF	2'000
• Reinigungsmodul	20%	CHF	6'000
• Einfache Kleintankstelle	10%	CHF	5'000
• Übergeordnete Steuerung	25%	CHF	5'000
• Montage, Inbetriebsetzung und Abnahmen	5%	CHF	500

Total Einsparungen (exkl. MWST) 17% CHF 25'500

Total Verkaufspreis (Serie) CHF 125'000

3.8. Synergien mit Erdgastankstellen

Anstatt Erdgas kann auch gereinigtes Biogas in jeder Erdgastankstelle verwendet werden. Die zusätzlichen Komponenten sind die Rohgasverdichtung und das Reinigungspaket mit Kältekreislauf. Diese Anlagenteile werden der Erdgastankstelle vorgeschaltet.

Das gereinigte Biogas aus dem Funktionsmuster fällt bei einem Druck von ca. 50 bis 60 bar an und könnte so dem Tankstellenverdichter zugeführt werden. Für die meisten Fälle müsste dieser Druck für den jeweiligen Erdgasverdichter entsprechend reduziert werden. Diese Druckreduktion ist energetisch schlecht, aber mit einfachen Massnahmen nicht zu umgehen.

Für Ansaugdrücke im Bereich bis 10 bar sind vor allem grosse Verdichter marktüblich. Für Ansaugdrücke bis 60 bar sind speziell dazu gebaute Verdichter nötig. Im Bereich von Kleinanlagen sind so hohe Ansaugdrücke nur mit teuren Spezialverdichter oder Druckübersetzer nutzbar.

Synergien mit Erdgastankstellen lassen sich vor allem finden bei:

- Speicherung von Biogas
- Fahrzeugbetankung und Abrechnung der Tankdaten
- Aufstellungs- und Inbetriebnahmen
- Baulichen Anforderungen
- Bewilligungsverfahren (Ex-Zonen)
- Wartungs- und Störungsdienst
- Marketing

3.9. Zulassungsanforderungen

Für Biogasreinigungs- und Betankungsanlagen ist ein Plangenehmigungsverfahren beim svgw (schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches) einzuleiten.

Die Abnahmeinstanzen sind:

- TISG (technisches Inspektorat des svgw)
- SUVA für die Druckbehälter, Ex-Zonen
- ESTI (Elektrowiss)
- Kantonales Eichamt (Verkauf von Biogas als Treibstoff)
- Blitzschutz
- Brandschutz



Abbildung 25: Synergie mit BONSAI-Erdgastankstelle mit vielen identischen Bauteilen

3.10. Vorschläge für eine Informationskampagne für potentielle Kunden

Die schweizerische Gasindustrie (VSG) unterstützt und vermarktet Biogas als Treibstoff. Als erste Anlaufstelle ist sie zu kontaktieren, um eine gemeinsame Vermarktungs- und Informationskampagne zu starten.

Als weitere strategische Partner könnten die folgenden Firmen gewonnen werden:

- Fenaco
- Biogasanlagenbauer (z.B. Axpo Genesys AG)
- Landwirtschaftsverband
- Umweltorganisationen mit Biogasfokus
- Später in Deutschland und Oesterreich: Erdgasindustrie, Biogasanlagenbauer, Umweltorganisationen

4. Diskussion

Der erreichte Stand stellt einen Teilerfolg für die Biogasaufbereitung dar. Das Funktionsmuster ist jedoch noch nicht ausgereift und erfüllt noch nicht den gewünschten Zweck.

Die Hauptaufgabe der Anlage, das Abscheiden von Kohlendioxid konnte gemessen werden. Der Abscheidungsgrad ist noch ungenügend. Die Schlüsselparmeter für eine bessere Biogasreinigung sind identifiziert und die notwendigen Massnahmen können eingeleitet werden.

Das Abscheiden von Wasser ist für die Treibstoffproduktion notwendig und hat funktioniert.

Das Anfahrverhalten der Anlage und der stationäre Betrieb konnte mit dem letzten Umbau des Reinigungsmoduls stark verbessert werden.

Um die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu verbessern, können die Verdichter modifiziert werden. Durch geschicktes Auslegen der Verdichterstufen kann der Energieverbrauch optimiert werden.

Die bisherigen Tests wurden ohne Steuerung manuell durchgeführt. Für eine serienreife Anlage wird eine Steuerung für den automatischen Betrieb benötigt.

Weitere Versuche mit neuen Bauteilen und Feldtests sind unumgänglich, um aus dem Funktionsmuster schliesslich einen Prototyp zu bauen.

Die Machbarkeit der Biogasreinigung mittels kryogener Gastrennung für kleine Biogasmengen scheint nach wie vor interessant und technisch möglich.

Das wirtschaftliche Potential und die Konkurrenzfähigkeit im Vergleich mit der Verstromung vom Biogas wurden durch die Studentenarbeit (siehe Literaturverzeichnis) dokumentiert.

5. Schlussfolgerungen

Mit Ausnahme der Verdichter werden keine beweglichen Teile sowie keine chemischen Zusätze benötigt.

Der Prozess basiert lediglich auf Temperaturänderungen, welche durch Expansion erzeugt werden kann, ohne chemische Reaktionen.

Der im Pflichtenheft vorgegebene Reinheitsgrad von 90% Methananteil konnte noch nicht erreicht werden. Wir haben aber rechnerisch und im Versuch gezeigt, dass Kohlendioxid auf die beschriebene Art und Weise verflüssigt und abgeschieden werden kann.

Die Grenzen des Verfahrens wurden ebenfalls dokumentiert und legen den Schluss nahe, den vorgegebenen Entwicklungsweg weiter zu beschreiten.

Anhang

Literaturverzeichnis

- (1) Oester Ueli (2006): Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen
Phase I: Literaturrecherche und Vorabklärungen
- (2) Oester Ueli. (2008): Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen
Phase II: Bau und Betrieb eines Funktionsmusters (Zwischenbericht)
- (3) Cazin Andreas, Fischer David, Dietrich Pascal, Lüthi Samuel. (2008): Marktabklärung für kleinere Biogasaufbereitungsanlagen
- (4) Ritter David. (2008): Projektarbeit 5. Prozessoptimierung: Treibstoffproduktion aus Biogas
- (5) Ritter David (2009): Prozessoptimierung: Treibstoffproduktion aus Biogas (Schlussbericht)
- (6) Apex AG: Die BONSAI Tankstelle von Apex

Abbildungen

1. Vereinfachtes Prinzipschema
2. Grundschemata
3. Schematische Darstellung der Anlage
4. Prozessschema der Gesamtanlage
5. FuelMaker-Verdichter
6. Biogasverdichter
7. Abscheidermodul: 3-D-Skizze des ersten Reinigungsmoduls
8. Foto des ersten Reinigungsmoduls
9. In die Anlage integriertes Reinigungsmodul
10. Düse
11. Düse mit Vereisungen
12. Schema des Versuchsaufbaus
13. Geometrie der Simulation
14. Temperaturverlauf: Kühlmittel
15. Temperaturverlauf: Erdgas
16. „Teufelskreis“ Biogasabkühlung
17. Neues Reinigungsmodul (inkl. Isolation)
18. Reinigungsmodul ohne Isolationsabdeckung
19. Sichtbare, äusserliche Vereisung im Bereich Düse/CO₂-Abscheider
20. Resultate für Anfangskonzentration 45% Syngas
21. CO₂-Konzentrationsdiagramm
22. Grenzen des Prozesses bei eingestellten Rahmenbedingungen
23. Mollier-Diagramm für feuchte Luft
24. Funktionsmuster der Biogasaufbereitungsanlage
25. Synergie mit BONSAI-Erdgastankstelle mit vielen identischen Bauteilen