

Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT

Energietechnik – Schwachgasnutzung

Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Nutzung niederkalorischer Gase (Schwachgase) in Gasmotoren

Abschlussbericht über das Projekt, gefördert unter dem
Az.: 20308 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Clemens Backhaus und Dipl.-Ing. Hubert Werneke

August 2003

Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT

Energietechnik - Schwachgasnutzung

Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Nutzung niederkalorischer Gase (Schwachgase) in Gasmotoren

Abschlussbericht über das Projekt, gefördert unter dem
Az.: 20308 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Clemens Backhaus und Dipl.-Ing. Hubert Werneke

August 2003

Version 25.08.03

Az	20308	Referat	24/0	Fördersumme	24.350,00 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	--------------------

Antragstitel Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Nutzung niederkalorischer Gase (Schwachgase) in Gasmotoren

Stichworte Energie, Verfahren, Verbrennung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
6 Monate	07.11.2002	07.05.2003	

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT Osterfelder Straße 3 46047 Oberhausen	Tel	0208/8598-1188
		Fax	0208/8598-1423
		Projektleitung	Herr Clemens Backhaus
		Bearbeiter	Herr Hubert Werneke

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Fraunhofer UMSICHT entwickelt ein neues Verfahren zur Sauerstoffanreicherung von Luft. Ziel ist es, niederkalorische Gase in Verbrennungsprozessen einzusetzen, die bisher auf Grund der sich einstellenden Verbrennungseigenschaften in Gasmotoren nicht einsetzbar waren. Durch das neue Verfahren können die Inertgasanteile der Brenngas-Luft-Gemische reduziert werden. Damit können diese Gase (z.B. Gas aus auslaufenden Deponien) zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden und müssen nicht mehr ungenutzt abgefackelt werden. Die so erreichte optimale Nutzung von Ressourcen, Steigerung der Brennstoffeffizienz und geringere Emissionen sind ein entscheidender Beitrag zur Schonung der Umwelt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Rahmen des Projektes sind Anlagenkonzepte und Auslegungsgrundlagen entwickelt worden, um Produktionsanlagen für Sauerstoff angereicherte Luft konzipieren zu können.

Durch eine Potenzialanalyse sind Anwendungsgebiete für das neue Verfahren identifiziert worden. Es wurde Literaturrecherche und Patentrecherche durchgeführt. Der Stand der Technik zur Gastrennung in Hinblick auf die klassischen Trennverfahren wurde aufgezeigt. Die Verfahren wurden kurz dargestellt. Vor- und Nachteile der Verfahren wurden aufgezeigt. Der neue verfahrenstechnische Ansatz mit Sauerstoff angereicherte Luft für Verbrennungsvorgänge bereitzustellen wurde detailliert dargestellt.

Um Randbedingungen für die wirtschaftliche Einsetzbarkeit des neuen Verfahrens aufzuzeigen sind umfangreichen Messungen durchgeführt worden. Dazu wurde ein spezieller Versuchsaufbau konzipiert. Es können so unterschiedliche Volumenströme und Druckniveaus eingestellt werden. Die Dokumentation erfolgte mit einer automatisierten Messwerterfassung. Für einen typischen Anwendungsfall sind die geforderten Volumenströme bestimmt worden (BHKW 125 kW elektrischer Leistung). Mit Hilfe der Auslegungsgrundlagen zu Komponenten, Baugruppen, Verdichtergröße und Leistung, Zubehör, Rohrleitung, Modulanzahl wurden die Kosten der einzelnen Bestandteile einer Anlage in eine Gesamtbetrachtung zusammengefasst. Die Gegenüberstellung und Übertragung auf den Datenbestand der durchgeführten Messreihen ermöglicht so eine Bestimmung des optimalen Betriebspunktes unter energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Optimum für Konzepterstellung einer Pilotanlage). Abschließend wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Bereits mit O₂ Gehalten von 25 % sind deutliche Prozessverbesserungen mit angereicherter Luft zu erzielen. Auf Grund der ersten Erfahrungen wurde ein neuer verfahrenstechnischer Ansatz formuliert. Hintergrund war die energetische Optimierung des Verfahrens, d.h. es sind möglichst geringe Druckniveaus für einen geringen Energieeinsatz maßgeblich einzuhalten:

Die Luft auf der Feedseite wird mit einem Druck von 1 bis 3 bar absolut Druck zugeführt. Das Druckniveau auf der Retentatseite beträgt 1 bis 2,5 bar absolut. Der mit Sauerstoff angereicherte Permeat Strom wurde auf ein Druckniveau von 0,4 bis 1,2 bar absolut eingestellt. In den ersten Versuchen haben sich neue, bisher auch den Herstellern von Membranen in dieser Form nicht bekannte Ergebnisse herausgestellt. Bestimmende Einflußgrößen sind die aufgezeigten Druckniveaus und die damit verbundenen Volumenströme. Eine Absenkung des Druckniveaus auf der Permeat Seite bewirkt eine Verbesserung des Trennprozesses. Der O₂ Gehalt erhöht sich durch die Vergrößerung der transmembranen Druckdifferenz. Gleichzeitig steigt der Volumenstrom auf der Permeat Seite. Diese beiden Effekte führen zu einer Verbesserung der Trennleistung. In Gasmotoren (BHKW's) kann derzeit Deponiegas nur bei mindestens 40 % Methan Anteil technisch genutzt werden. Der Ansatz, die Randbedingungen der zugeführten Verbrennungsluft zu variieren, führt zu folgenden Auswirkungen auf Betriebsweise des Gasmotors:

- Verschiebung der Inertgasanteile bewirkt eine Verringerung der Verbrennungsluftmenge; Änderung der Verbrennungstemperatur; Luftverhältnis von $\lambda = 1,7$ Erdgasmotor verschiebt sich zu Betriebsweisen mit Luftverhältnis $\lambda = 1,3$; Veränderung der Brenngeschwindigkeiten

Berechnungen zeigen: Die Betriebsweise von Deponiegasmotoren mit bis zu 30 % Sauerstoff angereicherter Luft ermöglichen es, Brenngase mit geringeren Methangehalten < 40 %, d.h. geringerer Methanzahl zu betreiben. Die Grenzen, die dem bisherigen Einsatz gesetzt sind, können auf Grund der neu einzustellenden Randbedingungen in Richtung von Methangehalten von 25 % verschoben werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Mit dem neuen verfahrenstechnischen Lösungskonzept werden modular aufgebaute Membranmodule zu einem Gesamtanlagenkonzept zusammengeführt. Insbesondere die Anpassung an den Anwendungsfall der gasmotorischen Nutzung in BHKW's wurde detailliert untersucht.

Bereits im Juni 2002 ist ein Verfahrenspatent beim Deutschen Patentamt eingereicht worden. Eine abschließende Stellungnahme liegt bisher nicht vor. Des weiteren ist ein PCT Patentverfahren eingeleitet worden. Veröffentlichungen sind bisher nicht initiiert worden.

Fraunhofer Umsicht versucht derzeit wegen der positiven Erfahrungen weitere Anschlußprojekte durchzuführen. Es ergaben sich viele unterschiedliche Kontakte zu anderen Anwendungsbereichen – Kläranlagen, Stahlwerken Thema Verbrennungsluftbereitstellung für Warmhalteöfen und Luftzerlegungsanlagen. Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse sollen in veränderten Anwendungen getestet werden. Es werden durch die neue Technik Einsparungen bei dem Energieeinsatz erwartet. Erste Erfahrungen soll dazu eine Testanlage bis zum Jahresende 2003 erbringen.

Fazit

Nach den bisherigen Recherchen sind kommerzielle Anlagen in Bereich der Sauerstoffanreicherung von Luft technisch nicht ausgeführt worden oder zu erwerben. In den Versuchsreihen wurde überprüft, welche Randbedingungen und Parameter für einen optimalen Betrieb des neuen Verfahrens zur Sauerstoffanreicherung einzuhalten sind. Mit Hilfe der reproduzierbaren Versuchsergebnisse sind Optimierungspotenziale aufgezeigt worden. Mit dem innovativen Lösungsansatz, den Sauerstoff angereicherten Permeat Volumenstrom gezielt abzusaugen und das Druckniveau abzusenken, ergibt sich eine Verbesserung des Trennprozesses. Dadurch wird es möglich, den Feedvolumenstrom zu optimieren. Auf Grund des geringeren Feedvolumenstromes, der noch zu verdichten ist, ist energetisch ein deutlich günstigeres Verfahren entwickelt worden.

Das Erneuerbaren-Energie-Gesetz (EEG) garantiert feste Vergütungssätze für Strom aus Deponiegasen und da die Anlagentechnik auf den Deponien oft vorhanden ist, wird mit Hilfe des neuen Verfahrens die wirtschaftliche Betriebsweise weiterhin ermöglicht oder stillgelegte Anlagen können wieder in Betrieb genommen werden. Durch die Aufweitung des Einsatzbereiches der technischen Nutzung geringerer Gasqualitäten wird ein entscheidender Beitrag zur Umweltschonung geleistet. Durch die Nutzung dieser Gase zur Strom- und Wärmeerzeugung findet eine aktive Reduzierung des Kohlendioxidausstosses statt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit dem neuen einstufigen Verfahren mit Sauerstoff angereicherte Volumenströme in der Qualität bis ca. 30 % für Verbrennungsprozesse bereitgestellt werden können.

2 Inhaltsverzeichnis

1	Projektkennblatt	5
2	Inhaltsverzeichnis	7
3	Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen	8
4	Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	9
5	Einleitung	10
6	Hauptteil	13
6.1	Potenzialanalyse	13
6.2	Literaturrecherche	15
6.3	Konzeption Versuchsanlage	17
6.4	Messprogramm	19
6.5	Ergebnisse und Diskussion	20
6.6	Auslegungsgrundlagen für Gasmotoren	22
6.7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	25
6.8	Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation	27
7	Fazit	28
8	Literaturverzeichnis	30
8.1	Literatur	30
8.2	Patentrecherche	31
9	Anhang	32
9.1	Bilder Versuchsanlage	32
9.2	Messergebnisse	34

3 Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1 Konzeptdarstellung Sauerstoffanreicherung	10
Abbildung 2 Membran Modul	17
Abbildung 3 Versuchsaufbau	18
Abbildung 4 Versuchsanlage, Gasanalyse	32
Abbildung 5 Versuchsaufbau Volumenstrom	32
Abbildung 6 Messwerterfassung	33
Grafik 1 HF Variation Optimum	34
Grafik 2 O ₂ Gehalt auf Retentat Seite	34
Grafik 3 O ₂ Gehalt Variation Feed Druck	35
Grafik 4 O ₂ Gehalt Variation Feed Druck bei 500 mbar Überdruck	35
Tabelle 1 Polymere zur Stickstoff / Sauerstoff Anreicherung	12
Tabelle 2 Deponiegaszusammensetzung (Quelle: Enviro Consult)	14
Tabelle 3 Stand der Technik Gaspermeation	16
Tabelle 4 Messprogramm	20
Tabelle 5 Einfluss auf Luftverhältnis, Verbrennungsluftmenge	25
Tabelle 6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	27

4 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Brennwert	Ho	kJ / kg
Dichte	ρ	kg / m ³
Druck	p	bar, mbar
Heizwert	Hu	kJ / kg
Höhere Kohlenwasserstoffe	C _n H _m	
Kohlendioxid	CO ₂	
Laminare Brenngeschwindigkeit	c _{lam}	m/s
Leistung	P	kW
Luftfaktor	L	m ³ Luft / m ³ Brenngas
Luftverhältnis	$\lambda = L / L_{\min}$	
Methan	CH ₄	
Methanzahl	MZ	
Mindestluftfaktor	L _{min}	m ³ Luft / m ³ Brenngas
Sauerstoff	O ₂	Gehalt in %
Stickstoff	N ₂	
Temperatur	T	K
Volumen	V	m ³
Wasserstoff	H ₂	
Wirkungsgrad	η	

5 Einleitung

Fraunhofer UMSICHT entwickelt ein neues Verfahren zur Sauerstoffanreicherung von Luft. Basierend auf dem Einsatz innovativer modular aufgebauter Membrantechnik werden neue verfahrenstechnische Lösungskonzepte für folgende Einsatzgebiete konzipiert:

- Gasmotorische Nutzung von Schwachgasen, z.B. Deponiegasen (s.a. Abbildung 1)

Ziel ist es, niederkalorische Gase in Verbrennungsprozessen einzusetzen, die bisher in Gasmotoren wegen der sich einstellenden Verbrennungseigenschaften nicht einsetzbar waren. Durch das neue Verfahren können die Inertgasanteile der Brenngas-Luft-Gemische reduziert werden. Damit können diese Gase (z.B. Gas aus auslaufenden Deponien) zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden und müssen nicht mehr ungenutzt abgefackelt werden. Die so erreichte optimale Nutzung von Ressourcen, Steigerung der Brennstoffeffizienz und geringere Emissionen sind ein entscheidender Beitrag zur Schonung der Umwelt. Resultierend können auch Wirkungsgradverbesserungen für konventionelle Anlagenkonzeptionen erzielt werden.

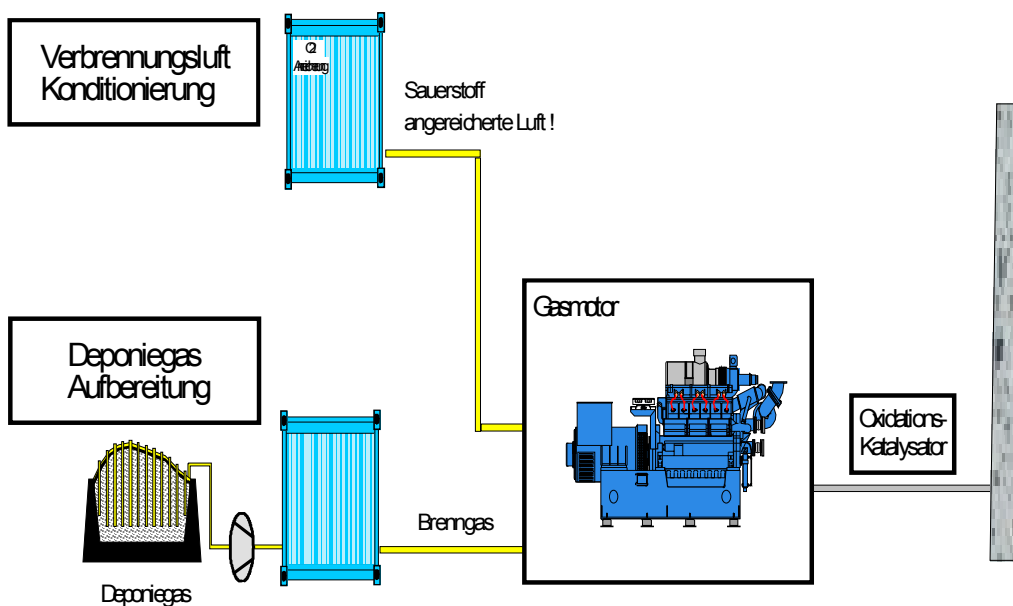


Abbildung 1
Konzeptdarstellung
Sauerstoffanreicherung

In großen industriellen Gastrennanlagen für technische Gase werden heutzutage Sauerstoff und Stickstoff nach kryogenen Gastrennverfahren hergestellt. Hohe Energiekosten sind wegen der sehr niedrigen Temperaturen unter -180°C daher unvermeidlich. Diese Verfahren zur Erzeugung von Reingasen sind extrem kosten- und energieintensiv. Weitere Möglichkeiten zur Gewinnung von Sauerstoff aus Luft bieten Verfahren zur adsorptiven Luftzerlegung mit Molekularsieben, Zeolithen oder auch Aktivkohlen (Vakuum-Swing-Adsorption VSA, Druck-Swing-Adsorption PSA). Nachteile dieser aufgeführten Verfahren sind der hohe energetische Aufwand und die komplexen apparativen Einheiten. Die Anlagen werden vorwiegend im industriellen Maßstab gebaut, mit der Vorgabe, hohe Durchsatzraten vor allem von Reingasen zu erzielen. Die Investitionskosten, Wartungs- und Instandhaltungsaufwendungen sind auf Grund der komplexen Einheiten entsprechend hoch und sind für das von uns beabsichtigte Einsatzgebiet unwirtschaftlich.

Im Vergleich zu den klassischen Trennverfahren zeichnet sich die Gastrennung mit Membranen durch geringen verfahrenstechnischen Aufwand aus. Das neue Verfahren zur Anreicherung der Luft mit Sauerstoff basiert auf dem Trennmechanismus der Gas Permeation bei dem sowohl der Feed Strom bzw. der Retentat-Strom als auch der Permeat Strom in einer Trennvorrichtung gasförmig vorliegen.

Anwendungsgebiete der Luftzerlegung sind auf dem Gebiet der Stickstoffanreicherung etabliert und kommerziell ausgeführt. Membranmodule verschiedener Hersteller sind in Bezug auf den angereicherte Strom in diesen Verfahren, den Stickstoff, optimiert. Der Sauerstoff ist sozusagen das ungenutzte Abfallprodukt des Prozesses. In diesen Anwendungen werden Polymermembranen verwendet, die auf Grund der spezifischen Stoffeigenschaften wie z.B. Permeabilität, Selektivität für das Trennverfahren geeignet sind. Anwendungen für Stickstoff sind beispielsweise zu nennen:

- Inertisierung von Lebensmittelhallen um Reifeprozesse und Oxidationsprozesse zu vermindern.
- Füllung von LKW Reifen
- Verwendung in Abfüllanlagen

Nachfolgende Tabelle 1 gibt eine Übersicht über unterschiedliche Materialien, die in kommerziellen Anlagen zu Luftzerlegung mit Schwerpunkt der Stickstoffanreicherung eingesetzt werden. Es sind die Hersteller und unterschiedliche O_2 / N_2 Selektivität angegeben.

Polymer	O ₂ / N ₂ Selektivität	Membranhersteller oder Unternehmen
Polydimethylsiloxan (PDMS)	2,1	GKSS
Polymethylpenten (TPX)	4	Dow Chemicals
Polyphenylenoxid (PPO)	4,4	Aquilo
Polysulfon	5,6	Permea
Matrimid	6,7	Praxair
Polycarbonat	7,5	Generon

Tabelle 1 Polymere zur Stickstoff / Sauerstoff Anreicherung

Membranmodule können als Taschen- oder Plattenmodule oder auch als Hohlfasermembran ausgeführt werden. Die Trennschichtdicke und die Stabilität einer Membran sind bestimmende Einflussgrößen. Je nach Modulausführung und Konfektionierung ergeben sich die Membranflächen.

Verfahren zur Stickstoffanreicherung werden mehrstufig in Serie geschalteten Membranmodulen ausgeführt. Auf Grund dieser Verfahrensweise werden Reinheiten für Stickstoff von bis zu 98 % erzielt. Die Randbedingungen für solche Verfahren sind hohe Druckdifferenzen und Druckniveaus von bis zu 15 bar. Das zu trennende Gasgemisch muß mit Hilfe von Verdichtern auf den entsprechenden Eingangsdruck verdichtet werden. Die notwendige Energiezufuhr während der Verdichtung führt zu einer gleichzeitigen Erwärmung des Gasgemisches. Ein begrenzender Faktor ist die Temperatur. Polymer-Membranen können nur in Temperaturbereiche bis 60 ° C eingesetzt werden. Bei der Verdichtung von Luft um den Faktor 2 erhält man schon Temperaturen von ca. 110 ° C. Eine Kühlung der Gasströme ist gegebenenfalls notwendig.

Der prinzipielle Aufbau für Verfahren zur Stickstoffanreicherung oder Sauerstoffanreicherung von Luft ist zunächst identisch. Die permeierende Komponente ist jeweils der Sauerstoff. An der Membranoberfläche findet eine Sorption des Sauerstoff statt. Es folgt die Diffusion durch die Membrantrennschicht und anschließend die Desorption auf der anderen Membranseite. Es ändert sich jedoch die Betrachtungsweise des Prozesses. Der mit Sauerstoff angereicherte Stoffstrom steht im Mittelpunkt der Untersuchungen. Es zeigt sich, dass Übertragungen von Verfahrensansätzen der Stickstoffanreicherung technisch nicht umzusetzen sind. So ist z.B. Sauerstoff in einer Serienschaltung nicht weiter aufzukonzentrieren. Der Trennfaktor der eingesetzten Materialien ist zu gering.

Es gibt viele technische Anwendungen, bei denen es ausreichend ist, mit Sauerstoff angereicherte Volumenströme und nicht Sauerstoff als Reingas zu verwenden. In diesen Anwendungsfällen können Gastrennverfahren mittels Membrantrenneinheiten eingesetzt werden. Vorteil einer solchen Gastrennung

ist die energiearme Erzeugung von Gasen in der gewünschten Qualität. Im Rahmen dieses Projektes soll ein neues Verfahren zur Sauerstoffanreicherung von Luft konzeptionell entwickelt werden. Die Auslegungsgrundlagen für den Einsatz dieses Verfahrens sind entsprechend zu formulieren. Das besondere Interesse liegt dabei in der Optimierung von Prozessabläufen und in der Integration von neu zu entwickelnden Anlagenmodulen. Die Entwicklung neuer Membranmaterialien ist nicht Gegenstand des Projektes, viel mehr wird die verfahrenstechnische Integration für spezielle Anwendungen angestrebt.

6 Hauptteil

Im Rahmen des beantragten Projektes sind Anlagenkonzepte und Auslegungsgrundlagen entwickelt worden, um Produktionsanlagen für Sauerstoff angereicherte Luft konzipieren zu können. Diese verbesserte Verbrennungsluft kann dann mit Schwachgasen (Brenngasen niedrigerer Gasqualität, d.h. geringeren Methangehalten) zusammen in Gasmotoren technisch genutzt werden. Die Massenanteile der Inertgasmengen verschieben sich und man erhält zündfähige Brennstoff-Luft-Gemische, die einen sicheren Motorenbetrieb gewährleisten. Weitere Vorteile sind in diesem Zusammenhang Emissionsverminderungen, Wirkungsgradverbesserung und Steigerung der Brennstoffeffizienz. Neben dem wirtschaftlichen Aspekt wird so ein entscheidender Beitrag zur Umweltentlastung ermöglicht.

6.1 Potenzialanalyse

Im Rahmen einer Potenzialanalyse sind zunächst Anwendungsgebiete für das neue Verfahren identifiziert worden. Insbesondere zu nennen ist die Gasmotorische Nutzung von Schwachgasen wie z.B. Deponiegasen oder Grubengasen. Am Beispiel von Deponiegasen wird der umweltrelevante Aspekt des Vorhabens verdeutlicht.

Deponiegas führt auf Grund seiner Zusammensetzung (vergleiche Tabelle 2) in mehrfacher Hinsicht zu einer Belastung der Umwelt. Die Inhaltsstoffe dieser Gase besitzen ein beträchtliches Treibhauspotenzial (Kohlendioxid, Methan).

Hauptkomponenten	mg/m ³ _{i.N.}	% _{vol}
Methan		20 bis 60 % _{vol}
Kohlendioxid		25 bis 55 % _{vol}
Stickstoff		1 bis 20 % _{vol}
Sauerstoff		0 bis 2 % _{vol}
Wasserdampf		0 bis 1 % _{vol}
Spurenstoffe		
Schwefelwasserstoff	bis zu 1.000 mg/m ³ _{i.N.}	
Halogenierte Kohlenwasserstoffe	bis zu 100 mg/m ³ _{i.N.}	
höhere Kohlenwasserstoffe	bis zu 300 mg/m ³ _{i.N.}	
Silizium-Verbindungen	bis zu 100 mg/m ³ _{i.N.}	

Tabelle 2
Deponiegaszusammensetzung (Quelle: Enviro Consult)

Zur Minimierung dieser Belastungen sind Deponien in Deutschland mit einem Gasfassungssystem versehen. Zum einen existiert eine Deponiegasnutzung zur Erzeugung von Strom und Wärme in Blockheizkraftwerken (BHKW's). In anderen Fällen wird das Gas über Fackelanlagen oder Biofiltersysteme lediglich entsorgt.

Ansatzpunkt in dem Projekt ist die gasmotorische Verbrennung von Deponiegasen. Im Zuge der TA Siedlungsabfall haben sich auf Deponien die Gasqualitäten und Raten deutlich verändert. Auf Grund der Reduzierung der in den Deponiekörper eingebrachten Organikmenge und einer wasserdichten Abdeckung der Deponie wird sich der Abbau eingelagerter organischer Substanzen verlangsamen und über einen längeren Zeitraum erstrecken. Ein sinkender Wassergehalt verlangsamt dabei den Abbauprozess und somit die Methanbildung. Die diffuse Entgasung von Methan im Deponiebereich wird durch gezielte Vorkehrungen der Deponietechnik, Gasdrainage und Sammelleitungen, reduziert. Der Rückgang der Gasmengen auf den Deponien führt dazu, dass kleinere Anlagen konzipiert werden, da vorhandene größere Motoren im Teillastbereich nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden können. Im Allgemeinen werden Anlagen in dem Leistungsbereich von 100 bis 250 kW_{el} in der letzten Stufe an Deponiestandorten vorgehalten.

Die Gasqualität ist Schwankungen unterworfen und kann in Gasmotoren derzeit nur bei mindestens 40 % Methan Anteil im Deponiegas technisch in BHKW' s genutzt werden. Alternativ wird das Methan abgefackelt oder diffuse Entgasungen treten verstärkt auf und belasten die Umwelt. Das Methan trägt 23 mal stärker zum Treibhauseffekt als Kohlendioxid bei und geht auch so ungenutzt als Energieträger verloren.

6.2 Literaturrecherche

Es wurde eine Literaturrecherche zu der Thematik Gastrennung, Verfahren und zur technischen Nutzbarkeit von Schwachgasen in Gasmotoren und Membranmaterialien durchgeführt. Die entsprechende Literatur ist im Kapitel 8.1 Literatur aufgeführt.

Klassische Trennverfahren zur Luftzerlegung werden vor allem für Herstellung von Reingasen insbesondere in großen industriellen Anlagen nach kryogenen Gastrennverfahren für Sauerstoff und Stickstoff ausgeführt. Es werden so vor allem hohe Durchsatzraten erzielt. Die Tieftemperaturzerlegung der Luft findet bei sehr niedrigen Temperaturen unter -180°C statt. Luft wird verflüssigt und in einzelne Bestandteile aufgetrennt. Weitere Möglichkeiten zur Gewinnung von Sauerstoff aus Luft bieten Verfahren zur adsorptiven Luftzerlegung mit Molekularsieben, Zeolithen oder auch Aktivkohlen (Vakuum-Swing-Adsorption VSA, Druck-Swing-Adsorption PSA).

Nachteile dieser aufgeführten Verfahren sind der hohe energetische Aufwand und die komplexen apparativen Einheiten. Die Anlagen werden vorwiegend im industriellen Maßstab gebaut. Auf Grund der Anlagengröße sind Energiekosten unvermeidlich.

Im Vergleich zu den klassischen Trennverfahren zeichnet sich die Gastrennung mit Membranen durch einen geringen verfahrenstechnischen Aufwand aus. Mit der Entwicklung von speziellen asymmetrischen Membranen für die Gaspermeation (Trennwirkung Lösungsdiffusionsmechanismus) hat sich die technisch und wirtschaftliche Bedeutung gesteigert.

Polymermembranen lassen sich in Abhängigkeit vom Arbeitsbereich des Prozesses in zwei Gruppen untergliedern. Prinzipiell ist zwischen Membranen aus Polymeren, die sich bei Prozess Temperatur im Glaszustand befinden (z.B. Polysulfon, Polyetherimid; $T_{\text{max}} = 100^{\circ}\text{C}$), und Membranen, die sich im gummielastischen Zustand befinden (z.B. Dimethylsiloxan), zu unterscheiden. Die Löslichkeit ist in glasartigen Polymeren geringer, so dass kleinere Moleküle auf Grund der besseren Diffusion bevorzugt transportiert werden. Im Gegensatz dazu weisen gummiähnliche Membranen ein hohes Löslichkeitsvermögen auf, große Moleküle werden bevorzugt transportiert. Lösungsdiffusionsmembranen aus gummiähnlichen Polymeren zeichnen sich durch hohe Löslichkeiten für organische Lösungsmittel im Vergleich zu Permanentgasen wie Sauerstoff oder Stickstoff aus.

Porenfreie Metallmembranen werden für die Herstellung von hochreinem Wasserstoff (Verunreinigung $< 1\text{ppmv}$) eingesetzt. Als Werkstoffe werden Palladium sowie Palladium-Silber-Legierungen verwendet. Sie besitzen eine hohe Temperaturbeständigkeit ($T_{\text{max}} = 500^{\circ}\text{C}$), reagieren jedoch empfindlich

auf Spurenverunreinigungen von Chlor, Arsen, Quecksilber sowie Schwefelverbindungen.

Bei mikroporösen Membranen handelt es sich meist um anorganische Werkstoffe wie Graphit, Keramik (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2), Glas ($\text{SiO}_2/\text{S}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$) und Zeolithen. Vorteile bieten diese Werkstoffe durch ihre chemische und thermische Beständigkeit, von Nachteil ist die relativ geringe Biegefestigkeit sowie hohe Material- und Fertigungskosten.

Für die Wasserstoffrückgewinnung bei Methanol- und Ammoniaksynthesen oder bei der Stickstoffanreicherung aus der Umgebungsluft wird die Gaspermeation bevorzugt eingesetzt. Zur Entfeuchtung von Erdgas und zur N_2 oder CO_2 -Abtrennung wird für Membranverfahren ein hohes Marktpotenzial erwartet. Einen Überblick über den Stand der Technik - Gaspermeation - gibt Tabelle 3.

Komponenten	Einsatzgebiet / Trennaufgabe	Bemerkung / technische Probleme
H_2/N_2	Ammoniak-Synthese	kondensierbare Dämpfe (H_2O , NH_3) müssen vorher entfernt werden
H_2/CH_4	H_2 -Rückgewinnung bei Raffinierung	kondensierbare Kohlenwasserstoffdämpfe stören
H_2/CO	Methanol-Synthesegaseinstellung	Vorabscheidung von Methanol
O_2/N_2	Inertgasherstellung	bis 98 % N_2
	Reinsauerstoff (>90%)	derzeit nicht möglich, Trennfaktor zu gering
CO_2/CH_4	Biogasaufbereitung	Vorreinigung nötig, Trennfaktoren zu gering
$\text{H}_2\text{O}/\text{KW}$	Erdgastrocknung	derzeit Erdgasverluste zu hoch
KW/Luft	Lösemittel-/Benzindampfrückgewinnung	Probleme durch Konzentrationspolarisation, Permeat explosiv
CH_4/N_2	Erdgasaufbereitung	derzeit noch zu geringe Selektivität der Membranen
He/KW	Heliumgewinnung aus Erdgas	geringe Feedkonzentration erfordert mehrstufigen Prozess
He/N_2	Heliumrückgewinnung aus Tauchluftgemisch	möglich, sehr kleiner Markt
H_2S	Abscheidung aus Biogasen, Erdgas	Selektivität gering

Tabelle 3 Stand der Technik Gaspermeation

Nach den bisherigen Recherchen sind kommerzielle Anlagen in Bereich der Sauerstoffanreicherung von Luft technisch nicht ausgeführt worden oder zu erwerben.

Veröffentlichungen weisen auf die prinzipielle Möglichkeit der Sauerstoffanreicherung von Luft hin. Das beispielsweise von G.A.S. Energietechnologie GmbH, Krefeld, publizierte Verfahren Lean caloric gas utilization (LCG-U) ist in der Planungsphase und basiert auf dem Prinzip der Gastrennung mittels porenfreier Lösungsdiffusionsmembranen. Es soll bei hohen Eingangsdrücken von 9 bis zu 13 bar ausgeführt werden. Damit ist ein entsprechend energetisch notwendiger Aufwand für die Verdichtung zu betreiben. Randbedingungen der verwendeten Membran z.B. Temperatureinsatzbereiche sind nicht bekannt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass gegebenenfalls auch eine Kühlung der verdichteten Luft notwendig ist. Die erreichbaren Sauerstoffgehalte und Volumenströme dieses Verfahrens sind nicht bekannt.

Des weiteren wurde eine Patentrecherche zu einzelnen Verfahren der Gastrennung durchgeführt. Entsprechende Patenschriften sind im Kapitel 8.2 Patentrecherche benannt.

6.3 Konzeption Versuchsanlage

Fraunhofer UMSICHT hat in Hinblick auf die aufgeführte Thematik der Sauerstoffanreicherung von Luft Grundlagenuntersuchungen und Versuche durchgeführt. Abbildung 2 zeigt den Aufbau eines Membranmoduls zur Gastrennung.

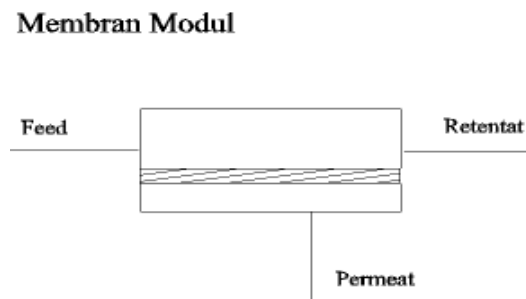


Abbildung 2
Membran Modul

Mit dem vorliegenden Modul sind folgende Ergebnisse erzielt worden:

Im Permeatstrom sind Sauerstoffgehalte von bis zu 38,3 % gemessen worden. Der zugeführte Volumenstrom Luft (Feed) betrug dabei 4 bar Überdruck. Des weiteren wurden verschiedene Variationen des Feedstromes, des Retentatstromes, mit Sauerstoff angereicherter Volumenstrom, und des mit Sauerstoff angereicherten Volumenstromes (Permeat) in Bezug auf Druck und Temperatur durchgeführt.

Es wurde eine Versuchsanlage konzipiert, die es ermöglicht, unterschiedliche Prozessparameter zu variieren. Abbildung 3 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau. Es können in diesem Teststand unterschiedliche Ausführungen von Membranmodulen getestet werden. Es werden mittels Schwebekörperdurchflussmesser die Volumenströme auf der Feedseite und Permeatseite bestimmt.

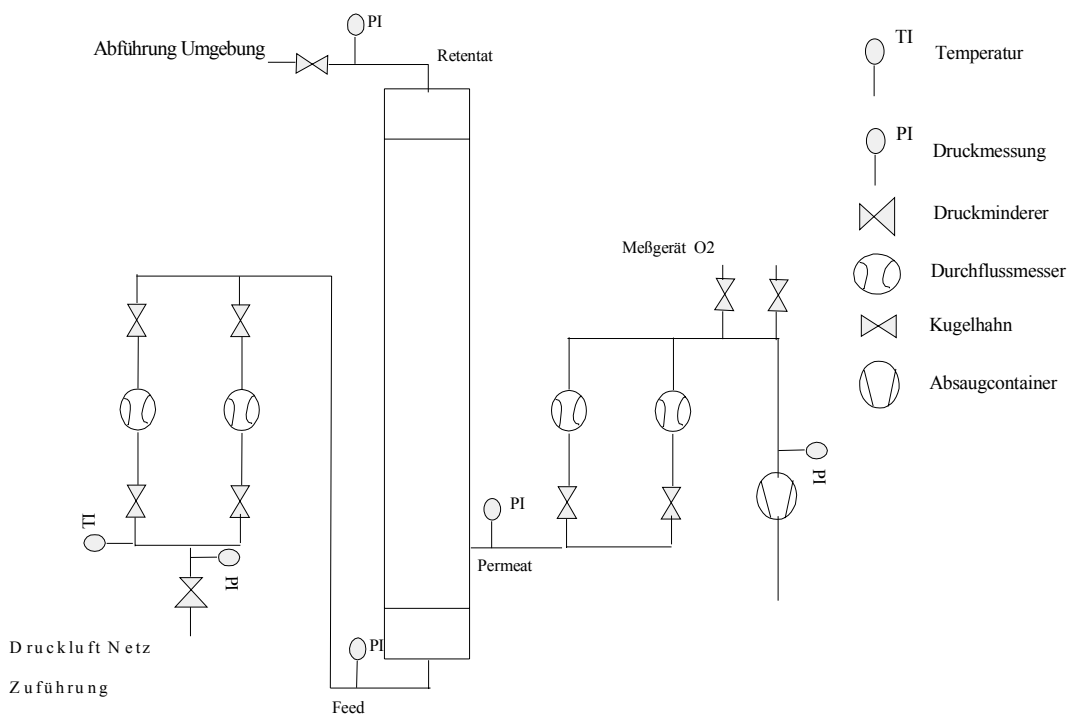


Abbildung 3
Versuchsaufbau

Messtechnik

Die Durchflussmessung erfolgt mit Krohne Schwebekörperdurchflussmesser mit einer Anzeige in Nm^3/h . Zur Druckkorrektur wurden Näherungsformeln des Herstellers verwandt. (Feed Volumenstrom 0,9 - 9,0 u. 7 - 70 Nm^3/h / Permeat Volumenstrom 0,2 - 2,0 u. 1,8 - 18 Nm^3/h)

Berechnungen mit unterschiedlichen Näherungsformeln zeigen, dass die berechneten Volumenströme im Rahmen einer Abweichung von $< 7 \%$ liegen (Umrechnung Betriebsdurchfluss auf Referenzdurchfluss; Kalibrierdaten Krohne für Luft 2,5 bar_{abs} ; 293,15 K).

Eine Kontrollmessung für den Feed Volumenstrom V_{Feed} wurde mit einem Balgenzähler zur Volumenzählung durchgeführt. Drucktransmitter für Feed, Retentat und Permeat wurden mit Referenzdruckmessaufnehmer kalibriert. Die Gasanalyse für den Sauerstoffgehalt erfolgte mit einem Fischer Rosemount Oxynos 100 Meßgerät.

Die automatisierte Messwerterfassung wurde mit der Software Kuhse KMA-PC für 9 Analog Kanäle / Meßwerte erfaßt.

Einen Überblick geben auch die Bilder der Versuchsanlage im Anhang 9.1.

- Abbildung 4 Versuchsanlage, Gasanalyse
- Abbildung 5 Versuchsaufbau Volumenstrom
- Abbildung 6 Messwerterfassung

6.4 Messprogramm

Es wurden umfangreiche Untersuchungen an verschiedenen Modulen durchgeführt. Dabei wurde folgende Vorgehensweise gewählt. Der Feed Druck p_{Feed} wurde zunächst konstant gehalten und anschließend wurden verschiedene Druckniveaus auf der Permeatseite eingestellt. Die Sauerstoffgehalte in % für Permeat und Retentat wurde abwechselnd gemessen. Zusätzlich wurden zur Bilanzierung Volumenstrom Feed und Permeat, Druck Feed, Permeat und Retentat zeitgleich aufgenommen (Kurz Zeit Messwerterfassung 5 Min alle 10 sek, Langzeit alle 3 min).

Tabelle 4 gibt einen Überblick des durchgeführten Meßprogrammes.

Feed P_{Feed}	Permeat $P_{Permeat}$	Retentat $P_{Retentat}$	
200 mbar	Variation	35 - 65 mbar	Variante R auf
250 mbar	+ 19 mbar - 50 mbar - 100 mbar	60 - 120 mbar	Variante R auf
300 mbar	- 150 mbar - 200 mbar - 250 mbar	80 - 150 mbar	Variante R gedrosselt
350 mbar	- 300 mbar - 350 mbar	110 - 180 mbar	
400 mbar	Druck nach Messung	140 - 220 mbar	
450 mbar	Druck p_{Feed}	170 - 250 mbar	
500 mbar		200 - 300 mbar	
	trockene Luft 21 % O ₂ 79 % N ₂	O ₂ 21 % - 32 % Rest N ₂	O ₂ 15% - 21 % Rest N ₂

Tabelle 4
Meßprogramm

6.5 Ergebnisse und Diskussion

Im Anhang Kapitel 9.2 Messergebnisse sind Grafiken einzelner Untersuchungen aufgeführt:

- Grafik 1 HF Variation Optimum
- Grafik 2 O₂ Gehalt auf
- Grafik 3 O₂ Gehalt Variation Feed Druck

Bei 2,5 bar Überdruck auf der Feedseite ist ein angereicherter Volumenstrom mit ca. 32 % Sauerstoffanteil im Permeat zu messen. In Abhängigkeit des Druckes auf der Retentatseite stellt sich ein Optimum für den angereicherten Sauerstoffgehalt im Permeatstrom ein. Kontrollmessungen auf der Retentatseite zeigen, dass der Sauerstoffgehalt im Retentatstrom entsprechend abnimmt.

Bereits mit Sauerstoffgehalten von 25 % sind deutliche Prozessverbesserungen in Verbrennungsprozessen mit angereicherter Luft zu erzielen. Die ersten

Erfahrungen führten zur Formulierung eines neuen verfahrenstechnischen Ansatzes. Hintergrund war die energetische Optimierung des Verfahrens, d.h. es sind möglichst geringe Druckniveaus für einen geringen Energieeinsatz maßgeblich einzuhalten:

Die Druckniveaus auf der Feed und Permeatseite wurden unabhängig von einander variiert. Die Luft auf der Feedseite wird mit einem Druck von 1 bis 3 bar absolut Druck zugeführt. Das Druckniveau auf der Retentatseite beträgt 1 bis 2,5 bar absolut. Der mit Sauerstoff angereicherte Permeat Strom wurde auf ein Druckniveau von 0,4 bis 1,2 bar absolut eingestellt.

In den ersten Versuchen haben sich neue, bisher auch den Herstellern von Membranen in dieser Form nicht bekannte Ergebnisse herausgestellt.

Bestimmende Einflußgrößen sind die aufgezeigten Druckniveaus und die damit verbundenen Volumenströme. Eine Absenkung des Druckniveaus auf der Permeatseite bewirkt eine Verbesserung des Trennprozesses. Der Sauerstoffgehalt erhöht sich durch die Vergrößerung der transmembranen Druckdifferenz. Gleichzeitig steigt der Volumenstrom auf der Permeatseite. Diese beiden Effekte führen zu einer Verbesserung der Trennleistung.

Ziel ist es, in einem einstufigen Verfahren bei möglichst geringen Druckniveaus die geforderten angereicherten Volumenströme zu erzielen. Folgende Vorteile ergeben sich:

- Bei einem Druckniveau auf der Feedseite von 1 – 1,5 bar absolut ergeben sich deutlich geringere Energieaufwendungen zur Bereitstellung des geforderten Luftvolumenstromes.
- Mit der Absenkung des Druckniveaus auf der Permeatseite ist eine Verbesserung des Trennprozesses verbunden. Der Volumenstrom mit Sauerstoff angereicherte Luft steigt bei gleichzeitig erhöhten Sauerstoffgehalt an.
- In Abhängigkeit der eingestellten Volumenströme gibt es ein energetisches Optimum in Abhängigkeit zum Verhältnis Volumenstrom Feed / Volumenstrom Permeat.

Am Beispiel der Grafik 4 O₂ Gehalt Variation Feed Druck bei 500 mbar Überdruck werden diese Ergebnisse deutlich. Die Meßreihen sind für die Randbedingungen Retentat a - auf und Retentat red - reduziert dargestellt. Retentat red bedeutet, dass ein Optimum für den Druckverlust im untersuchten Membranmodul eingestellt wurde.

Die Variation des Unterdruckes zeigt deutlich, dass sich das Verhältnis der Volumenströme $V_{\text{Feed}} / V_{\text{Permeat}}$ reduziert, d.h. bei konstanten Feed Volumenstrom erhöht sich der Permeat Volumenstrom. Der Durchsatz mit angereichertem Sauerstoff Volumenstrom (Permeat) steigt an. Gleichzeitig steigt auch der Sauerstoffgehalt bis zu 28 %.

6.6 Auslegungsgrundlagen für Gasmotoren

Hintergrund und Anforderungen

Gasgemische haben wegen ihrer Zusammensetzung unterschiedliche Eigenschaften, die sich durch Kennzahlen wie zum Beispiel Heizwert, Methanzahl und laminare Flammgeschwindigkeit beschreiben und beurteilen lassen. Diese Kennzahlen müssen durch geeignete Maßnahmen, Motorenkonstruktionen, Motormanagement, Drehzahlsteuerung, etc. in der Betriebsweise der Gasmotoren berücksichtigt werden, damit eine hohe energetische Ausbeute und Fahrweise ermöglicht wird.

Brennwert und Heizwert geben den Energieinhalt eines Gases an. Brennwert und Heizwert unterscheiden sich durch die Verdampfungswärme des bei der Verbrennung entstehenden Wassers. Beim Brennwert liegt das Wasser im flüssigen Zustand nach Abgabe der Kondensationswärme vor.

Die Methanzahl MZ eines Brenngases ist in Anlehnung zur Oktanzahl bei Benzin ein Maß für die Klopfestigkeit. Sie entspricht einem prozentualen Volumenverhältnis eines Vergleichsbrenngasgemisches aus Methan und Wasserstoff, das unter definierten Referenzbedingungen in einem Prüfmotor verbrannt wird und die gleiche Klopfestigkeit wie das zu untersuchende Gas aufweist.

Folgende Hauptkomponenten bestimmen die Methanzahl:

- Methan $\text{CH}_4 = \text{MZ } 100$

Methan ist die wesentliche Komponente mit hohem Heizwert und extrem unempfindlich gegen klopfen, d.h. klopfest.

- Wasserstoff $\text{H}_2 = \text{MZ } 0$

Wasserstoff senkt die Methanzahl eines Gasgemisches sehr schnell. Wasserstoff ist Bestandteil von Brenngasen wie z.B. Kokereigasen, Hochofengasen und Schwelgasen aus Holz Kohle oder Abfällen. Bei Anteilen von Wasserstoff erhöht sich jedoch die Brenngeschwindigkeit.

Bei geringeren MZ muß ein Gasmotor mit geringerer Verdichtung, hohem Luftverhältnis, geringer Ansaugtemperatur und zeitversetzter späterer Zündung betrieben werden.

- Höhere Kohlenwasserstoffe C_nH_m , $n > 1$ und $m > 4$

Höhere Kohlenwasserstoffe sind z.B. Ethen, Ethan, Propan, Propylen, ... und haben größere und instabilere Molekülstrukturen. Sie zerfallen leichter und können so eher bzw. vorzeitig verbrennen (Anstieg des Klopfen). Ungesättigte Kohlenwasserstoffe wie Ethen und Propylen sind instabil mit geringer MZ. Typische Gase sind Erdölgase und Naturgase.

Auch hier werden Gasmotoren mit geringerer Verdichtung, hohem Luftverhältnis, geringer Ansaugtemperatur und zeitversetzter späterer Zündung auf die entsprechenden Gase eingestellt.

- Inerte Gasbestandteile einer Gasmischung N_2 und CO_2

Stickstoff und Kohlendioxid nehmen an Verbrennungsprozessen nicht aktiv teil, es entstehen jedoch in Abhängigkeit der Verbrennungstemperaturniveaus beispielsweise Stickoxide. Die Komponenten wirken in einer Brenngasmischung Methanzahl steigernd. In Relation ist die Wirkung von Stickstoff ca. 1/3 der Wirkung von Kohlendioxid / ZAC01 /.

- Brenngeschwindigkeit – laminare Flammgeschwindigkeit

Die laminare Geschwindigkeit entspricht der Geschwindigkeit, die sich bei der Reaktion oder Oxidation zwischen den brennbaren Gasbestandteilen eines Gasgemisches und dem Luftsauerstoff an der Oberfläche des Flammeninnenkegels einstellt. Das Maximum ist bei einem Luftverhältnis von $\lambda^0 = 1$. Brenngeschwindigkeiten im Brennraum eines Gasmotor sind höher als die laminare Flammgeschwindigkeit. Allgemein ist bei höheren Luftverhältnis ein verlangsamer Einfluß auf den Verbrennungsablauf zu beobachten.

Anhand der Diskussion für ein typisches Anwendungsbeispiel werden die Vorteile des neuen Verfahrens verdeutlicht:

Es wird eine Deponiegasverwertungsanlage mit einem Gasmotor mit einer elektrischen Leistung von 125 kW und einem Wirkungsgrad $\eta = 33\%$ betrachtet.

Die Leistung der Anlage entspricht ca. 378,8 kW. Bei einem Erdgaseinsatz mit einem Heizwert von 9,96 kWh/m³ entspricht die benötigte Brenngasmenge

38,03 m³/h Gas. Mit dem Mindestluftfaktor $L_{\min} = 9,56 \text{ m}^3 \text{ Luft/ m}^3 \text{ Brenngas}$ und einem Luftverhältnis von $\lambda = 1,7$ ist eine Verbrennungsluftmenge mit O₂ Gehalten von 21 % von 618 m³/h notwendig. Der Anteil an Sauerstoff der Verbrennungsluftmenge $V_{\text{Luft}} = V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}$ beträgt $V_{\text{O}_2} = 129,3 \text{ m}^3/\text{h}$!

Bei Verwendung angereicherter Luft mit O₂ Anteil von 25% oder 28% vermindern sich die benötigten Luftmengen auf 517,2 m³/h bzw. 461,8 m³/h !

Dieses Beispiel wird auf einen Gasmotor, der mit Deponiegas betrieben wird, übertragen.

Ein typisches Deponiegas mit einem Heizwert 4,0 kWh/m³ hat eine geringere Methanzahl und entsprechend einen geringeren Mindestluftbedarf ($L_{\min} 3,83 \text{ m}^3 \text{ Luft/ m}^3 \text{ Brenngas}$). Um die gleiche Leistung bereitstellen zu können, ist die Brenngasmenge deutlich größer (94,7 m³/h Gas). Es ist eine Verbrennungsluftmenge mit O₂ von 21 % von 616,6 m³/h erforderlich (gleiche Randbedingung Luftverhältnis von $\lambda = 1,7$).

In der Praxis wird bei dem Brenngas dieser Qualität eine Betriebsweise bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 1,5$ eingestellt. Dies entspricht einer benötigten Verbrennungsluftmenge mit O₂ von 21 % von 544,1 m³/h!

In Gasmotoren (BHKW's) kann derzeit nur Deponiegas mit mindestens 40 % Methan Anteil technisch genutzt werden. Der Ansatz, die Randbedingungen der zugeführten Verbrennungsluft zu variieren, führt zu folgenden Auswirkungen:

- Verschiebung der Inertgasanteile bewirkt eine Verringerung der Verbrennungsluftmenge
- Änderung der Verbrennungstemperatur
- Luftverhältnis von $\lambda = 1,7$ Erdgasmotor verschiebt sich zu Betriebsweisen mit Luftverhältnis $\lambda = 1,3$
- Veränderung der Brenngeschwindigkeiten

Die entsprechenden Werte für angereicherte Luft mit Sauerstoffgehalten von 25 % und 28 % sind in Tabelle 5 Einfluß auf Luftverhältnis, Verbrennungsluftmenge aufgeführt.

Luftverhältnis		Anteil V O ₂	Gesamtluftmenge mit O ₂ - 0,25	Gesamtluftmenge mit O ₂ - 0,28
λ	1,5	114,1 m ³ /h	456,3 m ³ /h	407,4 m ³ /h
λ	1,3	98,9 m ³ /h	395,5 m ³ /h	353,1 m ³ /h

Tabelle 5 Einfluß auf Luftverhältnis, Verbrennungsluftmenge

Wenn Deponiegasmotoren mit Sauerstoff angereicherter Luft gefahren werden, ist es möglich, Brenngase mit geringeren Methangehalten < 40 % (d.h. geringerer Methanzahl) zu betreiben.

Die Grenzen, die dem bisherigen Einsatz gesetzt sind, können durch die neu einzustellenden Randbedingungen in Richtung von Methangehalten bis zu 25°% verschoben werden.

6.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen sind unter Anwendung des neuen Verfahrens Auslegungskriterien für eine Pilot Anlage formuliert worden. Es wurde eine Anlage zur Sauerstoffanreicherung für einen O₂ Anteil V_{O₂} = 100 m³/h der zugeführten Verbrennungsluft konzipiert.

Entsprechend der Untersuchungsergebnisse wurde eine benötigte Modulanzahl ermittelt, um die geforderten Volumenströme einzuhalten (Normierung!). Zusätzlich wurden die Komponenten einer Anlage bestimmt und ausgelegt. Die Volumenströme und Druckniveaus wurden bilanziert und die günstigsten Verdichter ermittelt (Auslegungsgrundlagen: Verdichterleistung, Typ, Drehzahl, FU, Kupplungsleistung).

Des weiteren wurden realistische Kostenansätze für Verdichter, Motoren, Montagezeiten, Kühlungskomponenten, Wärmetauscher, Module, Container, Rohrleitung u. Zubehör und die Meß- und Regelungsausrüstung inklusive der Installation der Pilotanlage festgestellt.

Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die Kosten der Investition einer Anlage zur Sauerstoffanreicherung den Einnahmen durch den möglichen Betrieb der gesamten Deponiegasanlage gegenübergestellt (siehe auch Tabelle 6).

Folgende Annahmen gehen in die Betrachtung ein:

- Die am Deponiestandort bisher vorhandene Anlagenkapazität kann wieder in Betrieb genommen werden und Deponiegasqualitäten bis zu Methangehalten von 25 % werden im BHKW technisch genutzt.
- Die Einnahmen ergeben sich aus der Vergütung gemäß EEG. Sie sind um den Faktor 0,015 EUR für die Betriebskosten des vorhandenen BHKW reduziert.
- Betriebsstunden von 7500 h / Jahr werden angesetzt.
- Der Eigenbedarf für das Verfahren beträgt 20 kW_{el}. (Verdichterleistung, Verluste Rohrleitung, Kühlung, Lüfter ...)
- Kostenansätze für Finanzierung, Wartung und Instandhaltung, Versicherung
- Randbedingungen einer Pilotanlage 70 Module p Feed 1,4 bar_{abs.} / p Permeat 0,65 bar_{abs.} / geforderte O₂ Menge 100 Nm³/h

Die Aufstellung zeigt, dass vor allem die Investition für die Membranmodule bzw. die Anzahl ein entscheidender Kostenfaktor ist. Entsprechend vergrößern sich die Kosten für Rohrleitungszubehör und Installationsaufwand.

Unter den getroffenen Annahmen ergibt sich eine Amortisationsdauer der Investition von 180.000.- EUR von 5 Jahren.

Nach Ablauf dieser Zeit kann der Betreiber der Anlage jährliche Einnahmen von 48.589.- EUR verbuchen. Neben den umweltrelevanten Aspekten der Treibhausgasvermeidung und den CO₂ Einsparpotenzialen (Faktor 23) sind mit der Integration des neuen Verfahrens in vorhanden Anlagen auch wirtschaftliche Anreize den Betreibern aufzuzeigen.

Jahresbetriebsstunden :		7.500	7.500 h
Gesamtleistung (kW) :			125 kW
Eigenbedarf :			20,0 kW
Nettoleistung :			105 kW
Kosten			
Kosten Module			80.000 EURO
zusätzliche Investitionskosten:			100.000 EURO
Feed - Verdichter, Motor, FU		Rohrleitung, Zubehör	
WT, Lüfter		Regelung, Messtechnik	
Permeat - Verdichter, Motor, FU		Container	
Planung			
Montage Feed, WT, Lüfter, Permeat, Module, ...			
Summe Investitionskosten			180.000 EURO
Investition			180.000 EURO
Zinssatz		7	7 %
Nutzungsdauer		5	5 Jahre
Annuität			43.900 EURO
Kapitalgebundene Kosten p.a.			43.900 EURO
verkaufte Menge			787.500 kWh
durchschn.Preis (0,0767 € - 0,015 €)		0,0617	0,0617 EURO/kWh
Einnahmen p.a.			48.589 EURO
spez. Wartungskosten		0,001	0,001 EURO/kWh
Wartungskosten p.a.			938 EURO
sonstige Kosten p.a.		2500	2.500 EURO
Kosten für Versicherung %		0,0059	1.062 EURO
JAHRESUEBERSCHUSS			189 EURO
AMORTISATIONSDAUER			5 Jahre

Tabelle 6
Wirtschaftlichkeits-
betrachtung

6.8 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Fraunhofer UMSICHT hat ein neues Verfahren zur Sauerstoffanreicherung von Luft entwickelt. Mit dem neuen verfahrenstechnischen Lösungskonzept werden modular aufgebaute Membranmodule zu einem Gesamtanlagenkonzept zusammengeführt. Ein Einsatzgebiet ist die gasmotorische Nutzung von Schwachgasen z.B. Deponiegasen. Es wurden umfangreiche Grundlagenuntersuchungen im Rahmen dieses DBU Projektes durchgeführt. Insbesondere die Anpassung an den Anwendungsfall der gasmotorischen Nutzung in BHKW wurde detailliert untersucht.

Bereits im Juni 2002 ist ein Verfahrenspatent beim Deutschen Patentamt eingereicht worden. Eine abschließende Stellungnahme liegt bisher nicht vor.

Des Weiteren ist ein PCT Patentverfahren eingeleitet worden. Veröffentlichungen sind daher bisher nicht initiiert worden.

Des Weiteren wurde der Kontakt zu verschiedenen Membranherstellern hergestellt, die besonderes Interesse für neue potentielle Anwendungsgebiete und für den Einsatz der jeweiligen Membrantechnik bzw. Produktlinien sehen. Die Hersteller sind sehr interessiert, aber bedingt durch die allgemeine wirtschaftliche Lage zurückhaltend mit der Beteiligung an weiteren Forschungsvorhaben.

Fraunhofer Umsicht versucht derzeit auf Grund der positiven Erfahrungen weitere Anschlußprojekte durchzuführen. Es ergaben sich viele unterschiedliche Kontakte zu anderen Anwendungsbereichen – Kläranlagen, Stahlwerken Thema Verbrennungsluftbereitstellung für Warmhalteöfen und Luftkonditionierung für Luftzerlegungsanlagen.

Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse sollen in veränderten Anwendungen getestet werden. Es werden durch die neue Technik Einsparungen bei dem Energieeinsatz erwartet. Erste Erfahrungen sollen dazu eine Testanlage bis zum Jahresende 2003 erbringen. Ziel ist es, auf Basis der durchgeführten Auslegungsgrundlagen eine Pilotanlage zu konzipieren. Mit einer solchen Anlage soll der Nachweis der Einsetzbarkeit des neuen Verfahrens dokumentiert werden.

7 Fazit

Nach den bisherigen Recherchen sind kommerzielle Anlagen in Bereich der Sauerstoffanreicherung von Luft technisch nicht ausgeführt worden oder zu erwerben.

In den Versuchsreihen wurde überprüft, welche Randbedingungen und Parameter für einen optimalen Betrieb des neuen Verfahrens einzuhalten sind. Mit Hilfe der reproduzierbaren Versuchsergebnisse sind Optimierungspotenziale aufgezeigt worden. Mit dem innovativen Lösungsansatz, den Sauerstoff angereicherten Permeat Volumenstrom gezielt abzusaugen und das Druckniveau abzusenken, ergibt sich eine Verbesserung des Trennprozesses. Dadurch wird es möglich, den Eingangs Feed Volumenstrom zu optimieren. Mit einem geringeren Feed Volumenstrom, der noch zu verdichten ist, ist energetisch ein deutlich günstigeres Verfahren zu entwickeln.

Die Vorteile des neuen Verfahrens sind im folgenden aufgeführt:

- Kapazitätserweiterung bzw. Wiederinbetriebnahme von vorhandener Anlagentechnik
- Optimierung der Verfahrenstechnik, Prozessoptimierung, Reaktionstechnik
- Reduzierte Gasvolumenströme, Verschiebung von Inertgasanteilen
- Wirtschaftlicher Betrieb
- Ressourcenschonung, Verminderung von Treibhausgasen

Das Erneuerbaren-Energie-Gesetz (EEG) garantiert feste Vergütungssätze für Strom aus Deponiegasen und da die Anlagentechnik auf den Deponien oft vorhanden ist, wird mit Hilfe des neuen Verfahrens die wirtschaftliche Betriebsweise weiterhin ermöglicht oder stillgelegte Anlagen können wieder in Betrieb genommen werden. Durch die Aufweitung des Einsatzbereiches der technischen Nutzung geringerer Gasqualitäten wird ein entscheidender Beitrag zur Umweltschonung geleistet. Durch die Nutzung dieser Gase zur Strom- und Wärmeerzeugung findet eine aktive Reduzierung des Kohlendioxidausstosses statt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, mit dem neuen einstufigen Verfahren können mit Sauerstoff angereicherte Volumenströme in der Qualität bis ca. 30 % für Verbrennungsprozesse bereitgestellt werden. Die Auslegungsgrundlagen für die Projektierung einer Pilotanlage stehen zur Verfügung.

Als nächster Schritt ist es notwendig, eine Pilotanlage zu bauen. Mit dieser Anlage kann das Verfahren im Dauerbetrieb in einem praxisnahen Anwendungsfall eingesetzt werden.

Erste Kontakte zu potentiellen Anwendern, Betreibern und auch zu verschiedenen Membranherstellern zeigen großes Interesse. Die Bereitschaft sich auch finanziell zu engagieren ist noch zurückhaltend. Die Amortisationszeiten mit 5 Jahren im Bereich der Deponiegasnutzung sind derzeit noch zu hoch. Deutlich müssen die Investitionskosten für Anlagenkonzeptionen gesenkt werden.

Das Potenzial ist auf Seiten der Modulentwicklung und Gestaltung sicherlich zu optimieren. Bei entsprechenden Stückzahlen sind die Membrankosten zu senken. Diese Aspekte gelten natürlich auch für die weiteren Komponenten einer Gesamtanlage.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Literatur

- ACMK01 8. Aachener Membran Kolloquium, 27.-29. März 2001 – Aachen, Verlag Mainz, 2001
- ASUE01 ASUE Publikation, BHKW Kenndaten 2001, 05 11 01, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 2001
- ASUE02 ASUE Publikation, Mikro-KWK, 05 12 01, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 2001
- ASUE03 ASUE Publikation, BHKW Grundlagen, 05 11 99, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 1999
- ASUE04 ASUE Publikation, Zuluftfiltration, 11 11 91, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 1991
- BUD94 N.N.
Buderus Handbuch der Heizungstechnik, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 33. Auflage, 1994
- DES01 N.N.
Conference proceedings 2 nd Dessau Gas Engine Conference, 07.-08. Juni 2001, Dessau, Sachsen-Anhalt, Deutschland
- DUB95 Beitz, W.; Küttner, K.-H.
Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, Berlin, 18. Auflage, 1995
- DVGW.G260 Technische Regeln DVGW Arbeitsblatt G 260 Gasbeschaffenheit, WVGW Verlag, Bonn, 2000
- HER00 Herr, H.
Tabellenbuch Wärme Kälte Klima, Europa Lehrmittel Verlag, Haan-Gruiten, 1 Auflage, 2000
- JEN03 Jenbacher Energiesysteme Firmenschrift 2003
- REC97 Recknagel, Sprenger, Schramek
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik; R. Oldenbourg Verlag, München Wien, 68. Auflage, 1997
- U_B22 Oberhausener Grubengastage 2000, UMSICHT Schriftenreihe Band 22, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2000
- U_B37 Oberhausener Grubengastage 2001, UMSICHT Schriftenreihe Band 37, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2002
- ZAC01 Zacharias, F.
Gasmotoren, Vogel Verlag, Würzburg, 1. Auflage, 2001

8.2 Patentrecherche

DE 100 02 692 A1	Offenlegungsschrift Verfahren und Vorrichtung zur Trennung von Gas- und / oder dampfförmigen Medien, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, DE, 02.08.2001
DE 100 25 091 A1	Offenlegungsschrift Verfahren und Membrananordnung zur Stofftrennung, Linde AG, Wiesbaden, DE, 22.11.2001
DE 100 56 789 A1	Offenlegungsschrift Separator zur Erzeugung von Sauerstoff, Linde AG, Wiesbaden, DE, 23.05.2002
DE 100 64 894 A1	Offenlegungsschrift Luftzerlegungseinrichtung, Alstom, CH, 27.06.2002
DE 195 18 407 A1	Offenlegungsschrift Verfahren zur adsorptiven Sauerstoffanreicherung von Luft mit Mischungen aus Molekularsieb-Zeolithen, Bayer AG, DE, 21.11.1996
DE 197 39 144 C2	Patentschrift Vorrichtung zur Entfernung von Wasserdampf aus unter Druck befindlichen Gasen oder Gasgemischen, GKSS Forschungszentrum Geesthacht, DE, 18.04.2002
DE 199 02 517 A1	Offenlegungsschrift Verbundmembran, Verfahren zu ihrer Herstellung und Verwendung zur Gastrennung, Nitsch, W. u.a. 82340 Feldafing, DE, 03.08.2000
DE 38 06 107 A1	Offenlegungsschrift Verfahren zum Austrag organischer Verbindungen aus Luft / Permanentgasgemischen, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, DE, 31.08.1989
DE 41 06 547 A1	Verfahren zur Sauerstoffanreicherung, Bayer AG, DE, 03.09.92
DE 44 16 134 A1	Offenlegungsschrift Verfahren zur Abtrennung von Sauerstoff bei hohen Temperaturen mit Hilfe von semipermeablen oxidischen Membranen, NMI UNI Tübingen, DE, 09.11.1995
DE 44 42 763 A1	Offenlegungsschrift Trennschichten für Membranen zur Anreicherung von Sauerstoff aus Luft, NMI UNI Tübingen, DE, 05.06.1996
DE 690 33 734 T2	Patentschrift (Übersetzung) Verfahren zur Rückgewinnung von kondensierbaren Komponenten aus Gasströmen, Membrane Technology and Research, US, 30.08.2001
DE 691 27 267 T2	Patentschrift (Übersetzung) Dreistufiges Membrangastrennungsverfahren und Errichtung dazu, Praxair Technology, US, 05.02.1998
DE 692 01 942 T2	Patentschrift (Übersetzung) Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung durch Permeation von einem unreinen leichten Gas, Air Liquide, FR, 03.08.1995
DE 692 19 033 T2	Patentschrift (Übersetzung) Gastrennung unter Verwendung Glasähnliche Polymermembranen bei niedrigen Temperaturen, The Cynara Co. formaly RHRK holding, US, 20.11.1997
DE 695 14 454 T2	Patent Verfahren und Vorrichtung zur Gastrennung mit Membranen, Air Liquide, FR, 03.08.2000

9 Anhang

9.1 Bilder Versuchsanlage



Abbildung 4
Versuchsanlage,
Gasanalyse

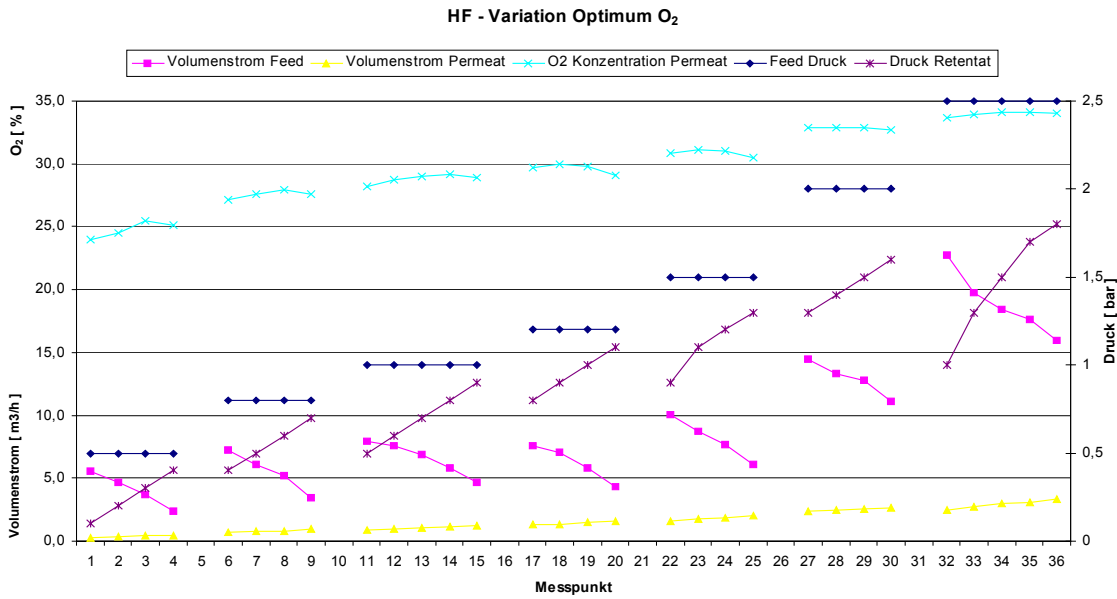


Abbildung 5
Versuchsaufbau
Volumenstrom



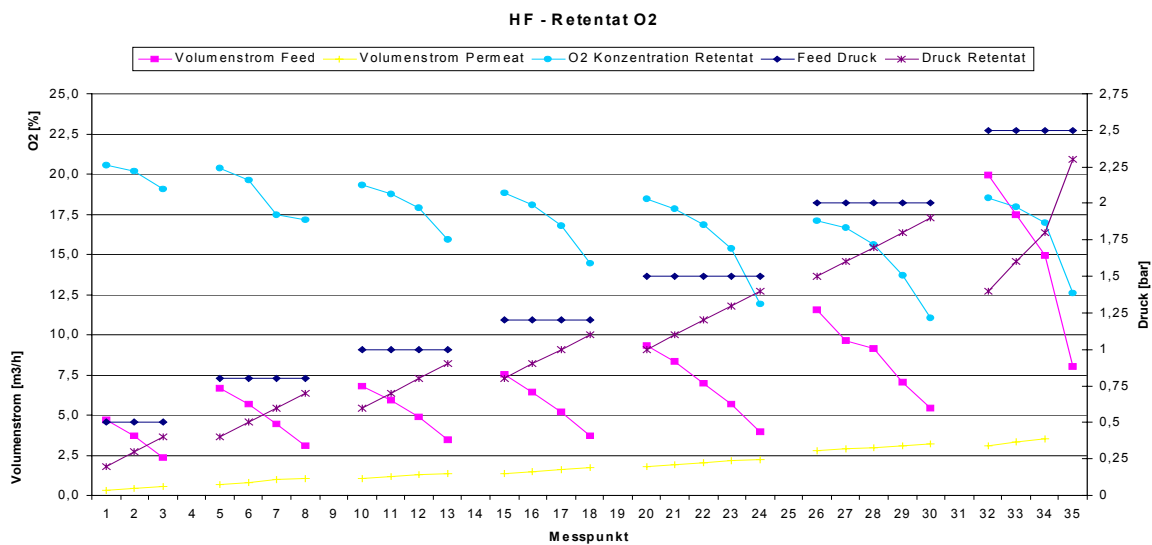
Abbildung 6
Messwerterfassung

9.2 Messergebnisse



Grafik 1 HF Variation Optimum

Vorgehensweise: Einstellung Feed Druck konstant, Variation des Retentat Drucks -> Reaktion Änderung Volumenströme u. O₂ Konzentration

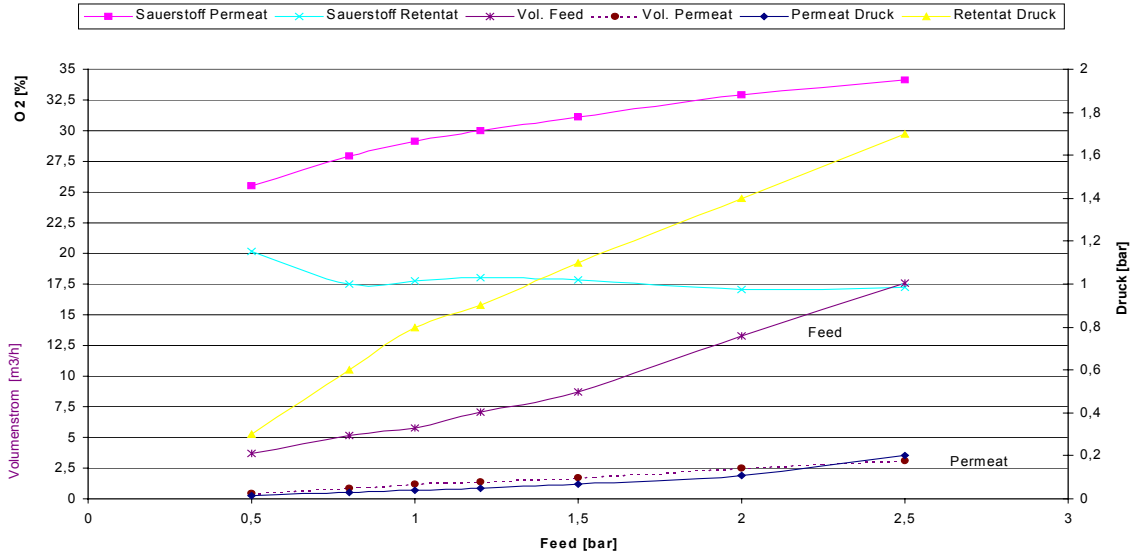


Grafik 2 O₂ Gehalt auf Retentatseite

Vorgehensweise: Feed Druck konstant, Variation des Retentat Drucks -> Änderung Volumenströme, O₂

HF - O₂ Konzentration, eingestelltes Maximum bei Feed Druck = const.

Grafik 3 O₂ Gehalt Variation Feed Druck



Datenauswertung

Grafik 4 O₂ Gehalt Variation Feed Druck bei 500 mbar Überdruck

