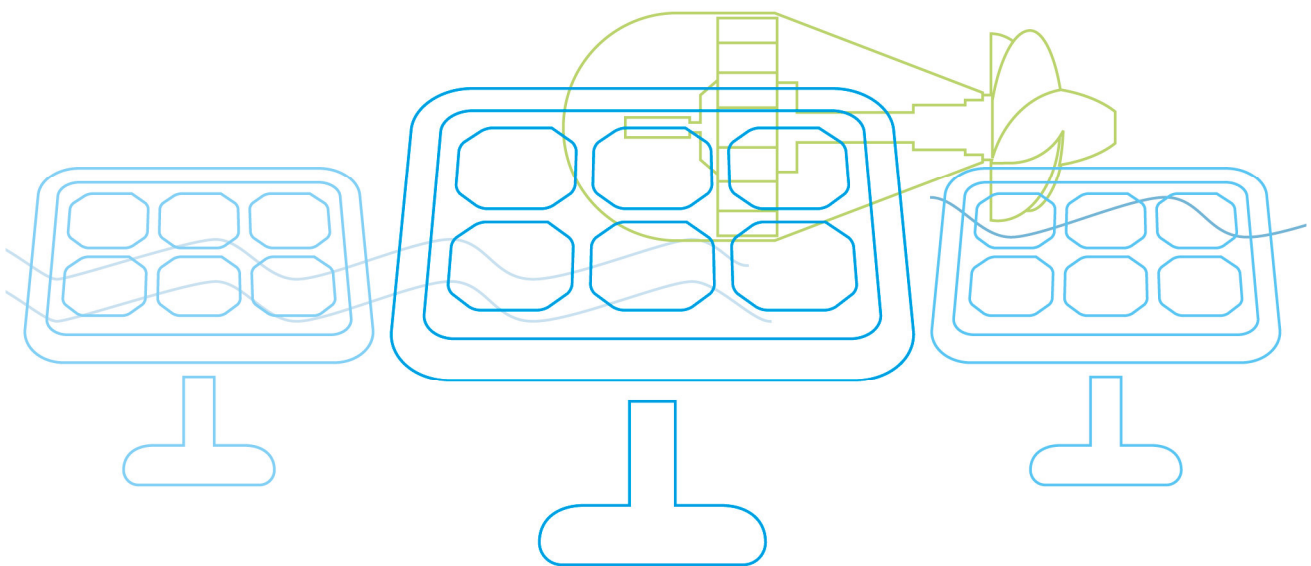




BiogasOxiSulf

Hochverfügbares, innovatives
Entschwefelungsverfahren für Biogas
auf Basis einer chemisch-oxidativen
Wäsche



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel' in a cursive script.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

NEUE ENERGIEEN 2020

Publizierbarer Endbericht – INDEX

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Projekttitel:

BiogasOxiSulf - Hochverfügbares, innovatives Entschwefelungsverfahren für Biogas auf Basis einer chemisch-oxidativen Wäsche

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung	2
2. Inhaltliche Darstellung	5
2.1. Entwicklung optimierter Strategie und Parameter für den Wäscherbetrieb.....	5
2.2. Monitoring und Betrieb von Wäscher und Membranaufbereitungsanlage	7
2.3. Untersuchung des dynamischen Anlagenverhaltens des Wäschers	9
2.4. Untersuchung der Auswirkungen des Wäschers auf die Membrananlage.....	9
2.5. Adaptierung des Einsatzmanagements der Insitu- sowie der Feinentschwefelung...	9
2.6. Modellbildung und Simulation	11
2.7. Wirtschaftliche Betrachtung	14
3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen	15
4. Ausblick und Empfehlungen	18
5. Literaturverzeichnis	19
6. Abbildungsverzeichnis.....	19

1. Einleitung

Im Laufe des Projektes „Virtuelles Biogas“ konnte gezeigt werden, dass für die erfolgreiche Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität neben der effizienten Abtrennung von Kohlendioxid die Abtrennung von Schwefelwasserstoff H_2S von entscheidender Bedeutung ist. Diese Entschwefelung ist nicht ausschließlich für die Aufbereitung zum Zwecke der Netzeinspeisung, sondern auch für einen sicheren Betrieb der Gasmotoren notwendig. Verschiedene Verfahren zur Entfernung des Schwefelwasserstoffs sind üblich und an der Biogasanlage Bruck/Leitha sind während der Projektlaufzeit sogar Erfahrungen mit drei verschiedenen Verfahren gemacht worden. Dabei hat sich gezeigt, dass die gängigen Verfahren bei stationärem Anlagenbetrieb sehr gut dazu geeignet sind, um die extrem niedrigen H_2S -Gehalte, die für die Netzeinspeisung des produzierten Biomethans erforderlich sind, einzuhalten. Biogasanlagen haben aber, je nach Anlagenauslegung und Substratbeschaffenheit, einen durchaus breiten dynamischen Bereich, in dem sich wesentliche Rohgasparameter, vor allem der Schwefelwasserstoffgehalt, bewegen können. Speziell bei Cofermentationsanlagen ist durch den Einsatz sehr verschiedener Substratgruppen damit zu rechnen, dass die Schwefelgehalte im Gas durchaus sprungartige Veränderungen zeigen können. Darüber hinaus ist die Fermentation ein biologischer Prozess der inhärenten Schwankungen unterworfen sein kann. Mit solchen sprungartigen Änderungen können speziell biologische Entschwefelungsverfahren nur mit größeren Verzögerungen umgehen, da sich auch hier die Biologie erst dann geänderten Stoffwechselbedingungen anpassen muss. Des Weiteren sind viele Entschwefelungsverfahren mit chemischen Einsatzstoffen verbunden (Fermenter-Chemikalien, Adsorbentien), die nicht zu vernachlässigende Kosten beim Betrieb der Biogasanlage verursachen.

Das Projektziel des abgelaufenen Projektes war die Entwicklung eines effizienten und wirtschaftlichen Betriebs eines neuartigen Systems zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas auf Basis einer chemisch-oxidativen Wäsche mit Natronlauge und Wasserstoffperoxid. Dieses Entschwefelungssystem ist speziell hinsichtlich seines dynamischen Verhaltens eine wesentliche Verbesserung verglichen mit bisher üblichen Verfahren. Durch die Anwendung dieses Verfahrens wird selbst bei stark schwankenden Schwefelwasserstoffgehalten des Rohbiogases sowie bei großen Gradienten dieses Parameters eine gleich bleibend gute Entschwefelungsleistung erzielt, sodass ein konstanter Betrieb der nachgeschalteten Biogasaufbereitungsanlage und der Gasnetzeinspeisung sichergestellt werden kann. Dadurch kann die Auslastung und Verfügbarkeit der Aufbereitungsanlage sowohl bei der Referenzanlage Bruck/Leitha als auch bei weiteren Anlagen signifikant gesteigert werden. Darüber hinaus ist auch eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Gesamtentschwefelungssystems einer Biogasanlage darzustellen, da der Verbrauch an Chemikalien für andere Entschwefelungsverfahren signifikant reduziert werden kann.

Im Vorprojekt „Virtuelles Biogas“ wurde der chemisch-oxidative Wäscher errichtet und in Betrieb genommen (siehe **Abbildung 1**). Die Ergebnisse des abgelaufenen Projektes zeigen einen wirtschaftlichen und effizienten Betrieb dieses Apparates und erhöhen damit die Verfügbarkeit der Gasaufbereitung und Netzeinspeisung signifikant. Die Erkenntnisse des

Projektes sind durch Verallgemeinerung auch auf andere Biogasanlagen umlegbar, wodurch wesentliche Verbesserungen in Betrieb und Verfügbarkeit sowie in der Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen möglich werden.



Abbildung 1: Die Lieferung und Aufbau des chemisch-oxidativen Wäschers an der Biogasanlage Bruck an der Leitha

Aufgrund der Neuartigkeit des eingesetzten chemisch-oxidativen Wäschers im Bereich der Biogasentschwefelung wurde eine intensive Untersuchung des Betriebes und der Charakteristiken aller wesentlichen Anlagen unter wissenschaftlicher Betreuung durchgeführt. Die Entschwefelung von Biogas stellt ein zentrales Element der Aufbereitung von Biogas dar und selbst für den alleinigen Betrieb der Gasmotoren kann darauf nicht verzichtet werden. Darüber hinaus wurde die Inbetriebnahme und Entwicklung eines technisch und wirtschaftlich optimierten Betriebes des Wäschersystems im abgelaufenen Projekt bei vollem Betrieb der Biogasaufbereitungsanlage sowie der Verstromung durchgeführt. Aus diesen Gründen war die Anwendung effizienter Methoden unter Einhaltung eines möglichst großen Sicherheitspotenzials von großer Bedeutung.

Während der Inbetriebnahme und des gesamten Probebetriebes wurden alle wesentlichen Parameter des Wäschersystems sowie der nachgeschalteten Anlagenteile (Gasaufbereitung, Gasmotoren) messtechnisch erfasst und gespeichert. Die Gaszusammensetzung am Eintritt und am Austritt des Wäschers wurde mittels NDIR-Analytik (CO_2 , CH_4), elektrochemischer Gasanalytik (H_2S) sowie mit paramagnetischer O_2 -Analytik erfasst. Zusätzlich wurde an der Anlage Bruck/Leitha ein mobiles Gasanalysengerät eingesetzt, welches schnell und flexibel an verschiedenen Stellen im Prozess eingesetzt werden kann. Weiters wurden die wesentlichen Parameter der Waschflüssigkeit gemessen (Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotenzial). Alle gesammelten Daten wurden in die bestehende Datenarchivierungs-Struktur integriert. Diese Daten wurden während der gesamten Projektlaufzeit gesammelt und für die weiteren Analysenschritte herangezogen.

Nach ausgiebigen Versuchen an einer kontinuierlich betriebenen Laborapparatur sowie fünfmonatiger Erfahrungen des realen Wäschers in Bruck an der Leitha wurde eine

optimierte Regelungsstrategie sowie die erforderlichen Ablaufstrukturen für instationäre Anlagenzustände entwickelt. Die regelungstechnischen Parameter des Automatisierungssystems wurden mittels der gewonnenen Erfahrungen an der Realanlage sowie an der Laboranlage ermittelt und im Betrieb laufend optimiert. Es wurde ein autonomes Automatisierungssystem auf Basis einer Industrie-SPS zur Steuerung des chemisch-oxidativen Wäschers implementiert, sowie diese Anlage auch in das übergeordnete Automatisierungssystem der Gaspermeations-Biogasaufbereitungsanlage sowie in das Zentralleitsystem der Biogasanlage integriert. Dem Bedienpersonal stehen somit vielfältige Interaktionsmöglichkeiten mit der Anlagensteuerung zur Verfügung (vor Ort, in der Leitstelle, über Internet auch global).

Weiters wurde das Ansprechverhalten des Wäschersystems bei sprungartigen Änderungen der relevanten Prozessparameter untersucht und mit bestehenden Verfahren verglichen. Während der Projektabwicklung wurden geeignete Prozessbedingungen und Abscheidegrade ermittelt; in ausgedehnten Versuchsreihen wurden diese Bedingungen dann schrittweise verändert und deren Einfluss auf den Abscheidegrad untersucht. Während des gesamten Probetriebes und der durchgeführten Versuchsläufe wurde der jeweilige Einfluss des Wäscherbetriebes auf die Gaspermeations-Biogasaufbereitungsanlage untersucht um etwaige negative Auswirkungen frühzeitig zu erkennen und zu beheben.

Die Tätigkeiten hinsichtlich der Entwicklung und Parametrierung des Regelungskonzeptes für die Wäscheranlage wurden maßgeblich durch theoretische Arbeiten unterstützt. Hier wurden neue Ansätze zur Modellbildung und Computersimulation des Wäscherprozesses implementiert.

Mit dem Ende des Projektes kann dann das Einsatzmanagement aller angewandten Entschwefelungsmethoden an der Anlage Bruck an der Leitha adaptiert und an die Leistung der Wäscheranlage angepasst werden. Abschließend erfolgte mit allen generierten Daten des Projektes eine wirtschaftliche Analyse des neuartigen Entschwefelungskonzeptes.

Das wichtigste Ergebnis des abgelaufenen Projekts ist das Erreichen eines stabilen und geregelten Betriebes des chemisch-oxidativen Wäschers nach der Entwicklung des optimalen Betriebskonzeptes. Die erreichten Abscheidegrade liegen stabil deutlich über 90%; der Betrieb zeigt, dass bei Rohgas-H₂S-Gehalten von 400-1500ppmv stabil Reingas-H₂S-Gehalte in der Größenordnung 5-50ppmv zu erreichen sind. Damit ist der Betrieb der Gaspermeationsanlage problemlos möglich. Weiterführende Versuche und Überlegungen haben dazu geführt, dass das Ansprechverhalten des Wäschers wesentlich verbessert und der Chemikalienbedarf des Systems drastisch reduziert werden konnte. Durch ein adaptiertes Flüssigkeitsausschleusungs-Management wurde die natürliche pH-Pufferungsfähigkeit der Salzlösung zur weiteren Reduktion des Chemikalienbedarfes ausgenutzt. Die theoretischen Simulationsarbeiten führten zu einer hervorragend geeigneten theoretischen Abbildung des Systems, welche für die Entwicklung und Parametrierung von alternativen Regelungskonzepten herangezogen wird. Basierend auf den gesammelten Daten sowie der Betriebserfahrungen mit dem chemisch-oxidativen Wäscher, aber auch mit anderen Verfahren der Rohbiogasentschwefelung kann die Wirtschaftlichkeit des neu entwickelten Verfahrens dargestellt werden. Dies geschieht immer vor dem Hintergrund der Erhöhung der Betriebssicherheit des Gesamtanlagenkomplexes durch eine wesentlich

verbesserte Ansprechdynamik des chemisch-oxidativen Wäscherkonzeptes. Unter dem Strich steht damit eine konkurrenzfähige Gesamtlösung zur effizienten Entschwefelung von Rohbiogas für den Einsatz bei weiteren Anlagen zur biogenen Gasproduktion mit Gasaufbereitung zur Verfügung.

Die erste Folgeanlage basierend auf dem hier entwickelten Konzept wurde bereits bei einer weiteren Biogasanlage (Klärgas) errichtet und in Betrieb genommen, zum Zeitpunkt der Berichtslegung läuft dort der erweiterte Probetrieb. Der Anlagenbauer hat das Konzept in sein Produktportfolio übernommen und bietet den chemisch-oxidativen Wäscher als kommerzielles Produkt an. Die Errichtung einer größeren Zahl weiterer Anlagen ist in Planung.

2. Inhaltliche Darstellung

2.1. Entwicklung optimierter Strategie und Parameter für den Wäscherbetrieb

Zwei Parameter der Waschflüssigkeit des chemischen Wäschers haben wesentlichen Einfluss auf die Abscheidung des im Roh-Biogas enthaltenen Schwefelwasserstoffes: pH-Wert und Redox-Potential. Der erstgenannte Parameter beeinflusst vor allem die Kinetik der Schwefelwasserstoffabsorption und wird primär durch die Zugabe von Natronlauge (NaOH) geregelt. Der zweite Parameter beeinflusst die Oxidation des im Wasser gelösten Schwefelwasserstoffes. Nur durch diese Reaktion und die damit verbundene Gleichgewichtsverschiebung im Absorptionsschritt kann weiterer Schwefelwasserstoff absorbiert werden. Das Redox-Potential wird durch die Zugabe von Wasserstoffperoxid (H_2O_2) erhöht.

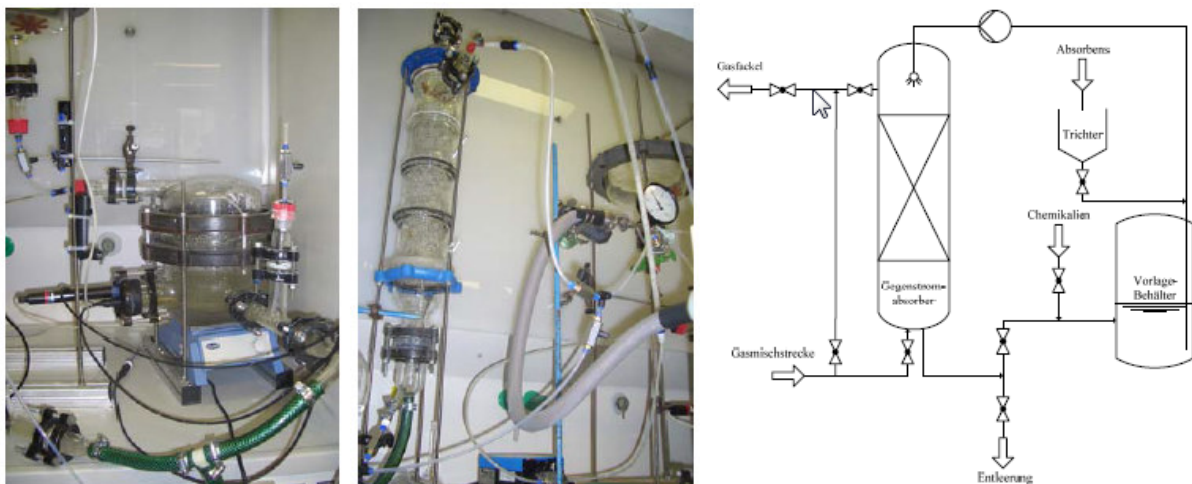


Abbildung 2: Fotodokumentation der im Labor durchgeführten Versuche: Vorlagebehälter (links), Berieselungskolonne (mitte) und Fließbild des Versuchsaufbaus (rechts)

Um die Abscheideleistung des untersuchten Entschwefelungssystems zu charakterisieren, wurde zunächst eine Anzahl von Laborversuchen durchgeführt. In einer Reihe von diskontinuierlichen und kontinuierlichen Versuchen wurden Prozessparameter wie Abscheideleistung und Chemikalienverbrauch unter Variation von pH-Wert und Redox-Potential ermittelt und ausgewertet. Für diese Versuche wurde synthetisches Biogas (Mischung der im Biogas enthaltenen wesentlichen Einzelkomponenten wie Methan, Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff) mittels Gasmischstrecke (Brooks Instruments) hergestellt und verwendet. Die Waschflüssigkeitsparameter pH-Wert, Redox- Potential und Temperatur wurden mittels Einstabmessketten (JUMO, tecLine) gemessen und im übergeordneten SPS-Messsystem erfasst und gespeichert. Die Gasanalyse erfolgte mittels Massenspektroskopie (Balzers OmniStar) in Verbindung mit einer speziell für diese Versuche entwickelten Messprozedur. Die Gasanalyse erlaubte die Messung der Komponenten Methan, Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff als auch die Kontrolle der weiteren Bestandteile Sauerstoff, Stickstoff und Argon. **Abbildung 2** zeigt eine Fotodokumentation und das Fließbild des kontinuierlichen Versuchsaufbaus. In diesem Arbeitspaket wurden im Wesentlichen die für den optimalen Wäscherbetrieb erforderlichen Betriebsparameter sowie deren Einfluss auf den Entschwefelungsgrad ermittelt.

Das Anlagenkonzept, wie es für die Implementierung der Anlage in Bruck an der Leitha herangezogen wurde, ist in **Abbildung 3** dargestellt.

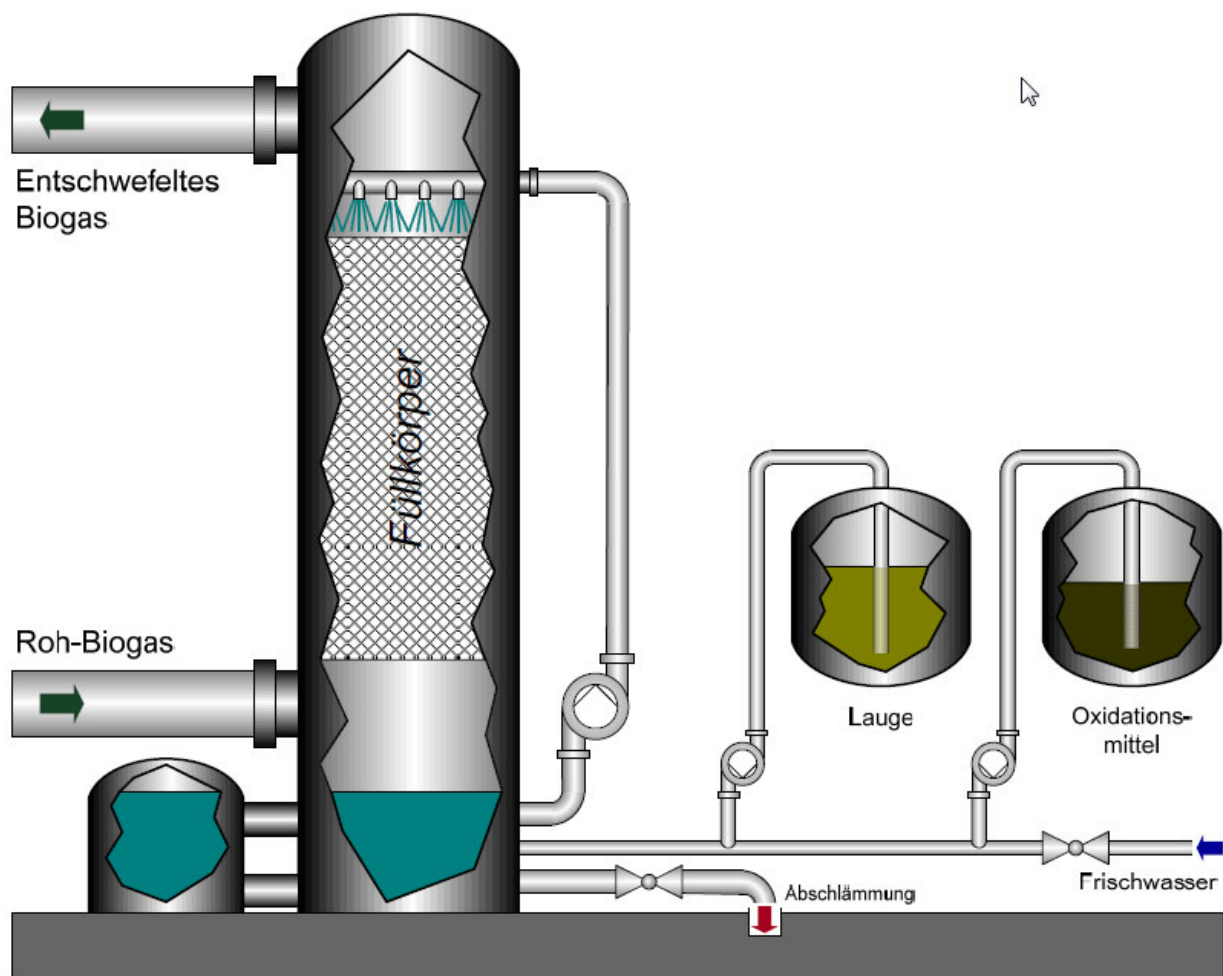


Abbildung 3: Anlagenkonzept des chemisch-oxidativen Wäschers in Bruck an der Leitha

Für die Regelung der Anlage wurden die Erfahrungen aus den Laborexperimenten sowie Ergebnisse aus einer dynamischen Simulation des Prozesses verwendet. Die Parameter der PID-Controller wurden basierend auf den experimentellen Ergebnissen sowie in Anlehnung an die Simulationsergebnisse vorab gewählt und im Anschluss an der realen Anlage in Bruck an der Leitha verfeinert und fixiert. Die Ablaufprozeduren für den Startvorgang, den Abstellvorgang sowie das NotStop-Programm wurden basierend auf dem Vorwissen des Anlagenbauers sowie der bisherigen Erfahrungen des Projektkonsortiums entwickelt und implementiert. Es ist damit eine voll funktionsfähige und geregelte Anlage im Einsatz.

2.2. Monitoring und Betrieb von Wäscher und Membranaufbereitungsanlage

Nach der Entwicklung des lokalen Automatisierungssystems für den chemisch-oxidativen Wäscher wurde dieses System über eine industrielle Profibus-Verbindung mit der Automatisierung der Gaspermeations-Biogasaufbereitungsanlage sowie mit der zentralen Leitstelle

verbunden. Dadurch konnten alle Messwerte und erfassten Anlagenparameter des Wäschers in das bestehende Datenerfassungssystem integriert werden, wo diese Daten in einer Datenbank gespeichert und gemeinsam mit allen bestehenden Daten ausgewertet werden können. Wesentliche Parameter, deren online-Messung nicht möglich oder wirtschaftlich wäre, wurden diskontinuierlich und offline per Hand gemessen und in die Datenbank nachgetragen.

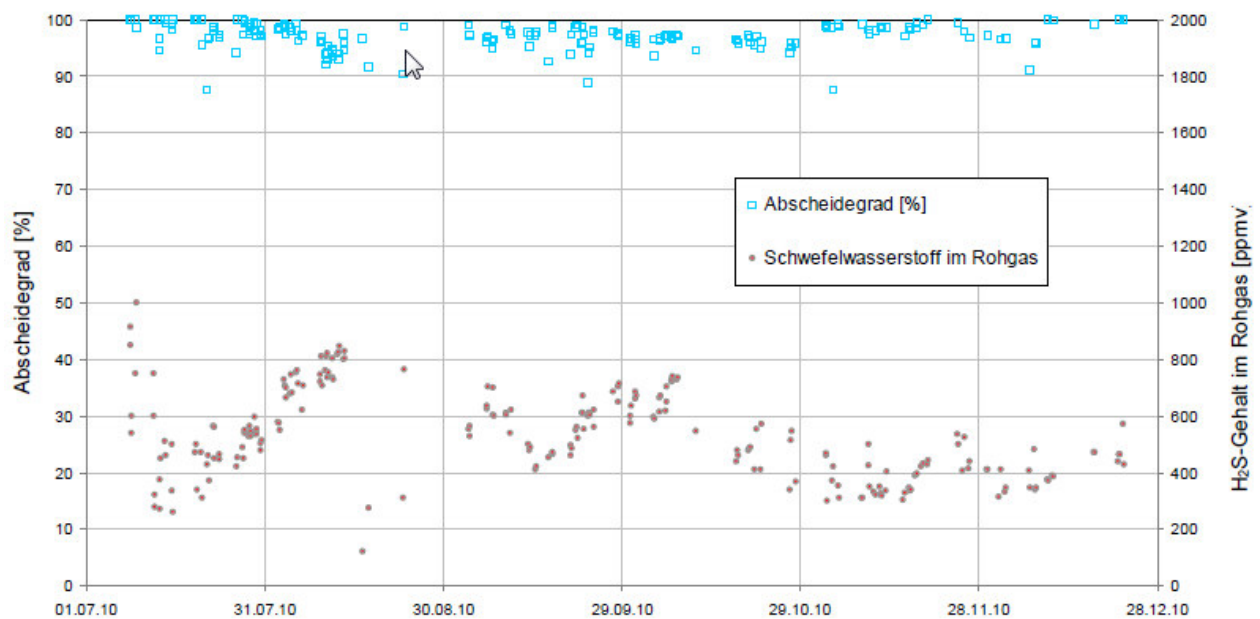


Abbildung 4: Abscheidegrad und Schwefelwasserstoffkonzentration im Rohbiogas für den chemisch-oxidativen Wäscher in Bruck an der Leitha

Der Abscheidegrad sowie der Chemikalienverbrauch sind relevante Prozessparameter für die Charakterisierung der Feldtauglichkeit und der Wirtschaftlichkeit des untersuchten Entschwefelungsprozesses. Die erzielte Effizienz der Schwefelwasserstoffabscheidung des Wäschers in Bruck an der Leitha ist in **Abbildung 4** dargestellt. Die Pilotanlage war bereits ohne abgeschlossene Optimierung prinzipiell in der Lage, über mehrere Monate einen Abscheidegrad von über 95% zu gewährleisten. Als sehr positiv zu bewerten ist auch die Tatsache, dass hohe Abscheidegrade auch bei relativ hohen Schwefelwasserstoff-Konzentrationen im Rohbiogas erreicht werden können. In Summe ist damit ein stabiler Betrieb des chemischen Wäschers bei gleichzeitiger ausgezeichneter Entschwefelungsleistung möglich. Selbst bei Eingangskonzentrationen bis 1500ppmv sind mit diesem System nun Reingaskonzentrationen von 30-50ppmv dauerhaft erreichbar.

2.3. Untersuchung des dynamischen Anlagenverhaltens des Wäschers

Im Laufe des Wäscherbetriebes konnte gezeigt werden, dass der Abscheidegrad des chemisch-oxidativen Wäschers relativ unempfindlich auf sprungartige Änderungen des Schwefelwasserstoffgehaltes im Rohbiogas ist. Dadurch ist gewährleistet, dass der Schwefelwasserstoffgehalt im Reingas im Bereich zwischen 5ppmv (bei niedrigen Rohgasgehalten von 400ppmv) und 50ppmv (bei hohen Rohgasgehalten von 1500ppmv) gehalten werden kann. Diese Werte sind für einen sicheren Betrieb der nachgeschalteten Gaspermeationsanlage ausreichend niedrig.

Um einen stabilen Betrieb der Anlage zu erreichen, muss die Regelung der maßgeblichen Betriebsbedingungen mit ausreichender Geschwindigkeit sichergestellt werden. Die Erfahrungen und Rückschlüsse, die aus dem dynamischen Verhalten der Wäscheranlage gezogen werden konnten, wurden in die Optimierung des Regelungssystems eingebracht, sodass mittlerweile das Gesamtsystem als im Wesentlichen fertig optimiert betrachtet werden kann.

2.4. Untersuchung der Auswirkungen des Wäschers auf die Membrananlage

Die Auswirkungen des Betriebes des chemisch-oxidativen Wäschers auf die Membrananlage werden laufend analysiert und ausgewertet. Die schrittweise Änderung betrieblicher und konstruktiver Details der Wäscheranlage zeigt wesentlichen Einfluss auf einen stabilen Betrieb der Gaspermeationsanlage.

Die Anordnung einer effektiven Tropfenabscheidung nach dem chemisch-oxidativen Wäscher stellt im Betrieb an der Pilotanlage Bruck/Leitha sicher, dass keine Salzfracht von der Wäscheranlage in die Gaspermeations-Biogasaufbereitungsanlage verschleppt werden kann. Der weitere Betrieb hat darüber hinaus gezeigt, dass die Wäscheranlage im Normalfall idealer Weise so gefahren wird, dass der H₂S-Gehalt im Wäscher-Reingas nahe zu oder unterhalb der Nachweisgrenze der eingesetzten Gasanalysengeräte liegt. Damit erhält die Membran-Gasaufbereitungsanlage ein nahezu schwefelfreies Rohgas, wodurch der dort angeordnete adsorptive Feinentschwefelungsapparat nur noch die Funktion eines „Polizeifilters“ wahrnimmt, bzw. den Schwefelwasserstoffgehalt weiter bis auf Bruchteile von ppm drückt. Dadurch wird die Standzeit des Adsorberbettes signifikant erhöht, das häufige und arbeitsaufwändige Wechseln des Adsorbensmaterials entfällt weitestgehend. Neben dem großen Vorteil den Abscheidegrad für Schwefelwasserstoff mit dem chemisch-oxidativen Wäscher durch Änderung der Betriebsparameter sehr einfach einstellen und regeln zu können, bringt die Anlage damit noch einen wesentlichen betrieblich-operativen Vorteil.

2.5. Adaptierung des Einsatzmanagements der Insitu- sowie der Feinentschwefelung

Die Umstellung des Einsatzmanagements und die Verteilung der Entschwefelungsleistung auf die einzelnen Entschwefelungsverfahren an der Biogasanlage Bruck/Leitha war für den Betreiber und die Bedienmannschaft eines der wesentlichsten Ergebnisse aus dem

abgeschlossenen Forschungsprojekt. Da diese Umstellung während des laufenden Normalbetriebes der Biogasanlage, der BHKWs zur Strom- und Fernwärmeerzeugung sowie der Biogasaufbereitungsanlage zur Biomethanherstellung erfolgen musste, wurde diese Umstellung mit Bedacht und schrittweise durchgeführt. Für das Anlagenkonglomerat in Bruck/Leitha scheint die momentane Betriebsweise die operativ sinnvollste Lösung zu sein. Generell ist zu sagen, dass durch die Implementierung der chemisch-oxidativen Wäscheranlage wesentliche Vorteile im Verfahrensportfolio der Biogasentschwefelung realisiert werden konnten. Mit der entwickelten Entschwefelungsmethode kann nun an der Biogasanlage innerhalb eines gewissen Spektrums von Randbedingungen die Entschwefelungsleistung und damit der Reingas-Schwefelwasserstoffgehalt in einfacher Weise geregelt werden. Diese Regelung erfolgt durch die Eingabe eines gewünschten Sollwertes, welcher nach einer definierten Zeit von der Regelung des Wäschersystems auch mit ausreichender Sicherheit und Genauigkeit durch Anpassung der wesentlichen Betriebsparameter erreicht werden kann. Dadurch hat das geschulte Bedienpersonal nun ein Werkzeug in der Hand, um sehr einfach, regelrecht auf Knopfdruck, auf etwaige signifikante Änderungen im Betrieb der Anlagen zu reagieren. Die Entschwefelung mit Metallsalzen direkt im Fermenter (insitu-Verfahren) kann diese Möglichkeit nicht bieten, die Zusammenhänge zwischen Rohsubstrat, Betriebsbedingungen, Chemikaliendosierung und Rohbiogaszusammensetzungen sind hierfür zu komplex und weitestgehend unbekannt. Lediglich auf eine wachsende Sammlung von Betriebserfahrungen kann in diesem Zusammenhang zurückgegriffen werden. Auch die Entschwefelung durch Adsorption an Eisenoxid kann in diesem Sinne nicht geregelt werden. Die Entschwefelungsleistung bleibt im Wesentlichen konstant, bis sich das verwendete Bettmaterial der vollen Beladung nähert. Dann beginnt der Durchbruch der Schadkomponente in das Reingas und es muss auf frisches Bettmaterial im Standby-Adsorber umgeschaltet werden. Ein gewisses Regelungspotential bietet zwar die ebenfalls am Standort Bruck/Leitha in Betrieb befindliche biologische Entschwefelung, welche jedoch aufgrund ihrer großen Trägheit bei der Reaktion auf die relativ sprunghaft auftretenden Änderungen in der Rohgaszusammensetzung und –menge wie bereits dargestellt für die Biogasaufbereitung zur Netzeinspeisung nicht geeignet ist. In diesem Spannungsfeld ist die Verfügbarkeit eines Verfahrens mit relativ sicherer und regelbarer Abscheideleistung für Schwefelwasserstoff aus Biogas von sehr großer Bedeutung.

Es ist zu erwarten, dass das Einsatzmanagement der Entschwefelungsverfahren, so wie es an der Anlage Bruck/Leitha nunmehr gefahren wird, bei anderen Biogasanlagen anders gestaffelt ist, insbesondere dann, wenn nicht alle genannten Entschwefelungsverfahren realisiert sind (hier ist die Biogasanlage Bruck/Leitha aufgrund der Forschungslastigkeit eine Ausnahme unter den österreichischen Biogasanlagen). Die genannten prinzipiellen Verhältnisse sowie die operativen Vorteile der hier entwickelten und dargestellten Verfahrensvariante mit chemisch-oxidativer Wäsche bleiben allerdings bestehen. Da Biogasanlagen aufgrund ihrer betrieblichen Umstände und des biogenen Substrates aber meistens durch einen gewissen Grad an Diskontinuität und verschiedensten Schwankungen geprägt sind, kann das vorgestellte Verfahren sicher vielfach seine Vorteile ausspielen und bei der Entschärfung vorhandener Problembereiche hilfreich sein. Ein Verfahren mit gewisser Flexibilität und Toleranz gegenüber schwankenden Eingangsparametern wird in den meisten dieser Fälle von Vorteil sein.

2.6. Modellbildung und Simulation

Zweck dieses Arbeitspaketes ist es, auf theoretischem Wege das dynamische Verhalten des chemisch-oxidativen Wäschers zu untersuchen. Basierend auf daraus gewonnenen Erfahrungen sollte ein Regelungssystem entwickelt werden, welches einen sicheren und stabilen Betrieb gewährleistet. Die Methodik inkludiert den Einsatz von Modellbildung und Computersimulation in enger Verbindung mit der Durchführung experimenteller Arbeiten mit der bereits beschriebenen Laborapparatur.

Vom Partner TU-Wien wurde ein Regelungskonzept entwickelt und untersucht, bei dem der Berieselungsgrad an die schwankende H_2S -Konzentration für die Regelung des Abscheidegrades angepasst wird. Um die Prozesstauglichkeit des Regelungskonzeptes zu bewerten, wurde ein parametrisches Modell entwickelt und Simulationen durchgeführt. Für die Entwicklung des Modells wurde eine Reihe von dynamischen Versuchen im Labor durchgeführt, damit die Parametrierung des Modells durchgeführt werden konnte. Während der Versuche wurden die restlichen Prozessvariablen konstant gehalten. Damit verblieben prinzipiell drei weitere Prozessvariablen, welche den Abscheidegrad des Wäschers definieren: Volumenstrom des Rohgases, H_2S -Konzentration im Rohgas und Berieselungsdichte (Volumenstrom der Waschflüssigkeit). Dieses Konzept ist links in **Abbildung 5** dargestellt.

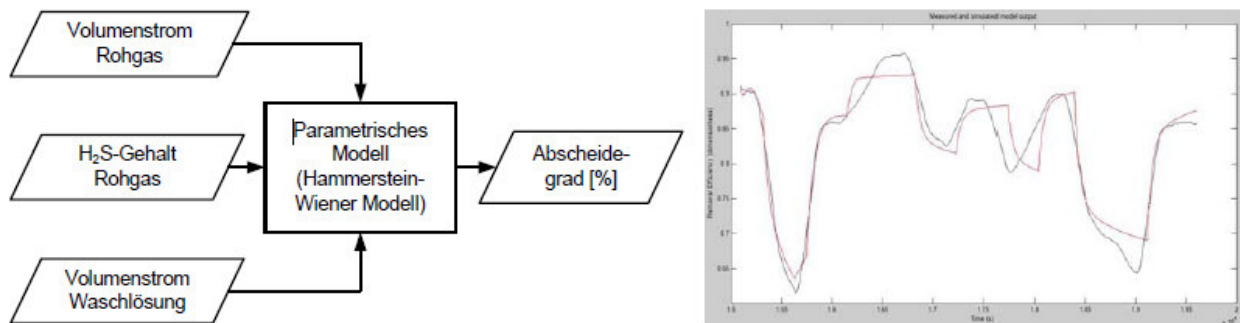


Abbildung 5: Modellierungskonzept für die dynamische Simulation und Auslegung der Regelung des chemisch-oxidativen Wäschers (links) und Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit der Simulation in einem dynamischen Versuch (rechts)

Für den Betrieb und auch für die Simulation des Wäschers können die ersten beiden Variablen als Störgrößen betrachtet werden, da diese zwei Parameter nicht durch das Regelungssystem beeinflusst werden können. Seitens des Regelungssystems kann nur die dritte Prozessvariable (der Berieselungsgrad) auf die sprunghaften Änderungen der Störgrößen angepasst werden um damit den erwünschten Abscheidegrad zu erzielen. Im Betrieb kann der Berieselungsgrad durch die Drehzahlregelung der Waschflüssigkeitspumpe verändert werden. Die rechte Seite von **Abbildung 5** zeigt den Vergleich zwischen

Ergebnissen der Simulation und des Experiments nach der korrekten Parametrierung des Modells. Der dynamische Vergleich inkludiert Variationen aller drei untersuchten Prozessvariablen. Wie zu sehen ist, sind die Simulationsergebnisse in guter Übereinstimmung mit dem Experiment.

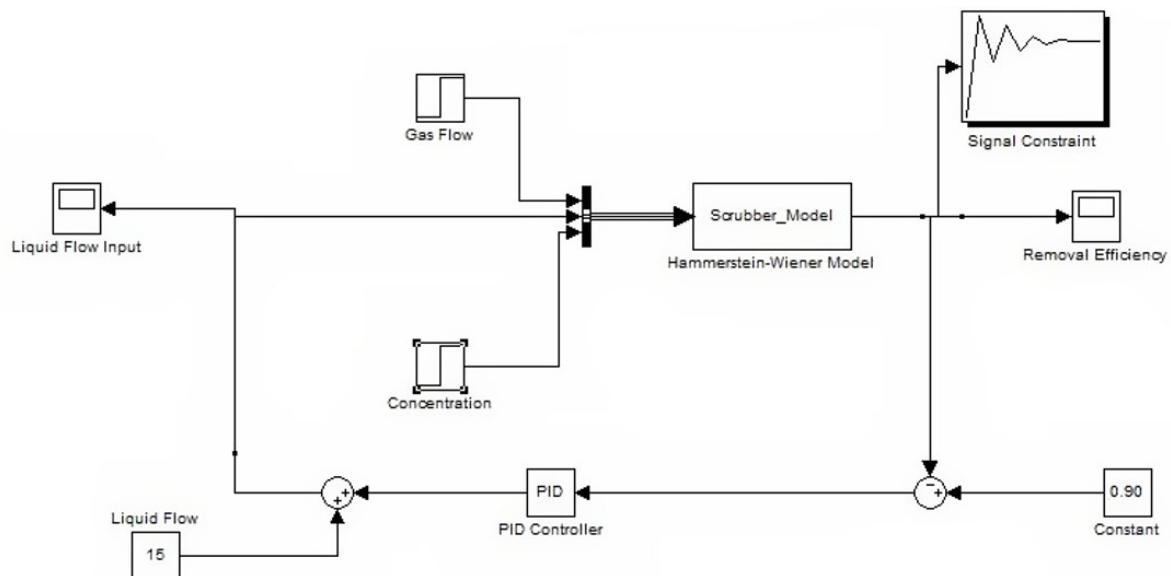


Abbildung 6: Konfiguration des dynamischen Modells des Gesamtsystems in der MATLABSimulink ®-Umgebung

Um das oben erwähnte Regelungskonzept zu testen und zu optimieren wurde eine dynamische Simulation eingesetzt. Die Kombination aus validiertem Modell und Regelungskonzept stellt ein Gesamtsystem dar, mit welchem das tatsächliche Verhalten einer realen Anlage simuliert werden kann. Ein solcher Ansatz erlaubt eine relativ schnelle und günstige Auslegung sowie ein Testen des Systems bei verschiedensten Bedingungen, was in einer realen Anlage in den meisten Fällen in dieser Art nicht möglich ist. **Abbildung 6** stellt den Aufbau des dynamischen Modells des Gesamtsystems dar. Das gesamte dynamische System besteht aus dem dynamischem Modell des Wäschers, den Quellen der erforderlichen Prozessparameter (H₂S-Konzentration, Rohgasvolumenstrom und Absorbensvolumenstrom) sowie dem PID-Regler. Im untersuchten System dienen H₂S-Konzentration und Rohgasvolumenstrom als Prozessparameter, die sich während des Betriebs des Wäschers verändern können und jeweils den Abscheidegrad beeinflussen. Erhöht sich die H₂S-Konzentration im Rohgas bzw. der Rohgasvolumenstrom, so wird sich der Abscheidegrad verringern. Berieselungsgrad bzw. Drehzahl der Berieselungspumpe ist eine Regelgröße, die gegen den Einfluss der H₂S-Konzentration und des Rohgasvolumenstroms agieren kann. Im Modell wird der Volumenstrom der Waschlösung durch einen PID-Regler angepasst. Der PID-Regler wird mit der Regelabweichung zwischen

dem Sollwert des Abscheidegrades und dem aus drei Prozessparametern resultierenden Abscheidegrad als Regelgröße beaufschlagt.

Um die Parameter des PID-Reglers auf eine möglichst schnelle Reglerantwort und möglichst geringen Overshoot auszulegen, wurde ein eigenes Optimierungsverfahren eingesetzt. Eine schnelle Antwort des Regelungssystems bringt die H₂S-Konzentration im Reingas bei einem sprunghaftem Anstieg im Rohgas rasch wieder auf den eingestellten Sollwert zurück, ein minimierter Overshoot verhindert die Überdosierung und dem daraus folgenden erhöhten Chemikalienverbrauch.

Abbildung 7 zeigt die zeitlichen Verläufe des Abscheidegrades im Prozess der allmählichen Optimierung des Regelverhaltens für eine sprunghafte Änderung des Rohgasvolumenstromes. Die ermittelten Regelparameter ergeben einen idealen Kompromiss zwischen schnellem Ausregelvorgang und minimalem Überschreiten des Sollwertes.

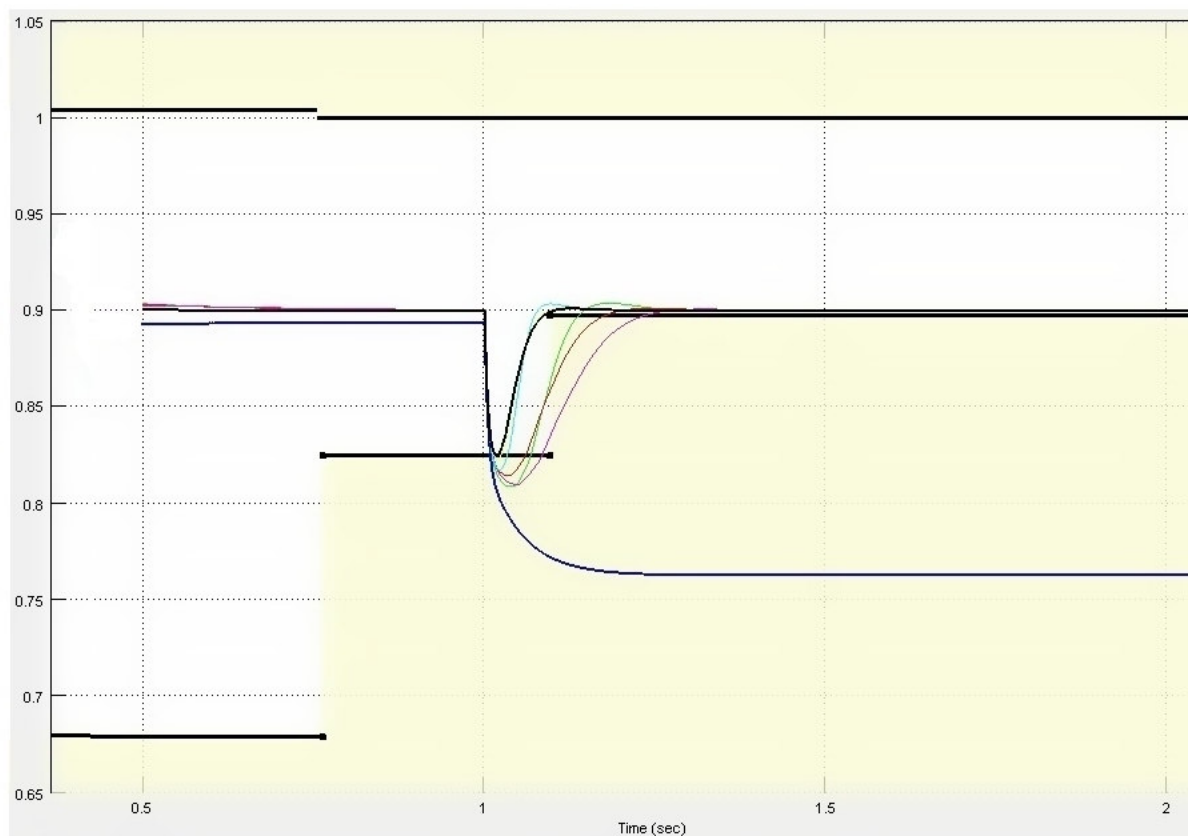


Abbildung 7: Verläufe des Abscheidegrades während der Optimierung der PID-Parameter

Das endgültige Verhalten des optimierten Regelungssystems ist in **Abbildung 8** dargestellt. Die Ergebnisse präsentieren das dynamische Verhalten des gesamten Systems bei einer sprunghaften Änderung des Rohgasvolumenstromes von 8 auf 10 [lN/min].

Parametersprünge von solchen Ausmaßen sind in tatsächlichen Prozessen zwar nicht zu erwarten, im Modell jedoch erlauben sie ein rigoroses Testen bei möglichst ungünstiger Art der Parametervariation. Das optimierte Verhalten des Reglers ist deutlich ersichtlich; nach etwa 500 Sekunden geht der Abscheidegrad ohne signifikantes Überschreiten auf den eingestellten Sollwert von 90% zurück.

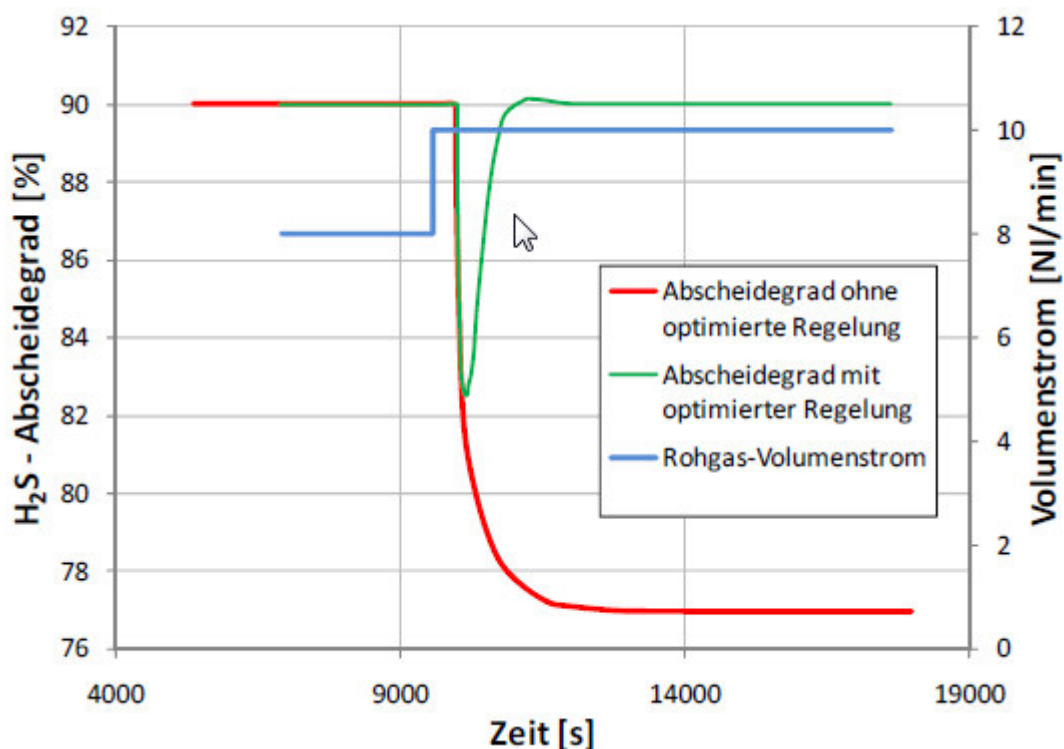


Abbildung 8: Vergleich eines Systems ohne Volumenstromregelung der Berieselungspumpe und eines System mit optimierter Regelung des Berieselungsgrades

Durch geeignete modelltheoretische Ansätze kann das Ergebnis für die kleine Laborapparatur auf die reale Großanlage mit 300 Nm³/h umgelegt werden. Damit ist die Auslegung der Reglereinstellungen an der realen Anlage mit relativ geringem Aufwand und geringem weiteren Optimierungsbedarf möglich.

2.7. Wirtschaftliche Betrachtung

Mit den im Projekt gesammelten Daten wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Ermittlung der spezifischen Entschwefelungskosten der neu entwickelten Methode sowie zur groben Abbildung eines Verfahrensvergleiches durchgeführt. Die Randbedingungen für die

wirtschaftliche Betrachtung wurden an die Verhältnisse des Anlagenbetriebes in Bruck/Leitha angepasst und setzen sich wie folgt zusammen:

- ☐ Rohbiogasvolumenstrom 180Nm³/h
- ☐ H₂S-Gehalt im Rohbiogas 1000ppm
- ☐ Jahresverfügbarkeit 95%
- ☐ Abschreibungsdauer der Investition 10 Jahre
- ☐ Jährliche Gasmenge 1.497.960m³

Unter diesen Voraussetzungen errechnen sich die spezifischen Entschwefelungskosten für den entwickelten chemisch-oxidativen Wäscher zu 0,0302€/m³ Biogas. Im Vergleich zu momentan kommerziell verfügbaren Alternativverfahren ergibt sich dabei eine Einsparung um bis zu 25%. Abschließend zeigen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung daher deutlich, dass die neu entwickelte Methode zur Biogasentschwefelung mittels chemisch-oxidativem Wäscher eine durchaus nennenswerte Verbesserung in der Rentabilität der Produktionskette bringen kann.

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projektes BiogasOxiSulf wurde ein effizienter und wirtschaftlicher Betrieb eines innovativen Entschwefelungsverfahrens für Biogas entwickelt und in die Realität umgesetzt. Die Idee zur Entwicklung des, auf einer chemisch-oxidativen Wäsche des Rohgases basierenden, Verfahrens wurde im Vorprojekt „Virtuelles Biogas“ geboren. In diesem Projekt wurde eine innovative Anlage zur Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität zur anschließenden Einspeisung in das lokale und regionale Erdgasnetz entwickelt, in Betrieb genommen und über mehrere Jahre hinweg betrieblich optimiert und wissenschaftliche betreut. Das Verfahren und die Anlage selbst sind eine vollständig österreichische Entwicklung, die Trennmethode beruht im Wesentlichen auf dem Membranverfahren Gaspermeation. Heute ist das Verfahren marktfähig und bei dem Anlagenbauer Axiom Angewandte Prozesstechnik GmbH kommerziell erhältlich. Während des Betriebes der Aufbereitungsanlage an der Biogasanlage Bruck/Leitha zeigte sich, dass trotz der Tatsache, dass dort bereits zwei unterschiedliche Entschwefelungsverfahren im Einsatz waren, die Entschwefelungsleistung für eine Erreichung der rigorosen H₂S-Grenzwerte zur Einspeisung in öffentliche Erdgasnetze nicht ausreichend waren. Einerseits gab es am Standort eine biologische Entschwefelung, welche zwar sehr kostengünstig auch hohe Entschwefelungsgrade zur Verfügung stehen konnte, aber bei starken Schwefelspitzen im Rohgas nur eine unzureichende Dynamik aufwies. Andererseits war eine Insitu-Entschwefelung direkt im Fermenter mit Metallsalzen im Einsatz, welche aber nur sehr begrenzt zu Regelungszwecken eingesetzt werden konnte. In der Gaspermeations-Biogasaufbereitungsanlage ist zur Feinentschwefelung zwar ein adsorptives Verfahren mit

Eisenoxid angeordnet, dieses ist allerdings für die beobachteten hohen Frachten nicht ausgelegt und vor allem nicht wirtschaftlich betreibbar gewesen. Da an der Biogasanlage stark schwankende Rohbiogasqualität hinsichtlich H_2S zu verzeichnen war, musste die Netzeinspeisung aufgrund fehlender effizienter und vor allem flexibler Entschwefelung unterbrochen werden. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, welches wirtschaftlich und vor allem mit hoher Ansprechdynamik auf schwankende Schwefelwasserstofffrachten einen hohen Abscheidegrad für H_2S zur Verfügung stellen sollte. Ein solches System würde nicht nur an der Anlage Bruck/Leitha, sondern bei zahlreichen anderen Biogasanlagen mit BHKWs oder mit Biogasaufbereitung einsetzbar sein und wesentliche Verbesserungen in wirtschaftlicher und betrieblicher Sicht bringen.

Die prinzipielle Machbarkeit des neuen Entschwefelungskonzeptes konnte mit einfachen experimentellen Untersuchungen im Labor (stationäre Gleichgewichtsversuche) bestätigt werden. Basierend auf diesen Ergebnissen und weiteren theoretischen Überlegungen konnte ein Prozess in industriellem Maßstab ($180\text{m}^3/\text{h}$ Biogas) dimensioniert, konstruiert und gebaut werden. Die Erstinbetriebnahme erfolgte noch im Rahmen des Projektes „Virtuelles Biogas“. Allerdings zeigte sich sehr rasch, dass eine wirtschaftliche und effiziente Entschwefelung nur mit entsprechend optimiertem Betrieb durchführbar ist, wodurch weitere Forschung erforderlich wurde. Diese wurde im abgelaufenen Projekt „BiogasOxiSulf“ durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.

Am Ende dieses Projekts steht somit eine neue Entschwefelungsmethode zur Verfügung, welche die bestehenden Verfahren in manchen Bereichen ergänzen kann, in wesentlichen Bereichen allerdings auch überlegen ist. Die Biogasentschwefelung mittels der entwickelten chemisch-oxidativen Wäsche zeichnet sich im Wesentlichen durch die folgenden Charakteristika aus:

- ☐ Gute Regelbarkeit des H_2S -Gehaltes im Reingas durch automatisierte Anpassung der wichtigen Prozessparameter, dadurch effizienter und wirtschaftlicher Einsatz der Chemikalien.
- ☐ Weitestgehende Automatisierung des Verfahrens, dadurch sehr geringer Personalaufwand für die Anlagenbetreuung notwendig.
- ☐ Hohe Ansprechdynamik auf Änderungen der Eingangsparameter, dadurch konstante Reingasqualität bei schwankendem Betrieb der Biogasanlage möglich. In dem typischerweise sehr dynamischen Umfeld der Biogaserzeugung resultiert die Vergleichsmäßigung des Schwefelwasserstoffgehaltes im gereinigten Biogas speziell für die Biogasaufbereitung zu Biomethan in signifikanten operativen Vorteilen.
- ☐ Hohe Wirtschaftlichkeit verglichen mit anderen Verfahren der Biogasentschwefelung.
- ☐ Auch durch akademische Forschung gut entwickeltes und dokumentiertes Verfahren aus österreichischer Produktion, welches durch ein österreichisches Unternehmen kommerziell genutzt wird.

Durch die Erfahrungen und das Know-how aller beteiligten Projektpartner erfolgte die Entwicklung des Verfahrens außerordentlich schnell. Von der Idee zur Erstinbetriebnahme verging ein Forschungsjahr, die Entwicklung des optimierten Betriebes dauerte lediglich ein weiteres Jahr. Von der Idee aus akademischem Umfeld zur industriellen Implementierung und kommerziellen Verfügbarkeit vergingen also nur knapp zwei Jahre Forschung und Entwicklung. Es konnte während dieser Zeit intensiv die vorhandene universitäre Infrastruktur für die Verfahrensentwicklung und Optimierung im Bereich der erneuerbaren Energien genutzt werden.

Es konnte im Rahmen dieses Projektes eine günstige und flexible Lösung für die gesamte Biogasbranche erarbeitet werden, welche sich durch niedrige Betriebskosten, hohe Flexibilität und geringen Betreuungsaufwand auszeichnet. Die Betriebskosten sind als Resultat der Forschung um etwa 25% niedriger als bei typischen vergleichbaren Methoden der Biogasentschwefelung.

Die zweite Anlage dieser Art wurde bereits während der Laufzeit des Projektes „BiogasOxiSulf“ durch die Firma Bionik Filtersysteme GmbH errichtet und in Betrieb genommen. Dies bestätigt die Attraktivität des Verfahrens sowie den vorhandenen Markt im Bereich der Biogastechnologie.

Das Projektteam geht davon aus, dass die heute üblicherweise bei Biogasanlagen eingesetzten Entschwefelungsmethoden vielfach die hohen Anforderungen der Biogasaufbereitung zur Netzeinspeisung nicht oder nur unzureichend erfüllen können. Die Aufbereitung von Rohbiogas zu Biomethan hat nämlich die inhärent instationäre und mit Schwankungen behaftete Produktion von Biogas mit den Anforderungen des Gasnetzes an ein konstantes und in der Qualität rigoros definiertes Produkt (Biomethan) zu überbrücken. Da die heute verfügbaren Biogasaufbereitungstechnologien (auch die Gaspermeation) zur effektiven Abtrennung von Kohlendioxid und Wasser weiterentwickelt worden sind, und das rohe Biogas aufgrund des eingesetzten Substrates mehr oder weniger Schwefelwasserstoff enthält, ergibt sich bei der Biogasaufbereitung zwangsläufig die Notwendigkeit einer effizienten und wirtschaftlichen Methode der Biogasentschwefelung.

Verschiedenste Quellen sagen einen intensiven Ausbau der Kapazitäten von Biogasproduktion, Biogasaufbereitung und Netzeinspeisung voraus. Alleine in Deutschland sind demnach bis 2018 bis zu 2000 neue Anlagen zu erwarten. Ein nennenswerter Teil der aufzubringenden Investitionssumme wird hierbei in die Gasaufbereitung und die Gasentschwefelung fließen, wodurch sich bereits in naher Zukunft ein großes Marktpotential für die entwickelte Technologie abzeichnet.

Der entwickelte Prozess wird bereits wie erwähnt durch die Firma Bionik Filtersysteme GmbH kommerziell angeboten. Aufgrund der gemeinsamen Entwicklung und der guten Ergänzung der beiden Verfahren zeichnet sich eine Kooperation zwischen Bionik Filtersysteme GmbH und Axiom Angewandte Prozesstechnik GmbH zur gemeinsamen Vermarktung von Gaspermeations- Biogasaufbereitung und chemisch-oxidativer Entschwefelung ab. Durch die synergetischen Effekte wird die Konkurrenzfähigkeit beider österreichischen Unternehmen maßgeblich gestärkt.

Durch die dargestellten operativen und wirtschaftlichen Vorteile, die das entwickelte Entschwefelungsverfahren bieten kann, können auch andere Biogasanlagen signifikant profitieren. Speziell die Verbesserung der ökonomischen Position könnte für eine große Zahl größerer und kleinerer Biogasanlagen von wesentlicher Bedeutung sein. Die Verfügbarkeit der chemisch-oxidativen Wäsche kann in weiterer Folge auch zu einer Weiterentwicklung anderer Verfahren zur Biogasentschwefelung hinsichtlich Kosten und betrieblichen Aufwandes führen. Neben dem Einsatz des entwickelten Verfahrens im Rahmen der Biogaserzeugung sieht das Projektteam auch noch ein mögliches Einsatzfeld im Bereich anderer methanreicher, biogener Gasaufbereitung, bei der Schwefelwasserstoff ein wichtiges Thema sein kann, beispielsweise die Aufbereitung von Vergasergas aus der Holzvergasung mit oder ohne nachfolgender Methanierung zur Erzeugung von Erdgas-Substitut aus Holz.

Das Projektteam plant weiterführende Arbeiten im Bereich der chemisch-oxidativen Wäsche hinsichtlich der Intensivierung des Verfahrens. Die physikalische Tatsache, dass die Absorption von Schwefelwasserstoff um Größenordnungen schneller erfolgt als die Absorption von Kohlendioxid (speziell bei höheren pH-Werten) kann dahingehend ausgenutzt werden, dass ein hochselektives Verfahren mit ausgesprochen kleinen Apparatedimensionen realisiert werden kann. Dadurch, sowie durch eine damit verbundene weitere Reduktion von Chemikalienbedarf und Stromverbrauch ist eine weitere Verbesserung der Wirtschaftlichkeit realisierbar.

4. Ausblick und Empfehlungen

Im Bereich der im vorliegenden Projekt entwickelten Technologie können und werden weitere Arbeiten im Bereich der Auswertung des realen Anlagenbetriebes erfolgen. Dadurch erwartet sich das Projektteam zwar nur untergeordnete Verbesserungen des Prozesses, jedoch umfangreiche zusätzliche Informationen über den Betrieb bei unterschiedlichsten Randbedingungen. Das gesammelte Datenmaterial kann dann zur Verfeinerung der Leistungsdaten und der wirtschaftlichen Beurteilung eingesetzt werden.

Das Projektteam plant weiterführende Arbeiten im Bereich der chemisch-oxidativen Wäsche hinsichtlich der Intensivierung des Verfahrens. Die physikalische Tatsache, dass die Absorption von Schwefelwasserstoff um Größenordnungen schneller erfolgt als die Absorption von Kohlendioxid (speziell bei höheren pH-Werten) kann dahingehend ausgenutzt werden, dass ein hochselektives Verfahren mit ausgesprochen kleinen Apparatedimensionen realisiert werden kann. Dadurch, sowie durch eine damit verbundene weitere Reduktion von Chemikalienbedarf und Stromverbrauch ist eine weitere Verbesserung der Wirtschaftlichkeit realisierbar.

5. Literaturverzeichnis

Folgende Veröffentlichungen sind im Laufe des Projekts „BiogasOxiSulf“ entstanden:

- „Untersuchungen zur chemisch-oxidativen Absorption von Schwefelwasserstoff aus Biogas“, von Jutta Krischan, TU-Wien, 2010.
- Darüber hinaus werden Teile dieser und weiterführender Arbeiten in einem wissenschaftlichen Journal publiziert. Dieser Artikel ist bereits im Reviewing-Prozess und wird unter dem Titel “Design and scale-up of an oxidative scrubbing process for the selective removal of hydrogen sulphide from biogas” im Journal „Separation and Purification Technologies“ erscheinen (Link zur Zeitschrift: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/13835866>).

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Lieferung und Aufbau des chemisch-oxidativen Wäschers an der Biogasanlage Bruck an der Leitha	3
Abbildung 2: Fotodokumentation der im Labor durchgeführten Versuche	5
Abbildung 3: Anlagenkonzept des chemisch-oxidativen Wäschers in Bruck an der Leitha	7
Abbildung 4: Abscheidegrad und Schwefelwasserstoffkonzentration im Rohbiogas für den chemisch-oxidativen Wäscher in Bruck an der Leitha	8
Abbildung 5: Modellierungskonzept für die dynamische Simulation und Auslegung der Regelung des chemisch-oxidativen Wäschers und Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit der Simulation in einem dynamischen Versuch	11
Abbildung 6: Konfiguration des dynamischen Modells des Gesamtsystems in der MATLABSimulink ®-Umgebung	12
Abbildung 7: Verläufe des Abscheidegrades während der Optimierung der PID-Parameter .	13
Abbildung 8: Vergleich eines Systems ohne Volumenstromregelung der Berieselungspumpe und eines System mit optimierter Regelung des Berieselungsgrades	14

IMPRESSUM

Verfasser

Biogas Bruck/Leitha GmbH & Co KG
Szallasweg 1, 2460 Bruck an der Leitha
Tel: +43 - (0)2162 68100 29
E-Mail: biogas@energiepark-bruck.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH