

Nutzung von Biogas in SOFCs – Versuche zur Schwefelwasserstoffentfernung aus Gasgemischen im Labormaßstab

Anja Gerbeth, Alexander Stoll, Bernhard Gemende, Helga Stemmler, Gunter Krautheim,
Helmut Eichert, Matthias Jahn, Peggy Hädrich, Gunter Buschner

1 Einleitung

Die Erzeugung elektrischer Energie aus Bio-, Klär- und Deponiegas ist Stand der Technik. Zum Einsatz kommen dabei zum überwiegenden Teil Motoren (i. d. R. Gas-Otto- oder Zündstrahlmotoren), seltener auch Mikro-Gasturbinen. Problematisch ist jedoch häufig die Erstellung von Konzepten zur ganzjährigen Nutzung der anfallenden Überschusswärme, da der Gesamtanlagenwirkungsgrad andernfalls unakzeptabel niedrig ausfällt (der elektrische Wirkungsgrad liegt bei Einsatz von Motoren bei lediglich 30 % bis 40 % [FNR, 2005]). Ansätze dazu sind die Kraft-Wärme-Kopplung (Nutzung der Überschusswärme zur Erzeugung von Warmwasser, zur Gebäudeheizung, im Fermentationsprozess etc.) sowie – in den letzten Jahren vermehrt – die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (zusätzliches Betreiben einer Sorptionskältemaschine). Ein weiteres Problemfeld bei derartigen Anlagen stellt die Reinigung der Abgase der Verbrennungskraftmaschinen dar – insbesondere da die Abgaszusammensetzung (Anteil Stickoxide, Schwefeldioxid, Ruß, Formaldehyd usw.) von den Ausgangsstoffen der Gaserzeugung sowie dem Prozesszustand abhängig ist und daher teilweise stark schwankt. Der Einsatz von Katalysatoren (3-Wege-Katalysator, SCR) wird durch die Notwendigkeit der an diese Umstände angepassten Regelung sowie durch im Gas vorhandene Spurenkomponenten, die als Katalysatorgifte wirken, erheblich erschwert.

In den vergangenen Jahren wird als weitere Nutzungsvariante für Biogas zunehmend die Einspeisung in das Erdgasnetz diskutiert. Dieser Prozess ist jedoch mit erheblichem Aufwand im Bereich der Gasaufbereitung verbunden. Neben der Notwendigkeit der Entfernung von bestimmten Spurengaskomponenten (z. B. H₂S) ist zudem die Methananreicherung, d. h. die Abtrennung des Kohlendioxids (Anteile je nach Herkunft z. T. über 50 Vol.-%) aus dem Gas, notwendig.

Eine weitere Alternative zur Nutzung des Biogases stellt der Einsatz von Brennstoffzellen zur Erzeugung elektrischer Energie dar. Aufgrund ihres Aufbaus, der eingesetzten Materialien und ihrer Wirkungsweise eignen sich insbesondere Festoxid-Brennstoffzellen (SOFCs – Solid Oxid Fuel Cells) für derartige Anwendungsfälle. Trotz der wesentlich höheren Toleranz von SOFCs im Bezug auf Störgaskomponenten im Vergleich zu anderen Brennstoffzellentypen ist allerdings auch bei diesen eine Reinigung des Gases vor dem Einsatz als Brenngas zwingend notwendig. Erste Untersuchungen dazu, durchgeführt an der Westsächsischen Hochschule sowie dem Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme – insbesondere zur Schwefelwasserstoffentfernung durch Adsorptionsverfahren im Labormaßstab – werden im Folgenden vorgestellt.

2 Grundlagen

2.1 Zusammensetzung von Biogas

Biogas ist ein Gasgemisch, das beim anaeroben biologischen Abbau von organischen Substraten entsteht. Der Abbauprozess läuft mehrstufig ab; es sind mehrere Mikroorganismengruppen daran beteiligt.

Biogas besteht im Wesentlichen aus Methan und Kohlendioxid in unterschiedlichem Verhältnis. Weitere Bestandteile sind Stickstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff sowie diverse Gase in Spurenkonzentrationen.

Die Gaszusammensetzung ist abhängig von den eingesetzten Substraten sowie den sonstigen Prozessparametern (u. a. Temperatur, Raumbelastung, Verweilzeit des Substrates im Fermenter). Eine Übersicht über die typischen Wertebereiche und die Schwankungsbreiten gibt Tab. 1.

Tab. 1: Zusammensetzung von Biogas (Werte entnommen aus [IFE, 2004], [BAYLFU, 2004], [KALTSCHMITT & HARTMANN, 2004], [FNR, 2005])

Bestandteil	Konzentration	
	Schwankungsbreite	typischer Wertebereich
Methan	45...80 Vol.-%	50...60 Vol.-%
Kohlendioxid	20...80 Vol.-%	35...45 Vol.-%
Stickstoff	0...5 Vol.-%	2...3 Vol.-%
Wasserstoff	0...2 Vol.-%	ca. 1 Vol.-%
Wasserdampf	(2...7 Vol.-%)*	*
Sauerstoff	0...5 Vol.-%**	ca. 1 Vol.-%
Schwefelwasserstoff	0...3 Vol.-%	1.000...5.000 ppm
Ammoniak	0...100 ppm	50 ppm
Siloxane	0...50 mg/m ³	0 ppm***
Mercaptane	0...0,1 mg/m ³	< 0,1 mg/m ³
Carbonylsulfid (COS)	0...3 ppm	ca. 1 ppm
Chloride	0...0,1 mg/m ³	< 0,1 mg/m ³
Fluoride	0...0,1 mg/m ³	< 0,1 mg/m ³
aromatische Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid	in Spuren	

* Biogas verlässt den Fermenter im Normalfall wasserdampfgesättigt, d. h. der Wassergehalt ist abhängig von der Temperatur des Gases.

** Sauerstoff ist im Normalfall nur bei Einsatz biologischer Entschwefelungsverfahren direkt im Fermenter im Gas enthalten.

*** Siloxane kommen in der Natur üblicherweise nicht vor. Sie treten in Biogas nur dann auf, wenn eine Co-Vergärung von Industrieabfällen erfolgt. Siloxane kommen allerdings, z. T. auch in höheren Gehalten, in Deponie- und Klärgas vor.

2.2 Prinzipieller Aufbau von SOFCs

Prinzipiell existieren zwei verschiedene Typen von SOFCs: Man unterscheidet zwischen dem planaren Bautyp, der auch bei anderen Brennstoffzellentypen angewandt wird, und der tubularen Bauweise. Am IKTS werden planare Brennstoffzellenstacks entwickelt und eingesetzt.

Die typischen Betriebstemperaturen von SOFCs liegen zwischen 800 °C und 1.000 °C, weshalb häufig auch von Hochtemperatur-Brennstoffzellen gesprochen wird.

Der elektrochemisch aktive Teil einer SOFC ist ein keramischer Verbund aus drei Schichten. In Abb. 1 ist eine solche Einzelzelle sowie die darin stattfindenden Reaktionen dargestellt.

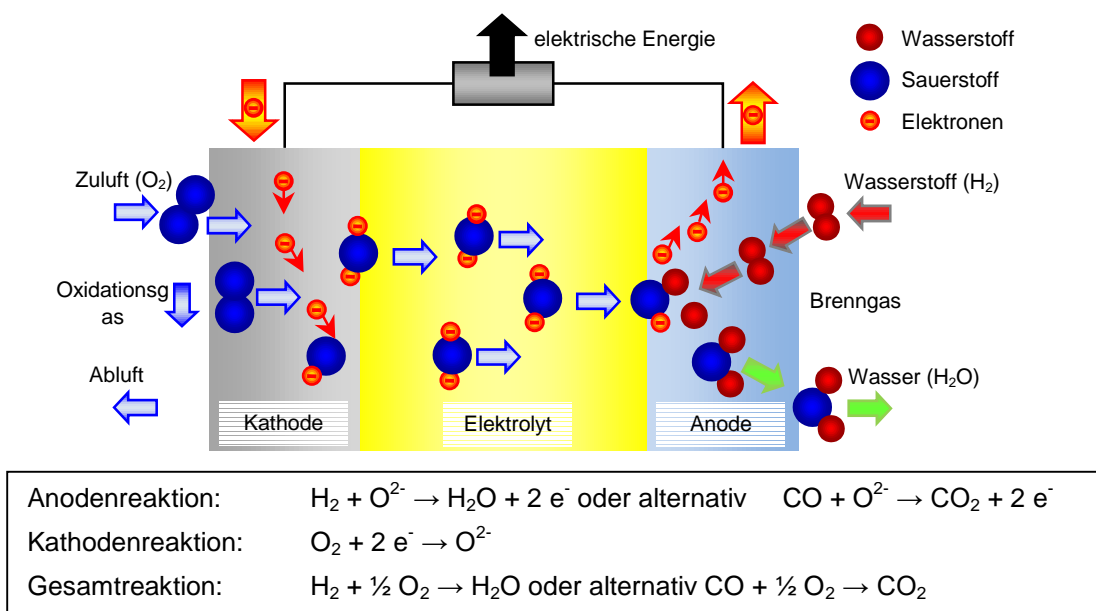


Abb. 1: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Reaktionen in einer SOFC (nach [www.IWE.UNI-KARLSRUHE.DE, 2008])

Bereits Nernst fand in seinen Studien an der Universität Göttingen heraus, dass stabilisiertes Zirkoniumoxid (dotiert mit Calcium, Magnesium oder Yttrium) bei Raumtemperatur die Eigenschaften eines Isolators, bei Temperaturen von 600 °C bis 1.000 °C die eines Ionenleiters und die eines Mischleiters (sowohl elektronisch als auch ionisch) bei einer Temperatur von ca. 1.500 °C besitzt. Damit war das Elektolytmaterial für die SOFC entdeckt.

Der in heutigen SOFCs am häufigsten verwendete Elektrolyt besteht aus einer mit Yttriumoxid (Y_2O_3) stabilisierten Zirkoniumoxidkeramik (YSZ). Vorteile dieses Materials sind die Verfügbarkeit, die chemische Stabilität und die nicht-toxischen Eigenschaften.

Während früher nahezu ausschließlich Platin als Elektrodenmaterial genutzt wurde, führte der Zwang zur Kostensenkung zur Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien. Als Kathode werden heute in SOFCs Oxide mit Halbleitereigenschaften – wie Lanthan-dotierte Cobalt- und Manganverbindungen – verwendet. Für die Anoden kommen so genannte Cermets zum Einsatz. Das eigentliche Anodenmaterial Nickel wird dabei mit YSZ gemischt, um Probleme der Haftung und des Unterschieds in den Ausdehnungskoeffizienten der reinen Materialien zu vermeiden.

Die Einzelzellen werden über so genannte bipolare Platten, welche auch als Interconnectoren bezeichnet werden, zu Stacks verschaltet. Die bipolaren Platten besitzen Gaskanäle, in denen das Brenngas bzw. das Oxidationsgas an die Elektroden herangeführt wird. Sie bestehen aus Lanthanverbindungen (für Betriebstemperaturen um 1.000 °C) oder speziellen Metalllegierungen (für niedrigere Betriebstemperaturen). [www.DOITPOMS.AC.UK, 2008]

2.3 Anforderungen an die Brenngasqualität in SOFCs

Der große Vorteil von SOFCs ist, dass für ihren Betrieb eine Vielzahl von Brenngasen eingesetzt werden kann. Zudem sind die Anforderungen an die Brenngasqualität bei SOFCs wesentlich niedriger als bei anderen Brennstoffzellentypen. Diese sind in Tab. 2 im Vergleich zu denen von PEFCs (Polymer Electrolyte Fuel Cell, Polymermembran-Brennstoffzelle) und MCFCs (Molten Carbon Fuel Cell, Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle) zusammengefasst.

Tab. 2: Anforderungen an die Gasqualität für unterschiedliche Brennstoffzellentypen ([STELTER, 2007])

Brennstoffzellentyp	PEFC	SOFC	MCFC
Gaskomponente	Toleranzgrenze		
Partikel	staubfrei	< 1 mg/m ³ i.N.; < 1 µm	< 1 mg/m ³ i.N.; < 1 µm
Teer	0,00 Vol.-%	zum Teil Brenngas	
NaCl	k. A.	< 1 ppmv	1...10 ppmv
KCl	k. A.		< 0,1 ppmv
HCl	k. A.		< 0,01 ppmv
HF	k. A.		< 0,1 ppmv
H ₂ S, COS	< 0,1 ppmv		
CO	10...100 ppmv	Brenngas	
N ₂	< 5 Vol. %	inert	
CO ₂	< 5 Vol. %	inert	

Im Hinblick auf die Verwendung von Biogas als Brenngas stellt insbesondere der in diesem in teils erheblichen Konzentrationen vorhandene Schwefelwasserstoff ein Problem dar (vgl. Tab. 1).

In aktuellen Untersuchungen am IKTS wird verifiziert, ab welchen Konzentrationen eine Verminderung der Leistung bzw. eine Schädigung der Brennstoffzelle eintritt. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand kann davon ausgegangen werden, dass es bereits ab einer Konzentration von ca. 2 ppm zu einem Absenken der Zellspannung kommt. Ab ca. 4 ppm werden die Beeinträchtigungen irreversibel.

Eine Entfernung des Schwefelwasserstoffs vor Einleitung des Brenngases in die SOFC ist damit in jedem Fall zwingend notwendig.

3 Material und Methoden

In der Praxis wird eine Vielzahl von Verfahren zur Minderung des Schwefelwasserstoffanteils in Biogas eingesetzt. Zu nennen sind dabei zunächst die biologische Entschwefelung durch Mikroorganismen, die sowohl fermenterintern als auch extern betrieben werden kann, sowie die Unterdrückung der Bildung bzw. Freisetzung des Schwefelwasserstoffes durch Zugabe von flüssigen Reagenzien oder Feststoffen, die zur Bildung schwerlöslicher Schwefelverbindungen und damit zu einer Bindung im Gärrest führen.

Bei den eigentlichen Gasreinigungsverfahren kann im Wesentlichen zwischen Absorptionsverfahren (Gaswäsche) und Adsorptionsverfahren (trockene Gasreinigungsverfahren) unterschieden werden. Diese werden in der Regel fermenterextern durchgeführt.

Die im Folgenden dargestellten Versuche konzentrieren sich auf die Testung unterschiedlicher Adsorbentien zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Gasen im Labormaßstab. Sowohl an der WHZ als auch am IKTS wurden entsprechende Versuchsanlagen aufgebaut (vgl. Abb. 2). Zunächst verwendet wurden synthetische Gasgemische (Schwefelwasserstoff in Stickstoff, synthetische Luft). Für die dargestellten Versuche kam ein Gasgemisch mit einem Schwefelwasserstoffgehalt von 1.000 ppm zum Einsatz.

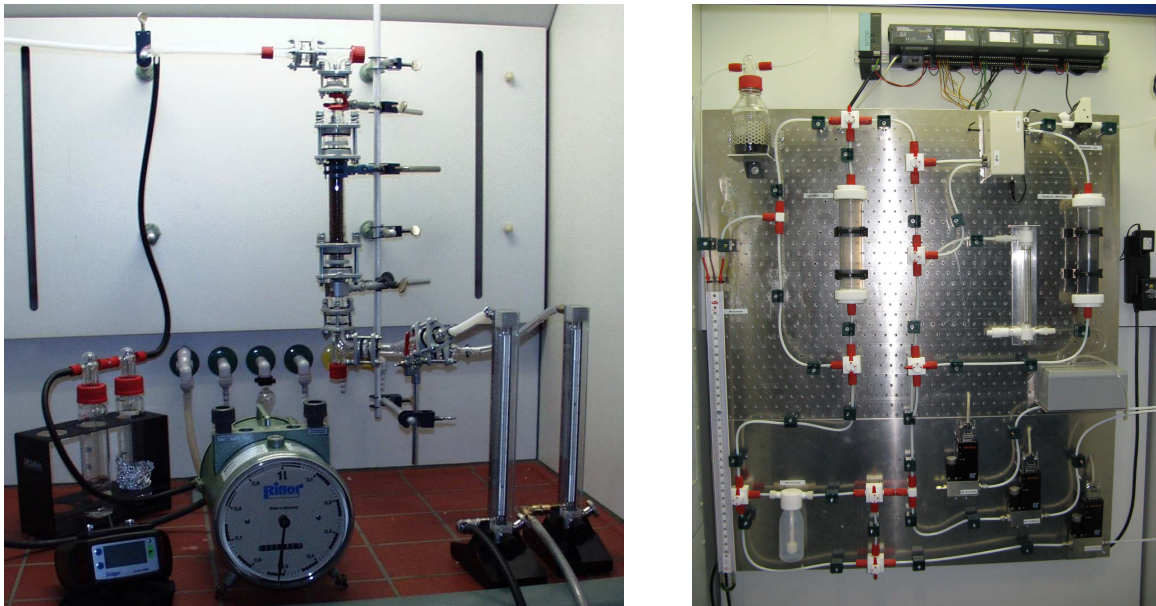


Abb. 2: Laborversuchsanlagen zur Schwefelwasserstoffentfernung (links: WHZ, rechts: IKTS)

Der Aufbau der Anlagen ist dabei analog (vgl. Abb. 3). Sie unterscheiden sich im Wesentlichen nur in der Art der Gasdosierung sowie geringfügig in der Größe der eigentlichen Adsorberkolonne (Durchmesser 25 mm bzw. 50 mm). Bei der Auswahl der zu verwendenden Materialien wurden die korrosiven Eigenschaften von H_2S beachtet. Hauptsächlich eingesetzt wurden Bauteile aus Glas und PTFE sowie Viton bzw. Edelstahl.

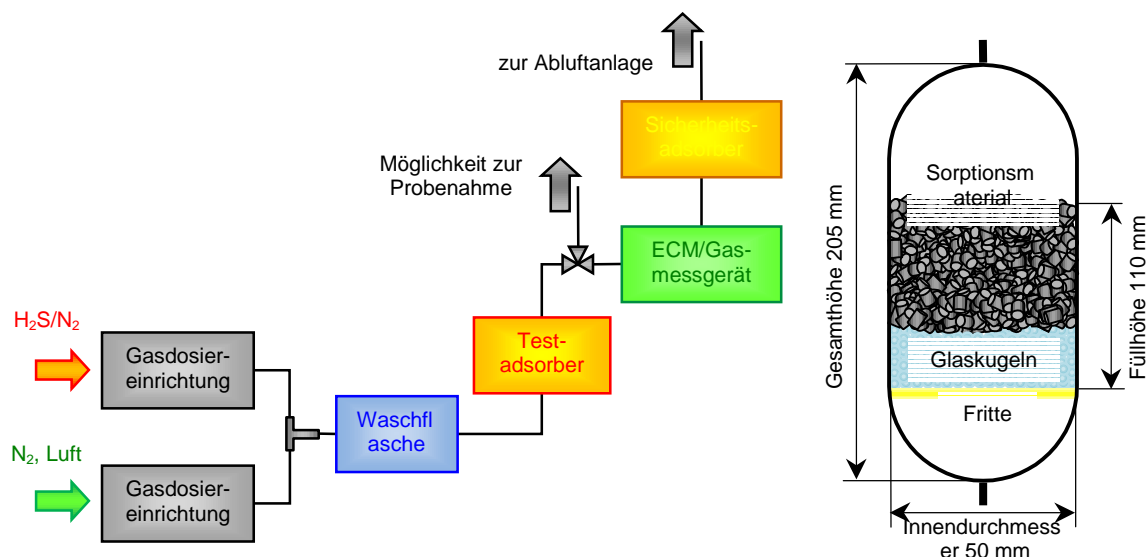


Abb. 3: Blockschaltbild der Laborversuchsanlagen zur Gasreinigung sowie Detailschema der am IKTS verwendeten Adsorberkolonne (rechts)

Die Mischung und Dosierung des Gases erfolgt über Schwebekörperdurchflussmesser bzw. MassFlow-Controller. Optional befindet sich vor dem Adsorber eine Waschflasche für die Befeuchtung des Rohgasgemisches. In der eigentlichen Adsorberkolonne befindet sich eine Glas- bzw. PTFE-Fritte, auf der zunächst eine Schüttung aus Glaskugeln, die zur Vergleichmäßigung der Strömung dient, und darüber die Schüttung des Adsorbens aufgebracht sind. Die Restkonzentration des Schwefelwasserstoffs nach dem Adsorber wird mittels elektrochemischen Messzellen (ECM) bestimmt. Bei der Versuchsanlage der WHZ ist zusätzlich ein Anschluss zur Probenahme für die nasschemische Bestimmung niedriger Schwefelwasserstoffkonzentrationen mittels Methylenblau-Impingerverfahren vorgesehen. Danach wird das Gasgemisch in einen Sicherheitsadsorber geleitet, bevor es der zentralen Abluftanlage zugeführt wird.

Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgt mittels eines im Messgerät Dräger X-am 7000 integrierten Datenspeichers bzw. über das auch zur Steuerung des Versuchsstandes am IKTS eingesetzten Programm LabView („Fieldpoint-Module“ zur Verarbeitung der analogen Ein- und Ausgangssignale).

Während der Versuche werden zusätzlich der Umgebungsdruck und die Umgebungstemperatur erfasst.

4 Ergebnisse und Diskussion

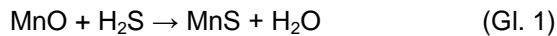
Im Folgenden werden die Ergebnisse erster Versuche mit zwei unterschiedlichen Adsorbentien – durchgeführt am IKTS – vorgestellt. Dargestellt sind die so genannten Durchbruchkurven, d. h. die H_2S -Konzentration am Kolonnenaustritt in Abhängigkeit von der Zeit (unter der Bedingung des konstanten Volumenstromes, damit des Durchflussvolumens).

4.1 Einfluss des Sauerstoffanteils im Rohgas bei der Adsorption von Schwefelwasserstoff an dotierter Aktivkohle

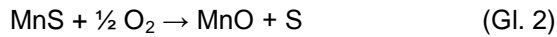
Zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas werden häufig dotierte Aktivkohlen eingesetzt. Der zugrunde liegende Mechanismus ist dabei meist eine katalytische Oxidation des an der Aktivkohleoberfläche adsorbierten Schwefelwasserstoffes. Typische Dotierungen sind Kaliumiodid, Natrium- oder Kaliumcarbonat und Kaliumpermanganat (vgl. dazu u. a. [HENNING & SCHÄFER, 1993], [FNR, 2006], [XIAO ET AL., 2008]).

Ebenfalls zur Schwefelwasserstoffentfernung aus Gasgemischen eingesetzt werden mit Erdalkalihydroxiden (KOH, NaOH) sowie mit Metallsalzen imprägnierte bzw. mit Metallionen dotierte Aktivkohlen (siehe dazu z. B. [GUO ET AL., 2007], [HUANG ET AL., 2006]; [DE 10 2006 025 450 A1; 2006]).

Im Folgenden werden die Ergebnisse von Versuchen unter Einsatz mit Manganoxid modifizierter Aktivkohle vorgestellt. Die Adsorption erfolgt an den inneren Poren der Aktivkohle. Schwefelwasserstoff reagiert mit dem Manganoxid zu Mangansulfid und Wasser (vgl. Gl. 1).



Die Kohle kann bereits während des Prozesses durch die Reaktion mit Sauerstoff partiell regeneriert werden (vgl. Gl. 2). Der dabei entstehende elementare Schwefel wird in den Poren der Aktivkohle eingelagert. Ist deren Aufnahmekapazität erschöpft, muss das Adsorbens ausgetauscht werden.



Der Einfluss der Sauerstoffkonzentration im Rohgas auf den Adsorptionsprozess wurde untersucht. Einzelheiten zu den Versuchsbedingungen können Tab. 3 entnommen werden. Die entsprechenden Durchbruchkurven sind in Abb. 4 dargestellt.

Tab. 3: Versuchsbedingungen bei der Untersuchung des Einflusses der Sauerstoffkonzentration im Gasgemisch auf die H₂S-Adsorption an MnO-dotierter Aktivkohle [JAHN ET AL., 2008]

Temperatur	25 °C
Druck	ca. 1.013 mbar
Masse Adsorbens	20 g
Schüttdichte des Adsorbens	400 g/l
Volumenströme am Eintritt	Schwefelwasserstoff (in Stickstoff): 83,3 ml/min Stickstoff bzw. Luft: 750 ml/min (bei dem Versuch mit Sauerstoffzufuhr wurde Stickstoff durch Luft ersetzt – die Sauerstoffkonzentration des Gasgemisches beträgt 20,9 %)
Eintrittskonzentration des H ₂ S	1.000 ppm

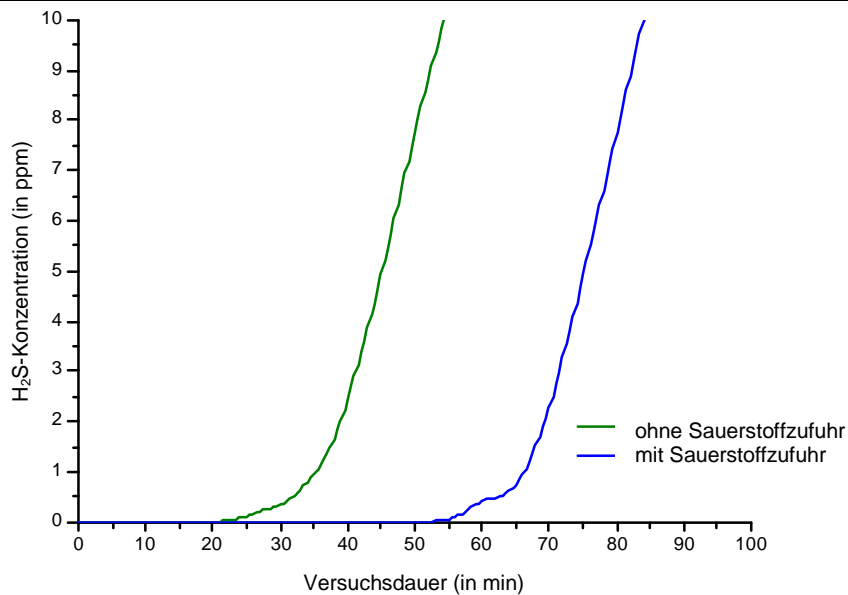


Abb. 4: Durchbruchkurven für MnO-dotierte Aktivkohle bei unterschiedlichem Sauerstoffgehalt im Rohgas [JAHN ET AL., 2008]

In dem Versuch ohne Sauerstoffzumischung wurde eine Zeit von 21 min bis zum Beginn des Durchbruchs ermittelt. Dies entspricht einer Beladung von 1 g Schwefelwasserstoff je Kilogramm Kohle.

Durch die Zumischung des Sauerstoffs wird die Zeit bis zum Beginn des Durchbruchs auf 52 min verlängert. Das entspricht mehr als der 2,5-fachen Beladung (ca. 2,6 g Schwefelwasserstoff je Kilogramm Kohle).

4.2 Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Versuchsergebnissen für die Adsorption von Schwefelwasserstoff am Katalysator V1841

Für den Katalysator V1841 der Firma BASF wurde untersucht, in wie fern Ergebnisse von unter gleichen Bedingungen durchgeführten Versuchen reproduzierbar sind. Das Material besteht aus Kupferoxid, Zinkoxid und Zirkoniumdioxid.

Die in Abb. 5 dargestellten Durchbruchkurven wurden an zwei unterschiedlichen Tagen aufgenommen. Die Versuchsbedingungen waren bei beiden Versuchen gleich (vgl. Tab. 4).

Tab. 4: Versuchsbedingungen bei der Untersuchung zur Reproduzierbarkeit der H₂S-Adsorption am BASF-Katalysator V1841 [JAHN ET AL., 2008]

Temperatur	25 °C
Druck	1.013 mbar
Masse Adsorbens	20 g
Schüttdichte des Adsorbens	1.333 g/l
Volumenströme am Eintritt	Schwefelwasserstoff (in Stickstoff): 10 l/h Stickstoff: 90 l/h
Eintrittskonzentration des H ₂ S	1.000 ppm

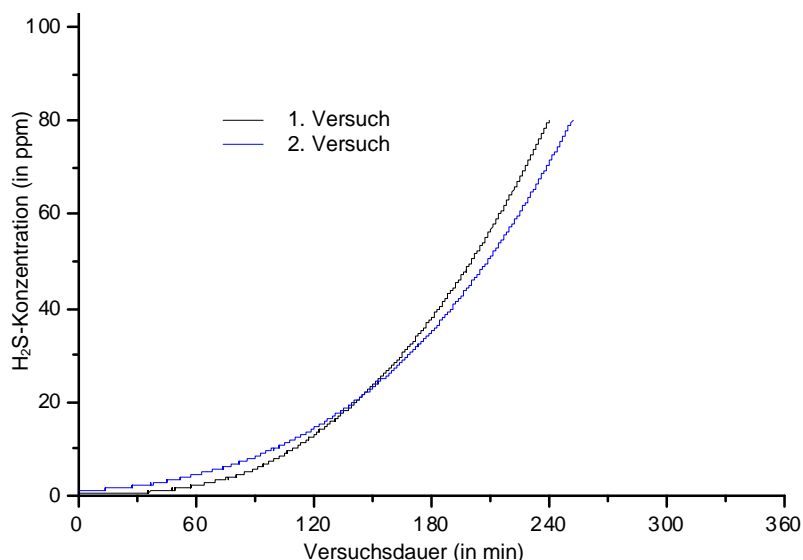


Abb. 5: Durchbruchkurven für BASF-Katalysator V1841 [JAHN ET AL., 2008]

Die beiden Kurven zeigen eine gute Übereinstimmung – es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Versuchsergebnisse reproduzierbar sind.

In Versuch 1 wurde eine Durchbruchzeit von ca. 35 min ermittelt. Dies entspricht einer Beladung von ca. 3,3 g Schwefelwasserstoff je Kilogramm Adsorbens bis zum Beginn des Durchbruchs.

Auffallend ist bei der Kurve aus Versuch 2, dass bereits zu Beginn eine von Null verschiedene Anfangskonzentration Schwefelwasserstoff nach der Kolonne vorliegt. Dies lässt auf einen Schlupf, vermutlich bedingt durch eine Gassenbildung in einer ungleichmäßigen Packung, schließen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Publikation vorgestellt wurden der Aufbau der Versuchsanlagen im Labormaßstab sowie die Ergebnisse erster Versuche zur Schwefelwasserstoffadsorption an ausgewählten Sorbenzien. Gegenwärtig durchgeführt wird ein umfassendes Screening von Sorptionsmaterialien – neben den genannten u. a. eisenhaltige Adsorptionsmasse und weitere, unterschiedlich dotierte Aktivkohlepellets bzw. -schäume – unter Variation der Prozessbedingungen (Gasfeuchte, Sauerstoffkonzentration im Rohgas, Volumenstrom und Verweilzeit im Adsorber, Temperatur etc.). Parallel dazu werden Methoden zur Bestimmung von sehr niedrigen

Schwefelwasserstoffkonzentrationen (unter 1 ppm) erprobt und validiert (darunter das bereits genannte Methylenblau-Impingerverfahren, colorimetrische Verfahren sowie die gaschromatographische Bestimmung mittels PFP-Detektor).

Am IKTS werden zudem die Brennstoffzellenstacks und -systeme weiterentwickelt und an den Einsatz von Biogas sowie ähnlichen Brenngasen angepasst. Erste Feldversuche zum Einsatz der SOFCs zur Verwertung von Klärgas sind für Mitte dieses Jahres in einer sächsischen Kläranlage geplant. Nach weiterer Qualifizierung und Anpassung der Technik sind in den Folgemonaten prinzipielle Tests und Vorversuche im Nebenstrom einer Biogasanlage vorgesehen.

6 Danksagung

Die beschriebenen Arbeiten sind Bestandteil des mit Mitteln des Sächsischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst (SMWK) geförderten Projektes „Betrieb von Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) mit Biogas“ (Aktenzeichen 4-7531.60-02-5160-07/1).

Unser besonderer Dank gilt den MitarbeiterInnen des Fraunhofer Instituts für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) für die Durchführung von Versuchen, die Bereitstellung des Datenmaterials sowie für die Anregungen und die ständige Diskussionsbereitschaft sowie den MitarbeiterInnen des Fachbereiches Physikalische Technik/Informatik der Westsächsischen Hochschule für Ihre Unterstützung bei der Lösung analytischer Fragestellungen.

7 Literatur

- BAYLFU – BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (HRSG.): Biogashandbuch Bayern – Materialienband. Augsburg: LfU-Onlineveröffentlichung, Dezember 2004.
- DE 10 2006 025 450 A1: Mit Metallsalzen dotierte katalytisch aktive Formaktivkohlen und deren Verwendung. Offenlegungsschrift, Veröffentlichungsdatum 06.12.2007.
- FNR – FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (HRSG.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow, 2005.
- FNR – FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (HRSG.): Studie – Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz. Leipzig, 2006.
- GUO, J., LUO, Y.; LUA, A. C.; CHI, R.; CHEN, Y.; BAO, X.; XIANG, S.: Adsorption of hydrogen sulphide (H₂S) by activated carbons derived from oil-palm shell. Carbon **45** (2007) 330-336.
- HENNING, K.-D.; SCHÄFER, S.: Impregnated activated carbon for environmental protection. Gas Separation & Purification **7** (1993) 235-240.
- HUANG, C.-C.; CHEN, C.-H.; CHUA, S.-M.: Effect of moisture on H₂S adsorption by copper impregnated activated carbon. Journal of Hazardous Materials **B136** (2006) 866-873.
- INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT (HRSG.): Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebauter Biomasse – eine technische, ökologische und ökonomische Analyse. Endbericht (Kurzfassung) zum DBU-Projekt 15071, Leipzig, März 2004.
- JAHN, M.; BREITE, M.; HÄDRICH, P.; RICHTER, S.: Zwischenbericht des IKTS zum Projekt „Biogasentschwefelung“. Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme, Dresden, April 2008.
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg, New York etc.: Springer, 2004.
- STELTER, M.: persönliche Mitteilung (E-Mail), Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme, 23.01.2007.
- WWW.DOITPOMS.AC.UK: Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge (Teaching and Learning Packages – Fuel Cells); Stand 20.07.2008.
- WWW.IWE.UNI-KARLSRUHE.DE: Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik, Universität Karlsruhe (Hochtemperatur-Brennstoffzelle SOFC); Stand 20.07.2008.
- XIAO, Y.; WANG, S.; WU, D.; YUAN, Q.: Catalytic oxidation of hydrogen sulfide over unmodified and impregnated activated carbon. Separation and Purification Technology **59** (2008) 326-332.

8 Adressen der Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Anja Gerbeth, Dipl.-Ing. (FH) Alexander Stoll, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Gemende, Dipl.-Ing. (FH) Helga Stemmler, Prof. Dr. rer. nat. habil. Gunter Krautheim
Fachbereich Physikalische Technik/Informatik
Prof. Dr.-Ing. Helmut Eichert
Fachbereich Maschinenbau und Kraftfahrzeugtechnik
Westfälische Hochschule Zwickau
Postfach 201037, D-08012 Zwickau
Telefon: +49-375/536-1787 (1501); Fax: 1503; E-Mail: bernhard.gemende@fh-zwickau.de

Dr.-Ing. Matthias Jahn, Peggy Hädrich
Abteilung Mikro- und Energiesysteme (Arbeitsgruppe Mobile Energiesysteme)
Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)
Winterbergstraße 28, D-01277 Dresden
Telefon: +49-351/2553-535; Fax: +49-351/2554-301; E-Mail: matthias.jahn@ikts.fraunhofer.de

Dipl.-Chem. Gunter Buschner
Biogasanlage Zobes/Entsorgungs- und Aufbereitungs-GmbH
Mechelgrüner Str. 12, D-08541 Neuensalz
Telefon: +49-3741/41-3123, Fax: 3093, E-Mail: Gunter.Buschner@tele2.de