

Vergleichende Testung unterschiedlicher Adsorbentien zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Gasgemischen vor deren Einsatz als Brenngas in Hochtemperaturbrennstoffzellen

Anja Gerbeth, Bernhard Gemende, Helmut Eichert, Gunter Krautheim, Sindy Röhlig, Matthias Jahn, Peggy Hädrich, Gunter Buschner

1 Einleitung

Der Einsatz von Festoxidbrennstoffzellen (SOFCs) zur kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme oder als Alternative zu Verbrennungskraftmaschinen ist eine in den letzten Jahren – im Zuge der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse auf diesem Gebiet, insbesondere aber aufgrund der inzwischen kommerziellen Verfügbarkeit derartiger Systeme – verstärkt diskutierte technische Lösung. Als prinzipielle Einsatzmöglichkeiten werden dabei die Varianten des mobilen Einsatzes, z. B. als APUs in Fahrzeugen sowie die Entwicklung von stationären Systemen unterschiedlicher Leistungsklassen – zwischen ca. 1 kW elektrischer Leistung im Bereich der Hausenergieversorgung bis mehrere 10 kW für Generatoren und die industrielle Stromerzeugung – gegenübergestellt.

Eine Kopplung der SOFC-Technologie mit dem Einsatz alternativer, aus regenerativen Quellen gewonnener Brenngase bietet eine vielversprechende Möglichkeit zur Minderung des Einsatzes fossiler Brennstoffe. Allerdings enthalten Gasgemische wie Bio-, Klär- und Deponiegas einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an störenden Begleitstoffen, die die nachgelagerten Systemkomponenten teils erheblich schädigen können und daher entfernt werden müssen.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Westsächsischen Hochschule Zwickau (WHZ) und des Fraunhofer Instituts für Keramische Technologien und Systeme, Dresden (IKTS) wurden Aspekte des Einsatzes von Hochtemperaturbrennstoffzellen mit Biogas als Brenngas untersucht. Ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen zur Gasreinigung werden im Folgenden vorgestellt.

2 Stand der Technik und Grundlagen

2.1 Stand der Entwicklung und kommerziellen Verbreitung der SOFC-Technologie

In Deutschland existieren mittlerweile einige Forschungsinstitute und Firmen, die sich mit der Systementwicklung, der Herstellung von Materialien und Komponenten von SOFC-Systemen sowie der Entwicklung und Testung von marktreifen Lösungen, u. a. für die Hausenergieversorgung und den Einsatz im Kraftfahrzeug, beschäftigen. Beispielfähig zu nennen sind dabei, neben dem Fraunhofer IKTS und dem Forschungszentrum Jülich, die Staxera GmbH (gegründet durch die Webasto AG und die H.C. Starck GmbH), die bereits seit 2005 SOFC-Stacks kommerziell herstellt und vertreibt, die Elring-Klinger AG, die ebenso SOFC-Komponenten und komplette Stacks fertigt, die CeramTec AG, die keramische Halbzeuge bis hin zu SOFC-Zellen liefert, Siemens Power Generation mit einem SOFC-Kommerzialisierungsprogramm auf dem Sektor stationärer Systeme mit höheren Leistungen (geplant sind die SOFC-200-Anlagen mit einer elektrischen Nennleistung von 125 kW), die Firma J. Eberspächer GmbH, deren Geschäftsfeld u. a. im Standheizungsbau liegt und die Vaillant Gruppe, die sich verstärkt in der Entwicklung von Hausenergieversorgungssystemen unter Nutzung von SOFC engagiert. Einen guten Überblick über das aktuelle Geschehen auf dem deutschen und internationalen Markt lieferte das BMWi-Statusseminar „HT-PEMFC und SOFC – Stand der Forschung und Handlungsbedarf für die Zukunft“, das am 21.-22.01.2009 stattfand (s. dazu u. a. [WWW.NKJ-PTJ.DE, 2009]).

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet Brennstoffzellentechnologie – insbesondere im Bereich SOFC – spiegelt sich auch in einer Vielzahl von Fördervorhaben wider. Beispiele hierfür sind die Projekte ENSA (Entwicklung Nebenaggregate SOFCAPU), ZeuS III (Zellen- und Stackentwicklung für planare SOFC), das EU-Förderprojekt Real-SOFC (Realising Reliable, Durable Energy Efficient and Cost Effective SOFC Systems) sowie das Vorhaben callux (deutschlandweit größter Praxistest von Brennstoffzellenheizgeräten für das Eigenheim), neben einer großen Anzahl weiterer, durch den Bund sowie die Landesressorts geförderter Einzel- und Verbundvorhaben.

Auch das weltweite Interesse an dieser Technologie ist steigend. Zentren der internationalen Entwicklung und Produktion von SOFC liegen insbesondere in Japan und den USA.

2.2 Einsatz von Biogas als Brenngas für SOFC-Brennstoffzellen

Als Biogas wird ein Gasgemisch bezeichnet, das durch mikrobielle Biozönosen beim anaeroben Abbau organischer Kohlenstoffverbindungen gebildet wird.

Je nach der Herkunft wird unterschieden in Biogas im engeren Sinne, gebildet bei der Vergärung von flüssigen und festen tierischen Exkrementen (Gülle und Mist), Abprodukten und Abfällen aus der Lebensmittel- und sonstigen Industrie, des Gastättengewerbes und von Einzelhaushalten sowie pflanzlichen/nachwachsenden Rohstoffen (NAWARO), Klärgas, das bei der Vergärung von Klärschlämmen entsteht und Deponiegas, das in Deponiekörpern mit signifikanten organischen Restbestandteilen gebildet wird.

Es handelt sich im Wesentlichen um ein Gemisch aus Methan und Kohlendioxid in unterschiedlichen Anteilen. Das Verhältnis zwischen diesen Bestandteilen sowie die sonstigen enthaltenen NebenkompONENTEN sind abhängig vom eingesetzten Substrat. Während bei Klärgas eher höhere Anteile an Siloxanen als in Biogas zu erwarten sind, sind in Deponiegas in der Regel ein höherer Inertgasanteil sowie ggf. Halogenverbindungen (HCl, HF) zu erwarten. Allen Gasen biogenen Ursprungs ist jedoch gemein, dass sie einen mehr oder minder großen Anteil Schwefelwasserstoff enthalten. Der typische Konzentrationsbereich liegt dabei zwischen 1.000 und 5.000 ppm. (Für detaillierte Zusammensetzungsangaben für Biogas vgl. u. a. [IFE, 2004], [BAYLFU, 2004], [KALTSCHMITT & HARTMANN, 2004], [FNR, 2005].)

Der Vorteil von SOFCs im Vergleich zu anderen, insbesondere Niedertemperaturbrennstoffzellen, liegt in der wesentlich größeren Toleranz gegenüber Verunreinigungen im Brenngas. So dient z. B. CO, das bei Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen Katalysatoren schädigt, in SOFC als Brenngas und kann den Wirkungsgrad positiv beeinflussen [OTT & TAMM, 2003]. Die Toleranz gegenüber schwefelhaltigen Komponenten ist für Festoxidbrennstoffzellen ebenso höher als bei anderen Brennstoffzellentypen.

Durch das IKTS wurden umfangreiche Versuchsreihen zur Charakterisierung der Schwefelwasserstoffvergiftung von SOFC-Zellen durchgeführt, mit dem Ziel, die Wirkmechanismen des Schwefels an unterschiedlichen Elektroden aufzuklären und zuverlässige Grenzwerte für schwefelhaltige Verbindungen im Brenngas festlegen zu können. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte u. a. nachgewiesen werden, dass bei unterschiedlichen Anodenmaterialien (Ni/ZrO₂- und Ni/CeO₂-haltige Materialien) und sonstigen Randbedingungen (z. B. Wasserdampfgehalte der Gase) verschiedene Toleranzgrenzen und unterschiedliche Reversibilitäten der Schädigungen zu verzeichnen sind. Zusammenfassend musste allerdings festgestellt werden, dass die Anoden durch hohe Schwefelwasserstoffkonzentrationen irreversibel geschädigt werden. Merkliche Abfälle der Betriebsspannungen, die zudem bei zyklischer Belastung nicht vollständig reversibel waren, traten bei bestimmten Anodenmaterialien bereits ab einer Schwefelwasserstoffkonzentration von ca. 2 ppm auf. [KAVURUCU SCHUBERT & KUSNEZOFF, 2009]. Eine Entschwefelung des Biogases vor dessen Einsatz als Brenngas in der SOFC ist daher unbedingt notwendig.

2.3 Entschwefelung von Biogas

Für die Entfernung von schwefelhaltigen Komponenten – im Speziellen Schwefelwasserstoff – gibt es eine Vielzahl etablierter Verfahren. Eine Übersicht dazu gibt Abb. 1.

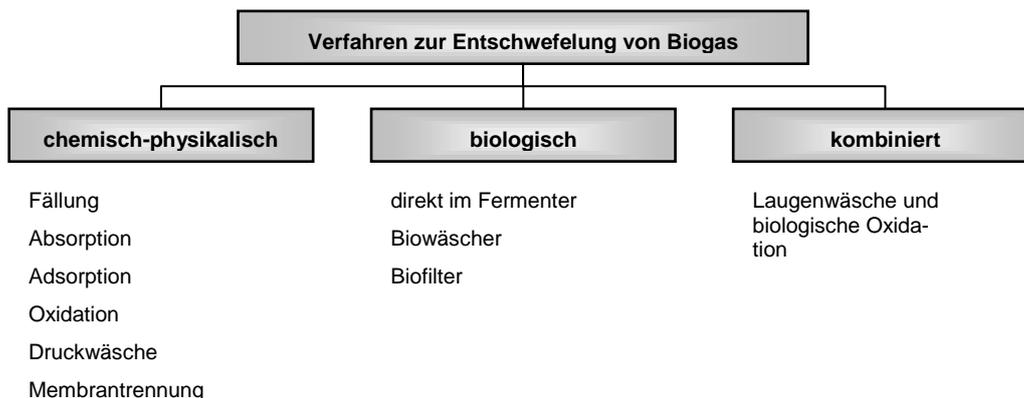


Abb. 1: Verfahren zur Entschwefelung von Biogas [BAYLFU, 2004]

Zusätzlich kann bei einer Vielzahl von Verfahren nochmals nach Anwendungsort, d. h. direkt im Fermenter oder in einer externen, nachgeschalteten Einheit, unterschieden werden.

Die so genannte biologische Entschwefelung – in der Regel durch Einblasen von geringen Anteilen Sauerstoff in den Fermenter – ist das gegenwärtig am häufigsten angewendete Verfahren zur Minde-

zung der Schwefelwasserstoffgehalte in Biogas. Allerdings sind die Restgehalte stark abhängig von den sonstigen Betriebsverhältnissen und noch relativ hoch. Bei optimaler Verfahrensführung werden Werte unter 70 ppmv Schwefelwasserstoff bei fermenterinternen Verfahren bzw. kleiner 10 ppmv bei Einsatz von nachgeschalteten biologischen Wäschern erreicht. [HOHENWARTER ET AL., 2006]

Für die Feinreinigung des Biogases (Restgehalte von H_2S unter 1 ppmv) werden in der Regel Biogaswäschen (Absorption), meist jedoch adsorptive Verfahren eingesetzt. Typische Adsorbenzien sind dabei eisenhaltige Sorptionsmassen oder dotierte Aktivkohlen, wobei sich die höchsten Reinigungsgrade mit den letzteren erreichen lassen und zudem weitere störende Gasbestandteile abgetrennt werden können.

3 Material und Methoden

Mit dem Ziel der Ermittlung der Eigenschaften unterschiedlicher Adsorbenzien sowie der Festlegung optimaler Verfahrensparameter vor einer späteren Maßstabsübertragung wurden umfangreiche Versuche zur Entfernung von Schwefelwasserstoff im Labormaßstab durchgeführt. Verwendet wurden dabei synthetische Gasgemische mit Luft bzw. Stickstoff als Trägergas sowie einem Schwefelwasserstoffanteil von nominell 1.000 Mol-ppm. Diese wurden teils mit Druckluft oder Stickstoff verdünnt und der in Abb. 2 dargestellten Versuchsanlage zugeführt.

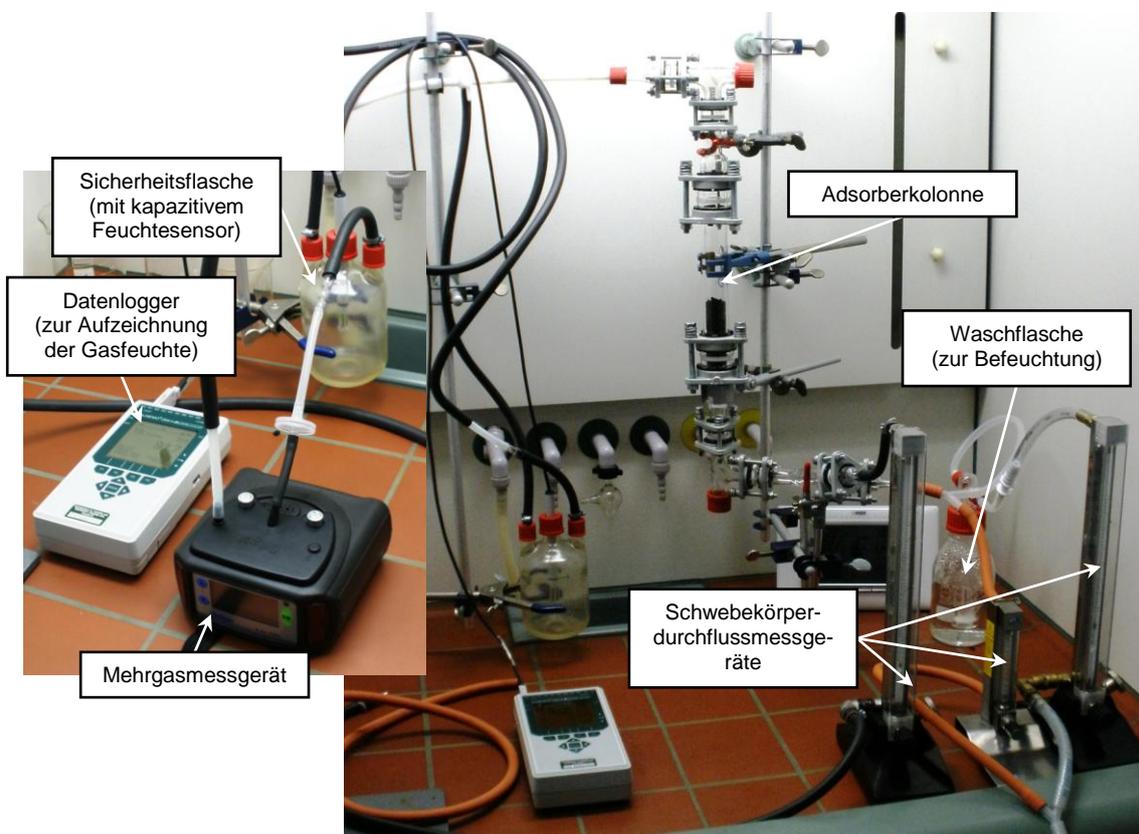


Abb. 2: Versuchsanlage im Labormaßstab zur Testung unterschiedlicher Adsorbenzien für die Entschwefelung

Die Messung der Gasvolumenströme erfolgte mittels mehrerer Schwebekörperdurchflussmesser. Optional konnte ein Teil des Verdünnungsgasstromes befeuchtet werden. Nach Passieren der Adsorberkolonne (Durchmesser 25 mm, Betthöhe Adsorbens zwischen 0,04 und 0,12 m) wurde die Restkonzentration des Gases an Schwefelwasserstoff mittels einer elektrochemischen Messzelle (Mehrgasmessgerät Dräger X-am 7000) sowie die Feuchte des Reingases mittels eines an einen Datenlogger Almemo 2890-9 (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH) angeschlossenen kapazitiven Feuchtesensors kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet. Umgebungsdruck und -temperatur wurden erfasst und zur Umrechnung der Gasparameter auf Normbedingungen herangezogen.

Bei den Versuchen wurden die folgenden Parameter und Randbedingungen variiert:

- Gesamteingangsvolumenstrom des Gases (Anströmgeschwindigkeit am Adsorbens)
- Schwefelwasserstoffkonzentration im Rohgas (Verschiebung des Reaktionsgleichgewichtes)
- Adsorbensbetthöhe (Untersuchung des Einflusses von Randgängigkeiten etc.)

- Sauerstoff- und Wassergehalt im Rohgas (Einflussnahme auf die chemischen Reaktionen insbesondere an den dotierten und imprägnierten Kohlen sowie dem eisenhaltigen Adsorbens)

Tab. 1 gibt einen Überblick über die Hersteller, Spezifikationen und Eigenschaften einer Auswahl der getesteten Adsorbentien.

Tab. 1: Übersicht über die Daten ausgewählter getesteter Adsorbentien

Bezeichnung Adsorbens	Hersteller/ Lieferant	Spezifikation/ Zusammensetzung	Korndurchmesser	Dichte	Wassergehalt im Originalzustand
Silcarbon SC 40	Silcarbon Aktivkohle GmbH	Aktivkohle, nicht modifiziert	4 mm	(450 ± 25) kg/m ^{3**}	ca. 6 Ma.-%
Desorex K 43 J	Donau Carbon GmbH	Aktivkohle (Basis Steinkohle), imprägniert mit Kaliumiodid (ca. 2 Ma.-%)	4 mm	(480 ± 30) kg/m ^{3*}	< 10 Ma.-%
AIRPEL 10 + KI/KOH	DESOTEC Activated Carbon nn-s.a.	Aktivkohle (Basis Steinkohle), imprägniert mit Kaliumiodid (ca. 2 Ma.-%) und Kaliumhydroxid (ca. 3 Ma.-%)	4 mm	(ca. 580 g/l)	10...15 Ma.-%
FerroSorp S	HeGo Biotec GmbH	eisenhaltige Sorptionsmasse (ca. 45 Ma.-% Eisenhydroxid)	1...4 mm (Fraktion)	700...800 kg/m ^{3**}	10...20 Ma.-%

* Rütteldichte

** Schüttdichte

4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen im Labormaßstab zum Vergleich unterschiedlicher Adsorbentien vorgestellt. Für weitergehende Informationen sei an dieser Stelle u. a. verwiesen auf die weiteren Publikationen der Arbeitsgruppe (u. a. [EICHERT ET AL., 2009] und [RÖHLIG, 2009]).

4.1 Vergleich des Adsorptionsverhaltens unterschiedlicher Adsorbentien

Als erste charakteristische Größe eines Adsorbens bei definierten Versuchsbedingungen wurden die Durchbruchzeiten ermittelt. Im Rahmen der vorliegenden Versuche wurde – insbesondere in Hinblick auf den angestrebten Anwendungsfall der Reinigung von Gasen vor Einsatz in Brennstoffzellen – als Durchbruchzeit der Wert definiert, bei dem die Reingaskonzentration 2 ppmv Schwefelwasserstoff beträgt. Die Versuche wurden als Doppelbestimmungen ausgeführt, unterschieden sich die ermittelten Messwerte signifikant, wurden weitere Messungen vorgenommen.

In Abb. 3 sind beispielhaft vier Durchbruchkurven für unterschiedliche Adsorbentien (eine nicht modifizierte und zwei imprägnierte Aktivkohlen sowie ein eisenhaltiges Sorptionsmaterial) dargestellt. Die zugehörigen Versuchsbedingungen können Tab. 2 entnommen werden.

Tab. 2: Versuchsbedingungen für den Vergleich des Adsorptionsvermögens verschiedener Adsorbentien bei Anwesenheit von Sauerstoff im Rohgas

Volumenstrom des Rohgases	102 bzw. 103 l/h
H ₂ S-Konzentration im Rohgas	1.004 bzw. 986 Mol-ppm
Adsorbensbetthöhe	0,08 m
Sauerstoffgehalt im Rohgas	ca. 21 Vol.-% (Träger- und Verdünnungsmedium synthetische Luft)

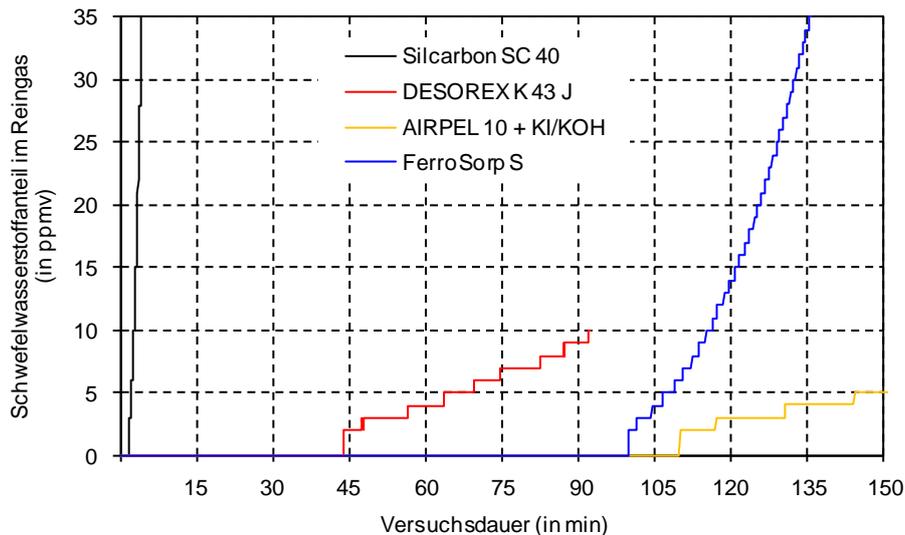


Abb. 3: Durchbruchskurven für unterschiedliche Adsorbenzien bei Anwesenheit von Sauerstoff im Rohgas (nach [RÖHLIG, 2009])

Während für die unmodifizierte Aktivkohle eine Durchbruchzeit von lediglich ca. 1,6 min ermittelt wurde, betragen die Durchbruchzeiten des eisenhaltigen Adsorbens FerroSorp S im Mittel 105 min und die der mit KI und KOH imprägnierten Aktivkohle 123 min.

Bei Zugabe von Sauerstoff wurde insbesondere bei dem Adsorbens FerroSorp S, aber auch bei den dotierten Aktivkohlen eine signifikante Verlängerung der Durchbruchzeiten beobachtet. Als Ursache dafür ist bei den eisenoxid/-hydroxidhaltigen Adsorbenzien die partielle Regeneration durch Umwandlung des gebildeten Eisensulfids unter Ablagerung von elementarem Schwefel bekannt. Die genauen Reaktionsmechanismen an den imprägnierten Aktivkohlen werden gegenwärtig untersucht.

4.2 Beladungskapazität und Adsorptionsisotherme

Aus den ermittelten Durchbruchzeiten und bei konstanter Konzentration des Schwefelwasserstoffs im Rohgas kann als weitere charakteristische Größe die Durchbruchbeladung des Adsorbens ermittelt werden.

Aus der allgemeinen Gleichung zur Ermittlung der Massebeladung eines Adsorbens mit der Komponente i in Abhängigkeit von der Zeit t

$$X_i(t) = \frac{\dot{V} \cdot c_{i,E}}{m_A} \int_0^t \left(1 - \frac{c_i(t)}{c_{i,E}} \right) dt$$

ergibt sich dabei für die Berechnung der Durchbruchbeladung $X_{i,DB}$ (näherungsweise analog der Berechnung für eine ideale Durchbruchkurve) die Gleichung

$$X_{i,DB} = \frac{\dot{V} \cdot c_{i,E}}{m_A} t_{DB}$$

mit

- \dot{V} ... Volumenstrom des Rohgases
- $c_{i,E}$... Eingangsmassenkonzentration der Komponente i im Rohgas
- m_A ... Adsorbensmasse
- t_{DB} ... Durchbruchzeit.

Diese Größe ist insofern von besonderem Interesse, als dass sie einen unmittelbaren Vergleich von unter verschiedenen Randbedingungen (mit entsprechenden Auswirkungen auf die Sorptionsverläufe) durchgeführten Adsorptionsversuchen ermöglicht.

Die so genannten Adsorptionsisothermen stellen den Zusammenhang zwischen der Beladung und der Konzentration der zu adsorbierenden Komponente im Rohgas dar. Ihr Verlauf gibt Aufschluss über die Adsorptionsmechanismen (Chemi- oder Physisorption etc.). In der Praxis werden sie für die Dimensionierung und Auslegung von technischen Adsorbern genutzt.

In Abb. 4 ist die Adsorptionsisotherme für die Aktivkohle Silcarbon SC 40 dargestellt.

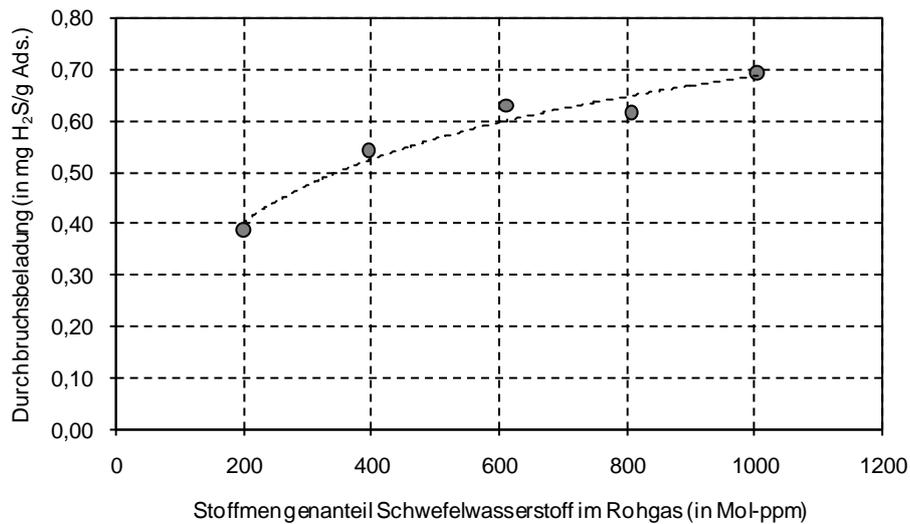


Abb. 4: Adsorptionsisotherme für die nicht modifizierte Aktivkohle Silcarbon SC 40 (Rohgasvolumenstrom 51 l/h, Betthöhe 0,08 m, Sauerstoffanteil im Rohgas ca. 21 Vol.-%, trockenes Gas; Temperatur 23...25 °C) (nach [RÖHLIG, 2009])

Es handelt sich um eine Adsorptionsisotherme des Typs 1 – eine Vergrößerung der Konzentration der relevanten Komponente im Rohgas führt zur Erhöhung der erreichbaren Beladung des Adsorbens [RÖHLIG, 2009].

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Betrieb von Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) mit Biogas“ wurden u. a. umfangreiche Untersuchungen zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus synthetischen Gasgemischen im Labormaßstab und zur vergleichenden Testung unterschiedlicher Adsorbenzien durchgeführt. Dabei erwiesen sich mit KI und KOH und verschiedenen Metalloxiden modifizierte Aktivkohlen ebenso wie eisenhaltige Sorptionsmassen als besonders geeignet, ebenso wie sich die Dosierung von Sauerstoff und/oder Befeuchtung des Rohgases positiv auf die Sorptionskapazitäten auswirkte.

Gegenwärtig erfolgt die Testung ausgewählter Adsorbenzien zur Entschwefelung von realen Gasgemischen (Biogas) im Labormaßstab sowie die Maßstabsübertragung und Vorbereitung der Testung insbesondere der eisenhaltigen Sorptionsmassen als Gasreinigungsstufe für eine an eine Biogasanlage gekoppelte SOFC.

6 Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten gliedern sich ein in das Vorhaben „Betrieb von Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) mit Biogas“ (Aktenzeichen 4-7531.60-02-5160-07/1) gefördert durch Mittel des Sächsischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst (SMWK).

Unser besonderer Dank gilt den MitarbeiterInnen des Fraunhofer Instituts für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) – namentlich insbesondere Frau Sylvia Richter, die im Rahmen des o. g. Vorhabens am IKTS ihre Diplomarbeit anfertigte, und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Alexander Stoll – für die Durchführung von Versuchen und Analysen sowie die Bereitstellung von umfangreichem Datenmaterial, ebenso wie den MitarbeiterInnen der WHZ, die Beiträge zur erfolgreichen Bearbeitung des Vorhabens geleistet haben.

Die Mehrzahl der getesteten Adsorbenzien wurde von Herstellern und Vertreibern als kostenlose Muster zur Verfügung gestellt. Stellvertretend – aber keineswegs ausschließlich – sei den Firmen P.U.S. GmbH, Lautau und Donau Carbon GmbH, Frankfurt/Main dafür gedankt.

7 Literatur

BAYLFU – BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (HRSG.): Biogashandbuch Bayern – Materialienband. Augsburg: LFU-Onlineveröffentlichung, Dezember 2004.

EICHERT, H.; GEMENDE, B.; GERBETH, A.; HOFFMANN, M.; JAHN, M.: Schlussbericht zum Projekt „Betrieb von Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) mit Biogas“. Westsächsische Hochschule Zwickau, Zwickau, Juni 2009.

FNR – FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (HRSG.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow, 2005.

HOHENWARTER, U.; RENETZEDER, P.; BAMBERGER, G.: Endbericht des Projektes „Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk für anaerobes Biogas“. Institut für Wärmetechnik der TU Graz, Graz, Februar 2006.

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.

KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg, New York etc.: Springer, 2004.

KAVURUCU SCHUBERT, S.; KUSNEZOFF, M.: H₂S-Einfluss auf den Betrieb der Hochtemperatur-Brennstoffzelle (SOFC). in: „Fraunhofer IKTS Jahresbericht 2008“; Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme, Dresden, April 2009.

OTT, M.; TAMM, D.: Anforderungen beim Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen. Gülzower Fachgespräch: Workshop „Aufbereitung von Biogas“; FAL Braunschweig, 17./18. Juni 2003.

RÖHLIG, S.: Untersuchung von Adsorbenzien zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas. Diplomarbeit, Westsächsische Hochschule Zwickau, Zwickau, März 2009.

WWW.NKJ-PTJ.DE: Website Nationale Koordinierungsstelle Jülich für Wasserstoff und Brennstoffzellen (NKJ) „Statusseminar SOFC/(HT)-PEM“ (Stand 15.07.2009).

8 Adressen der Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Anja Gerbeth, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Gemende, Prof. Dr. rer. nat. habil. Gunter Krautheim

Fakultät Physikalische Technik/Informatik

Prof. Dr.-Ing. Helmut Eichert, Dipl.-Ing. (FH) Sindy Röhlig

Fakultät Kraftfahrzeugtechnik

Westsächsische 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