

Feinentschwefelung von Biogas

Thomas Stiff und Silvana Rossow

1.	Grundlagen Biogas und Nutzung	312
2.	Problematik H_2S	313
3.	Grobentschwefelung	314
4.	Biologische Verfahren	315
5.	Chemische Verfahren	316
6.	Feinentschwefelung	316
7.	Feinentschwefelung mit Aktivkohle	317
8.	Dotierte Aktivkohle	318
9.	Optimale Einsatzbedingungen der dotierten Aktivkohle.....	319
10.	Fazit.....	319
11.	Literatur	319

Für Ausführungen zur Entschwefelung biogener Gase ist die Präzisierung des Begriffs Biogas wichtig. Im Allgemeinen ist Biogas ein Gasgemisch, das durch die Vergärung organischen Materials in einer Biogasanlage entsteht.

Der Begriff Biogas muss jedoch weiter gefasst werden. Gasgemische aus Deponien, Kläranlagen, aus Anlagen zur Vergärung organischer Abfälle und unter Umständen auch Gase aus dem Untertagebau (Grubengas) zählen mit zur Kategorie Biogas. Allen gemein ist die Entstehung des Gasgemisches, welches sich in den wesentlichen Eigenschaften ähnelt. Die folgende Tabelle zeigt die verschiedenen Biogasarten mit den wesentlichen Eigenschaften.

Neben dem energetisch nutzbaren Methan enthält das Biogas auch Komponenten, die in der Nutzung zu Problemen führen. Im Folgenden werden wir zu den Schwefelverbindungen Ausführungen machen, bei denen Schwefelwasserstoff H_2S als Leitkomponente gilt.

Tabelle 1: Übersicht über verschiedene brennbare Gasgemische

Gasgemisch	Ursprung	Ausgangssubstrate	Methangehalt Vol.-%	H ₂ S-Gehalt ppm
Biogas	Landwirtschaftliche und industrielle Biogasanlagen	Nachwachsende Rohstoffe	40 bis 60	50 bis 20.000
Deponiegas	Deponiekörper, Sickerwasser-aufbereitung	Organischer Anteil des Abfalls	etwa 50	etwa 20
Klärgas	Kläranlagen	Abwasser	40 bis 70	< 2.000
Grubengas	Stollen aus dem Untertagebau	Organisches Pflanzenmaterial	25 bis 80	k.A.
Reststoff- und Abfallvergärung	Abfallbehandlungsanlagen	Organischer Anteil des Abfalls	40 bis 60	< 25.000

1. Grundlagen Biogas und Nutzung

Biogas entsteht in einem mehrstufigen Prozess aus organischem Material. Je nach Ausgangssubstanzen und Bedingungen innerhalb der Prozesse ändert sich die Zusammensetzung.

Der Beginn der Prozesse ist durch die Aufspaltung hochmolekularer Verbindungen durch spezielle Enzyme gekennzeichnet. Dabei entstehen niedermolekulare Zwischenprodukte wie Monosaccharide, Aminosäuren und Fettsäuren. Diese werden später in Säuren wie Propionsäure oder Buttersäure umgesetzt. Als weitere Zwischenprodukte entstehen daraus Essigsäure, Kohlendioxid und Wasserstoff, in der letzten Etappe werden die zu Methan und Kohlendioxid umgesetzt.

Die einzelnen Phasen laufen parallel ab und beeinflussen sich gegenseitig. Für einen stabilen Prozess ist das Wissen um die spezifischen Anforderungen Grundlage.

In Abhängigkeit von den Ausgangsstoffen und den Prozessbedingungen besteht das entstandene Gasgemisch zu 40 bis 70 Vol.-% aus Methan und zu 60 bis 30 Vol.-% aus Kohlendioxid.

Darüber hinaus bedingen die unterschiedlichen Ausgangssubstrate auch Anteile an verschiedenen Gaskomponenten in wesentlich geringeren Konzentrationen. Als besonders problematisch stellt sich dabei Schwefelwasserstoff (H₂S) dar. Dieser wird durch den in den Substraten enthaltenen Schwefel in den Fermenter gebracht. Vor allem die Vergärung von eiweißhaltigen Substanzen (Grassilage, Schlachtabfälle) führt zu besonders hohen Konzentrationen. Es können in Abhängigkeit von eingesetzten Substraten H₂S-Konzentrationen von wenigen ppm bis zu 2 Vol.-% auftreten. Das produzierte Gas kann nicht ohne weiteres genutzt werden. Die enthaltenen Spurengase führen bei allen Nutzungswegen zu Problemen.

Die Bandbreite der möglichen Verwertung der Gase reicht von der dezentralen Verbrennung in Blockheizkraftwerken (BHKW) bis hin zur Aufbereitung für die Nutzung als Kraftstoff oder zur Einspeisung in das Erdgasnetz.

Die Verbrennung des Gases in BHKW ist die technisch einfachste und am weitesten verbreitete Nutzungsart des Biogases. Dabei entsteht elektrische Energie, die in das Stromnetz gespeist wird, und thermische Energie, die vor Ort genutzt werden sollte. Je nach Herstellervorgaben der genutzten BHKW gibt es unterschiedliche Anforderungen zur Reinheit des Gases und speziell auch zur Schwefelwasserstoffkonzentration des Gases. War vor 10 Jahren das Gas mit einer H_2S -Konzentration von bis zu 100 ppm problemlos im BHKW zu verwenden, so ist das heute nicht mehr ohne weiteres möglich. Mit der Modernisierung der Technik, der Nutzung effizienterer Technologien und der Einführung neuer Abgaskatalysatoren ist eine Entschwefelung auf unter 5 ppm zwingend notwendig. Die Gasqualität und speziell der Schwefelwasserstoffgehalt sind hier entscheidend für die Lebensdauer der Aggregate.

Bei allen anderen Nutzungsarten des Biogases war klar, dass neue Maßstäbe in Sachen Gasreinigung gesetzt werden müssen. Für die Einspeisung des gereinigten Gases in das Erdgasnetz und auch für die Nutzung als Kraftstoff gelten festgelegte Grenzwerte. Die Nutzung von gereinigtem Biogas in Brennstoffzellen ist wegen der hohen Ansprüche an die Gasbeschaffenheit nicht weit verbreitet. Der Wirkungsgrad dieser Gasnutzung und die möglichen Erträge sind zwar hoch, jedoch die zur Gasreinigung vorzuschaltenden Prozesse und Techniken aufwändig und teuer.

Mikrogasturbinen werden speziell für geringe Methangehalte genutzt. Der Vorteil liegt hier vor allem in der Konstruktion. Da die Antriebswelle luftgelagert ist, ist der Bedarf an Hilfsstoffen nur sehr gering. Das ganze System ist wartungsarm gestaltet. Der elektrische Wirkungsgrad liegt jedoch unterhalb dessen der Brennheizkraftwerke. Brennstoffzellen erzielen den höchsten Wirkungsgrad bei der dezentralen Verwertung. Möglich wird das durch die direkte Umwandlung der chemischen Energie in die elektrische. Unter Einbeziehung der Nutzung der thermischen Energie lassen sich die Wirkungsgrade der verschiedenen Technologien wesentlich steigern. Gesamtwirkungsgrade zwischen 80 und 95 Prozent sind zu erreichen.

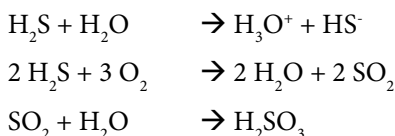
Die Bedingungen für die Nutzung als Kraftstoff und für die Einspeisung in das Erdgasnetz werden durch die DVGW-Richtlinie G260 vorgegeben.

2. Problematik H_2S

Warum muss Schwefelwasserstoff aus Biogas entfernt werden?

Auffällig wird H_2S vor allem durch seinen spezifischen Geruch. Umgangssprachlich wird oft der Vergleich zu faulen Eiern gezogen. Doch ist der unangenehme Geruch nicht das eigentliche Problem. H_2S ist giftig für Mensch und Tier. Bereits ab Konzentrationen von 20 ppm kann Schwefelwasserstoff toxische Reaktionen hervorrufen.

Beim Umgang ist deshalb besondere Vorsicht geboten [1]. Für die energetische Nutzung ist dies jedoch zweitrangig. Der wesentliche Grund zur Notwendigkeit der Entfernung liegt vorrangig an der Wirkung von H_2S und seinen Reaktionsprodukten.



Diese Reaktionsprodukte führen vor allem zur Korrosion an metallischen Anlagenteilen und den Betonaußenwänden von Biogasanlagen. Weiterhin konzentrieren sich die Schwefelverbindungen im Motorenöl auf, minimieren den Schmiereffekt und können die Lebensdauer des Aggregats verkürzen. Häufigere Wechselintervalle mit Stillstandzeiten und Wartungsarbeiten sind die Folge. Damit verbunden sind höhere Kosten für Wartung und Reparaturen. Im schlimmsten Fall kommt es zu irreparablen Schäden des Motors.

Auch bei den anderen Nutzungswegen entstehen ähnliche Probleme. Bei der Einspeisung in das Erdgasnetz als Beispiel reagieren die Aufbereitungsanlagen sensibel auf zu hohe Schwefelwasserstoffkonzentrationen. Die CO_2 -Abscheidung kann massiv beeinträchtigt werden. Diese ist notwendig, um eine geforderte Gasqualität zu garantieren.

Neben Schwefelwasserstoff wirken sich auch noch andere Komponenten des Biogases, welche in geringeren Konzentrationen auftreten können, negativ auf eine Verwertung aus. Diese sind Ammoniak oder Siloxane, deren Auftreten und Konzentration ebenfalls vor allem von den eingesetzten Substraten abhängig ist.

3. Grobentschwefelung

Die großen Unterschiede bei den H_2S -Konzentrationen in Biogasanlagen sind abhängig von den angewendeten Verfahren und vornehmlich von den eingesetzten Substraten. Bezüglich des Deponiegases wirkt sich vor allem das Alter der Deponie und den abgelagerten Abfällen, die Schichtung und damit auch die zugewiesene Deponieklasse entscheidend aus. Kläranlagen besitzen eine gewisse Modulation durch die verschiedenen Einleiter und die eingebrachten Inhaltsstoffe. Unterschiede treten vor allem zwischen Kläranlagen auf, welche ausschließlich kommunale oder auch industrielle Abwässer behandeln.

Bestehende Filtersysteme zur Feinentschwefelung, auf die in noch folgenden Abschnitten eingegangen wird, arbeiten mit Substanzen, die in Abhängigkeit Ihrer Eigenschaften nach einer gewissen Dauer erschöpft bzw. mit elementarem Schwefel vollständig beladen sind. Diese Substanzen müssen regelmäßig ausgetauscht werden, was bei zu hohen Eingangskonzentrationen von H_2S zu hohen Betriebskosten führt. Bei hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen ist es wirtschaftlicher, der Feinentschwefelung eine Grobentschwefelung vorzuschalten.

Bei der Entschwefelung wird zwischen biologischen, chemischen und physikalischen Verfahren unterschieden. Eine Übersicht zu den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Verfahren zur Grobentschwefelung gibt die folgende Tabelle.

Tabelle 2: Verfahren zur Grobentschwefelung

Verfahren	Energiebedarf		Betriebsstoffe		O ₂ -Eintrag	Reinheit ppm	DVGW* erfüllt?
	Elektr.	Therm.	Verbrauch	Entsorg.			
Biologische Entschwefelung im Fermenter	++	0	++	++	Ja	50 bis 2.000	Nein
Externe biologische Entschwefelung	-	0	+	++	Ja	50 bis 100	Nein
Biowäscher	-	0	-	+	Nein	50 bis 100	Nein
Zugabe von Eisenverbindungen	0	0	--	0	Nein	5 bis 500	Nein

* gemäß DVGW-Richtlinie G 260

++ besonders vorteilhaft, + vorteilhaft, 0 neutral, - nachteilig, -- besonders nachteilig

Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2013

4. Biologische Verfahren

Die am häufigsten angewandte Methode zur biologischen Entschwefelung ist die Lufteindosierung in den Fermenter. Bakterien (*Sulfobacter oxydans*) sorgen für die Bindung und Fällung der Schwefelverbindungen. Durch das Anbringen von Aufwuchsflächen (oft Holz) für das Bakterium innerhalb des Fermenters kann deren Anzahl bzw. Leistungsfähigkeit gesteigert werden. Die Bakterien sind in der Lage Schwefelwasserstoff zu zersetzen. Der elementare Schwefel fällt nach Bindung aus und bildet Stalaktiten ähnliche Gebilde. Diese fallen durch das Eigengewicht in die Flüssigphase des Fermenters zurück und können über das Ausbringen der Gärreste der Landwirtschaft nutzbar gemacht werden. Die Biologie der Bakterien ist sehr schwer steuerbar. So kann das Verfahren auf Schwankungen des H₂S-Gehaltes nur unzureichend reagieren. Weiterhin wird der Heizwert des bei der späteren Nutzung gemindert und eine mögliche Aufbereitung erschwert. Es entstehen durch die Eindosierung von Luft aber geringe Kosten.

Neben dem internen Verfahren werden auch externe Verfahren zur biologischen Entschwefelung angewandt. Die Verlagerung der biologischen Entschwefelung in einen externen Reaktor ermöglicht die gezielte Einflussnahme auf die biologischen Ansprüche der Bakterien. H₂S wird mit Hilfe eines Waschmediums absorbiert. Der ausgewaschene Schwefel kann entnommen werden und ebenfalls der Landwirtschaft zur Nutzung zugeführt werden. Die Nachteile der energetischen Nutzung oder der Aufbereitung sind gleich. Kosten der Anschaffung und Energie für ein zuträgliches Temperaturgefälle sind vergleichsweise teuer. Durch die separate Aufstellung ist der Eingriff in eine Gesamtanlage eher gering.

Neben der negativen Wirkung auf die energetische Nutzung bzw. Aufbereitung kann die toxische Wirkung von zu hohem Sauerstoffgehalt auf die methanbildenden Bakterien ebenfalls negative Auswirkungen haben.

5. Chemische Verfahren

Eine biochemische Wäsche (auch Biowäsche genannt) ist für eine spätere Aufbereitung als Verfahren zur Grobentschwefelung nutzbar. Schwefelwasserstoff wird in einem ersten Schritt mit Hilfe einer Waschflüssigkeit (z.B. verdünnte Natronlauge oder Eisenhydroxid) absorbiert. Das gereinigte Gas verlässt diesen Bereich der Anlage. In einem weiteren Schritt wird die Waschsubstanz durch Sauerstoffzufuhr zum Teil wieder regeneriert und steht weiter zur Verfügung. Durch Trennung der Prozessschritte wird kein zusätzlicher Sauerstoff in das energetisch nutzbare Gasgemisch eingebracht. Hohe Investitionskosten und anfallende Betriebskosten (Chemikalienverbrauch, Entsorgungskosten) minimieren die Anwendungsmöglichkeiten.

Andere chemische Verfahren zur Grobentschwefelung verwenden zumeist Eisenprodukte als Pulver oder Granulat. Diese werden dem Fermenter direkt hinzugegeben. Der Schwefelwasserstoff wird direkt am Entstehungsort gebunden und bildet mit den Eisenprodukten Sulfide. Diese können in der Regel mit den Gärresten der landwirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden. Die Steuerung des H_2S -Gehaltes ist durch eine entsprechende Dosierung gut möglich. Bei Überdosierung kann es aber zu einer Absenkung des pH-Wertes kommen, der Einfluss auf die Biologie des Fermenters nimmt. Die stetigen Materialkosten sind kalkulierbar.

6. Feinentschwefelung

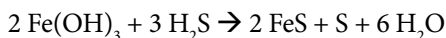
Die durch die Grobentschwefelung unter Nutzung eines der kurz beschriebenen Verfahren erreichte Gasqualität ist in der Regel für die spätere Verwertung noch nicht ausreichend. Bei der Feinentschwefelung kommen drei Verfahren zur Anwendung. Alle nutzen Adsorbentien und spezielle Adsorber.

Es werden Schüttbett- und Flachbettadsorber unterschieden. Mit der Gestaltung und der Auslegung der Adsorber wird Einfluss auf die Funktionalität der Adsorbentien genommen. Die physikalischen Parameter (wie z.B. Volumenstrom, Dichte, Strömungsdruck, Anströmfläche, Bettdicke, Dichte der Adsorbentien) bedingen die Kontaktzeit und somit eine effektive Feinentschwefelung. Die Auslegung der Adsorber sollte auf die Wahl der Adsorbentien abgestimmt sein.

Die Adsorption von schwefelhaltigen Verbindungen an Zinkoxid stellt eine der drei Möglichkeiten zur Feinentschwefelung dar. Das in Pelletform gebrachte Zinkoxid wird, wie bei allen verwendeten Verfahren zur Feinentschwefelung, in nachgeschaltete Filtersysteme gegeben. Das Zinkoxid wird im Gegenstromverfahren von unten nach oben durchströmt. Dabei reagiert Schwefelwasserstoff bei Temperaturen zwischen 200 und 400 °C mit Zinkoxid zu Zinksulfid und Wasserstoff. Um die Entnahme und Befüllung

einfach zu halten werden die beladenen Pellets nach unten durch eine Öffnung abgelassen und durch eine Öffnung oberhalb durch neue Zinkoxidpellets ersetzt. Voraussetzung ist jedoch die vorgeschaltete Umwandlung aller schwefelhaltigen Verbindungen durch Hydrolyse zu Schwefelwasserstoff. Dies bedingt einen weiteren temperaturintensiven Prozessschritt (bis zu 500 °C) und zusätzliche Investitions- und Betriebskosten [6]. Darüber hinaus ist es nicht möglich das gebildete Zinksulfid zu regenerieren [1]. Insgesamt sind Schwefelbelastungen bis zu 27 Gew.-Prozent und Endreinheiten von < 1 ppm H₂S möglich. Eine Verwendung von Zinkoxid ist insgesamt prozesstechnisch aufwendig und benötigt viel thermische Energie als Voraussetzung. Daher ist dieses Verfahren in der Praxis eher unüblich.

Wie auch bei der Biowäsche können pelletierte Eisengranulate in nachgeschalteten Entschwefelungsverfahren verwendet werden. Das Prinzip ist dasselbe wie bei der Verwendung von Zinkoxid. Im Gegensatz dazu jedoch kann das verwendete Eisengranulat wieder aufbereitet werden. Dabei wird dem Adsorber zusätzlich zum Biogas auch Sauerstoff hinzugefügt. Reaktionen zur Bindung des Schwefelwasserstoffes und Regeneration der Eisengranulate laufen parallel ab. Jedoch sind die Kapazitäten zur Regeneration begrenzt. Sind die Pellets sozusagen komplett mit Schwefel beladen ist deren Entschwefelungsleistung erschöpft. Die verbrauchte Masse wird wie bei der Feinentschwefelung durch Zinkoxid durch eine untere Öffnung entnommen und von oben nachgefüllt. Auch durch dieses Verfahren sind Endreinheiten von < 1 ppm H₂S möglich.

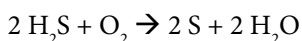


Die Feinentschwefelung mit Aktivkohle wird am häufigsten angewandt.

7. Feinentschwefelung mit Aktivkohle

Als Aktivkohle wird ein industriell hergestelltes, kohlenstoffhaltiges Produkt mit einer sehr großen inneren Oberfläche von > 400 m²/g bezeichnet. Die innere Oberfläche (Porensystem) ist in der Lage, Atome oder Moleküle aufzunehmen, die in Gasen oder Flüssigkeiten nicht erwünscht sind. Die Porenstruktur ist abhängig vom Herstellungsverfahren (chemische oder physikalische Aktivierung), von den Herstellungsbedingungen und vom Kohlenstoffträger. Die Porenstruktur ist maßgeblich verantwortlich für die Adsorptionsfähigkeit (physikalische Adsorption) der entsprechenden Aktivkohle. Damit eine Aktivkohle für einen speziellen Anwendungsfall funktioniert, benötigt sie auch noch eine chemische Umgebung. Durch diese können die für die folgende Adsorption notwendigen chemischen Reaktionen stattfinden.

Häufig werden für die Feinentschwefelung imprägnierte Aktivkohlen eingesetzt. Die Imprägnierung herkömmlicher Aktivkohlen erfolgt mit 2 bis 4 Gew.-Prozent Kaliumjodid, Kaliumpermanganat, Kaliumcarbonatverbindungen oder anderen Chemikalien in wässriger Lösung. Die Imprägnierung ist notwendig, um den Kohlenwasserstoff katalytisch aufzuspalten und die Adsorption des elementaren Schwefels in dem Mikroporensystem der Aktivkohle zu ermöglichen. Folgende Reaktion findet statt:



Die basische Imprägnierung verschiebt das Dissoziationsgleichgewicht zu Gunsten des elementaren Schwefels. Durch die Anlagerung des Schwefels wird die Zugänglichkeit der katalytischen Zentren eingeschränkt. Die Aktivkohle ist mit zunehmender Beladung nicht mehr in der Lage den Kohlenwasserstoff aufzuspalten, die Aktivkohle hat ihre Leitungsgrenzen erreicht. Es kommt zu Durchbrüchen des H_2S . Je nach Porenstruktur und nach Art und Menge der Imprägnierung wurden bei den imprägnierten Aktivkohlen Schwefelbeladungen zwischen 10 und 40 Prozent gemessen.

Höhere Beladungsraten können mit dotierten Aktivkohlen erzielt werden. Mit entsprechenden Einsatzbedingungen und optimal ausgelegten Adsorbern sind Beladungen von 50 bis 100 Prozent an elementarem Schwefel keine Seltenheit.

8. Dotierte Aktivkohle

Bei der dotierten Aktivkohle wird die chemische Modifizierung durch Zugabe von Zuschlagstoffen in die Kohlenstoffstruktur der Aktivkohle durchgeführt. Dies erfolgt vor der Oberflächenausbildung. Die gesamte Porenstruktur ist für die Adsorption des elementaren Schwefels verfügbar. Die Unterschiede zwischen herkömmlicher, imprägnierter und dotierter Aktivkohle sind in der folgenden Grafik dargestellt.



Bild 1: Porenstruktur un behandelter und modifizierter Aktivkohlen

Bei zunehmender Beladung erfolgt der Verschluss der katalytisch aktiven Zentren erst bei vollständiger Beladung des Porensystems. Die basischen Eigenschaften werden bis zur Sättigung der Aktivkohle aufrechterhalten. Die vorhandene Feuchte des Gasgemisches löst die basischen Komponenten immer wieder an. Die Aufspaltung des H_2S kann bis zur vollständigen Auslastung der Adsorptionskapazität der Aktivkohle erfolgen. Die Feinentschwefelung mit dotierter Aktivkohle erweist sich als wirtschaftlichste derzeit bekannte Methode.

Gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut Umsicht haben Mitarbeiter der AdFiS das Verfahren zur Dotierung von Aktivkohlen entwickelt. Das Verfahren ist patentiert. Die AdFiS products GmbH stellt die einzige dotierte Aktivkohle zur Feinentschwefelung, die dopetac sulfo 100 her. Durch den Einsatz in vielen Anlagen zur Nutzung biogener Gase wurde eine breite Datenbasis gewonnen, um die Einsatzbedingungen und auch die Anlagentechnik optimal anzupassen.

9. Optimale Einsatzbedingungen der dotierten Aktivkohle

Um die Beladungskapazität der dotierten Aktivkohle maximal auszulasten, sollten einige Bedingungen bei der Feinentschwefelung eingestellt werden. Diese Stellschrauben liegen in den meisten Fällen innerhalb der vorhandenen Anlagentechnik und benötigen selten weitere Investitionen.

Für die chemische Aufspaltung des H_2S und die Adsorption ist eine Verweilzeit in der Schüttung von 4 Sekunden optimal. Bei der Auslegung der Adsobertechnik sollte darauf geachtet werden. Geringere Verweilzeiten führen zu früheren Durchbrüchen und einer geringeren Standzeit. Damit die zuvor beschriebenen basisch, katalytisch wirkenden Zentren gebildet werden, ist eine relative Gasfeuchte im Gasgemisch von 40 bis 60 Prozent optimal. Diese entspricht genau dem Porensystem der dotierten Aktivkohle. Die relative Gasfeuchte lässt sich mit dem Temperaturprofil vieler Anlage einstellen. Eine Temperaturerhöhung von 8 bis 14 K über dem Taupunkt (z.B. Gaskühlung) vor dem Aktivkohleabsorber ergibt die optimale Spanne der Gasfeuchte. Mit einem überstöchiometrischen Sauerstoffgehalt von 0,5 Vol.-Prozent im Gasgemisch wurde die größte Entschwefelungsleistung gemessen. Treten in den Anlagen höhere relative Gasfeuchten auf, ist ein größerer Diffusionsdruck für die Aufspaltung des H_2S erforderlich. Die Erhöhung des Sauerstoffgehalts auf bis zu 0,8 bis 1 Gew.-Prozent kann da Abhilfe schaffen.

Eine optimale Einstellung der Anlage kann die Standzeiten der dotierten Aktivkohle weiter verlängern und so für einen effizienten Einsatz bei der Feinentschwefelung sorgen. Wechselwirkungen mit anderen bereits erwähnten, möglichen Komponenten (Siloxane, Ammoniak) des Biogases reduzieren die Entschwefelungsleistung, werden von dotierter Aktivkohle wegen der gesamten zugänglichen Adsorptionskapazität aber ebenfalls entfernt.

10. Fazit

Unterschiedliche Gasgemische und unterschiedliche Anforderungen der Nutzung biogener Gase bedingen den Einsatz verschiedener Methoden der Entschwefelung. Oft ist es wegen hoher Schwefelwasserstoffkonzentrationen notwendig, der Feinentschwefelung eine Grobentschwefelung vorzuschalten. Die Entschwefelung mit dotierter Aktivkohle ist die derzeit effizienteste Methode zur Feinentschwefelung.

11. Literatur

- [1] Adler, P.: Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung. Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes: Studie - Einspeisung von Bioas in das Erdgasnetz angefertigt. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. 5. Aufl., vollständig überarb. Aufl. Gülzow: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, 2014
- [2] Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique (CEFIC) (1986): Test Methods for Activated Carbon.
- [3] Döhler, H.: Faustzahlen Biogas. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. 3. Ausg. Darmstadt: KTBL, 2013

- [4] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung ; [Bioenergie]. 6., überarb. Aufl. Gülzow, 2013 (biogas.fnr.de). Online verfügbar unter <http://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/biogas/leitfaden-biogas.html>.
- [5] Holleman, A. F.; Wiberg, E.; Hollman-Wiberg: Lehrbuch der anorganischen Chemie. 81. - 90., sorgf. rev., verb. und stark erw. Aufl. von Egon Wiberg. Berlin: de Gruyter, 1976
- [6] Krause, H.: Entschwefelung von Erdgas und anderen gasförmigen Energieträgern für den Einsatz in Reformier-Brennstoffzellensystemen. Fortschritte der Gasprozesstechnik für die Wasserstoffherzeugung in Brennstoffzellenanwendungen, Duisburg, 2009-12-08, http://www.zbt-duisburg.de/fileadmin/user_upload/01-aktuell/06-veranstaltungen/Gasprozesstechnik_2009/02_Krause.pdf
- [7] Masuch, R.: Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Aktivkohlegranulaten in Biogasfermentern zur prozessinternen Grobentschwefelung, 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Margit Löschau (Hrsg.):

Immissionsschutz, Band 5

– Recht – Umsetzung – Messung – Emissionsminderung –

ISBN 978-3-944310-23-7 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Sandra Peters, Ginette Teske, Anne Kuhlo

Druck: Beltz Bad Langensalza GmbH

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.