

Charakterisierung von Biogasspeichern: Einflüsse und Methodenvergleich

Mathias Stur, Marcel Pohl, Christian Krebs, Eric Mauky

Die Speicherung des produzierten Gases von Biogasanlagen ist unabhängig vom Nutzungspfad ein integraler Bestandteil des Betriebskonzepts. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Flexibilisierung der Strombereitstellung aus Biomasse dient die Speicherung nicht mehr nur der Kompensation von witterungsbedingten Schwankungen oder bei Betriebsstörungen, sondern ist aufgrund der Trägheit des biologischen Prozesses ein wichtiger Bestandteil für die Teilnahme am Strommarkt geworden.

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über die verschiedenen Gasspeichersysteme und die in der Praxis genutzten Verfahren zur Füllstandbestimmung. Darüber hinaus zeigt er, basierend auf Forschungsarbeiten am DBFZ, verschiedene Methoden auf, das nutzbare Volumen von Gasspeichern auf Biogasanlagen zu ermitteln. Die unterschiedlichen Methoden werden nach Belastbarkeit der Ergebnisse eingeordnet, verglichen und diskutiert. Darüber hinaus werden Einflüsse von Witterungsbedingungen auf das nutzbare Speichervolumen erörtert.

Schlüsselwörter

Biogasspeicher, Füllstandmessung, Nettogasspeicherkapazität, Wittereinfluss, Volumenbestimmung

Für die Speicherung von Gasen werden für unterschiedliche Applikationen angepasste Systeme eingesetzt. Die folgende Klassifizierung von Speichersystemen beschränkt sich dabei auf die Speicherung von biogenen methanhaltigen Gasen, die bei einer biochemischen Konversion von durch Mikroorganismen verstoffwechselten Gärmedium zu Biogas entstehen. Das erzeugte Biogas besteht in der Regel zu 50 bis 60% aus Methan, wobei der Rest hauptsächlich Kohlenstoffdioxid darstellt. Weiterhin können Anteile von Schwefelwasserstoff und Wasserstoff, Siloxanen und Ammoniak in geringen Mengen enthalten sein. Aufgrund der möglichen Einspeisung von aufbereitetem Biogas zu Biomethan in das Erdgasnetz, sind neben den Systemen der Biogastechnologie bei der Klassifizierung auch typische Erdgasspeichersysteme berücksichtigt.

Stand der Technik

Die Systematik beginnt mit der Einteilung der Speichersysteme nach dem Wirkprinzip. Demnach wird in Nass- und Trocken-Gasspeicher unterteilt. Bei der Nass-Gasspeicherung wird für die Abdichtung des Gasraumes zur Umgebung eine Sperrflüssigkeit eingesetzt. Dieses Prinzip ist einfach, verschleißarm und weist eine hohe Dichtheit auf. Als Beispiel wäre hier der Glockengasspeicher zu nennen, bei dem die Glocke in einem wassergefüllten Ring schwimmend gelagert ist. Der Betriebsdruck ist technisch bedingt sehr niedrig, da der Druck im Gasraum durch die im Ring verdrängbare Wassersäule zur Umgebung begrenzt wird. Das Gas wird beim Befüllen und dem damit verbundenen Hub der Glocke vernachlässigbar komprimiert. Aufgrund dessen haben Nass-Gasspeicher in Abhängigkeit der Speicherkapazität einen hohen Raumbedarf. Während des Betriebes müssen zudem die

Dichtungsstellen gegen Einfrieren geschützt werden (BRAUN 1982). Im Unterschied dazu sind Trocken-Gasspeicher mit verschiedenen Abdichtungsformen ausgeführt: metallisch dichtende Gewindeverschraubung, Kunststoff- oder Metall-Flächendichtung oder gefettete, reibende Kolbenringdichtung etc. Dadurch sind höhere Speicherinnendrucke und damit einhergehender geringerer Raumbedarf möglich. Die nächste Unterteilung erfolgt nach der anwendbaren Druckstufe. Es wird hierbei in eine Nieder-, Mittel- und Hochdruckstufe unterteilt. Dabei sind die Bereiche des relativen Überdruckes zur Atmosphäre wie folgt festgelegt:

- Niederdruckstufe $1 < p < 100 \text{ hPa}$

Zur besseren Verständlichkeit wurde der übliche Bereich der Niederdruckstufe auf $1 < p < 100 \text{ hPa}$ erweitert. Es wird der Begriff drucklos vermieden und dieser Druckbereich der Niederdruckstufe zugeordnet, da die angewendeten relativen Überdrücke im Bereich von 1 bis 10 hPa liegen.

- Mitteldruckstufe $100 < p < 1.000 \text{ hPa}$
- Hochdruckstufe $p > 1.000 \text{ hPa}$

Die Nass-Gasspeicher werden bedingt durch ihre Funktionsweise in der Niederdruckstufe betrieben. Bei den Trocken-Gasspeichern variiert der Einsatz je nach Ausführung von Umgebungsdruck bis hin zu Hochdruckanwendungen bei Druckgasflaschen mit bis zu 30 MPa. Eine weitere Einteilung erfolgt in Bezug auf die Ausführung des Gasraumes. Dazu gibt es raumveränderliche Speichersysteme. Es handelt sich dabei nicht um isobare Systeme. Durch die Zuführung einer Gasmenge wird der Gasraum vergrößert. Dies geschieht durch die Ausbreitung einer flexiblen und zum Teil massebelasteten, dehnbaren oder nicht dehnbaren Membran oder durch die Verdrängung einer Apparatur beispielsweise ähnlich einem Hubkolben. Beispiel: Der gasdruckgestützte einschalige Membrangasspeicher ist mit einer dehnbaren Membran ausgestattet und formt er sich mit zunehmender Gasmenge bei gleichzeitig ansteigendem Gasspeicherinnendruck kugelkalottenförmig aus. Durch die Membranvorspannung erfolgt eine definierte Ausformung der Membran (Abbildung 1, Pos. 4). Der mechanisch vorgespannte zweischalige Membrangasspeicher ist mit zwei flexiblen, nicht dehnbaren Membranen ausgeführt. Die Pos. 5 in Abbildung 1 zeigt den Aufbau des Gasspeichersystems mit einer gelben inneren Gasspeichermembran, welche gasdicht an der Stützsäule befestigt ist, und einer äußeren mechanisch vorgespannten grauen Schutzmembran. Die Ausformung der inneren Membran erfolgt in Abhängigkeit der Gasmenge bis zum Anliegen an die äußere Schutzmembran. Dabei steigt der Gasspeicherinnendruck mit zunehmendem Füllstand an.

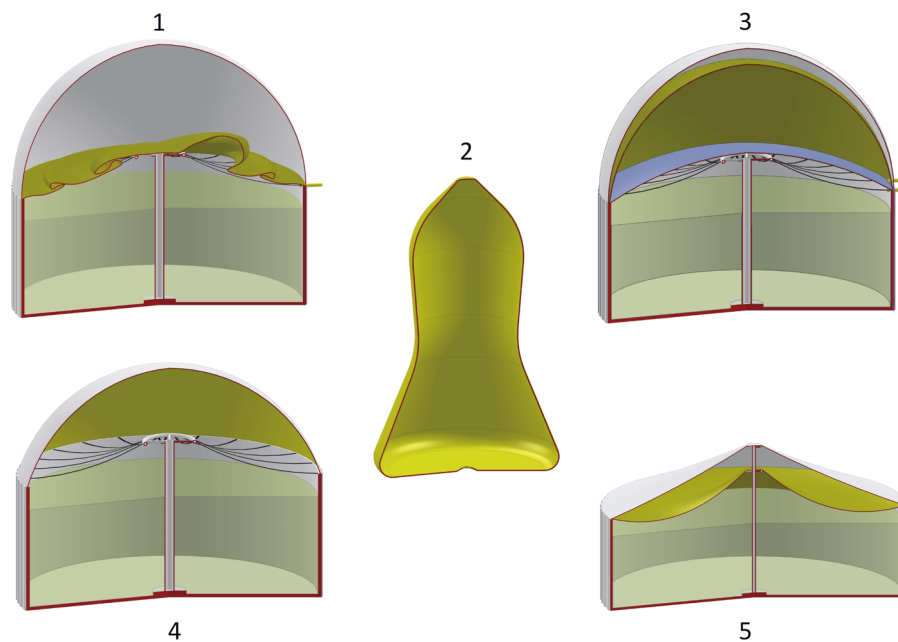


Abbildung 1: Ausgewählte Bauformen von Gasspeichersystemen; 1 - integrierter pneumatisch vorgespannter zweischaliger Membrangasspeicher (teilgefüllt); 2 - Membrangassack hängend (teilgefüllt, ohne Tragwerk und Einhausung); 3 - integrierter pneumatisch vorgespannter dreischaliger Membrangasspeicher (vollgefüllt); 4 - gasdruckgestützter einschaliger Membrangasspeicher (vollgefüllt); 5 - mechanisch vorgespannter zweischaliger Membrangasspeicher (entleert)

Außer den raumveränderlichen werden isochore, raumunveränderliche Systeme verwendet, die eine Kompression des Gases, wie bei der Anwendung einer Druckgasflasche, ermöglichen.

Abschließend erfolgt eine Einteilung der Gasspeichersysteme in die Art der Einbindung der Speicher innerhalb der bautechnischen Anlage. Es wird in integrierte und separierte Systeme unterschieden. Integrierte Systeme sind Speicherarten, die direkt mit dem biogaserzeugenden Gärbehälter als Dachausführung verbunden sind. Die extern angeordneten und eigenständigen Gasspeicheranlagen sind separiert. Als Beispiel für die separierte Gasspeicherausführung ist der hängend gelagerte Membrangassack zu nennen (Abbildung 1, Pos. 2).

Die Speichersysteme werden in Abhängigkeit der Ausführung als ein-, zwei oder dreischalige Speicher bezeichnet. Dabei sind Ausführungen mit einer Membran zwischen dem Gasraum und der Umgebung als einschalig, der Aufbau mit zwei Membranen als zweischalig sowie mit drei Membranen als dreischalig benannt. Eine Auflistung der einzelnen Gasspeichersysteme und deren Einordnung in die o.g. Klassifizierung ist in der folgenden Abbildung 2 dargestellt.

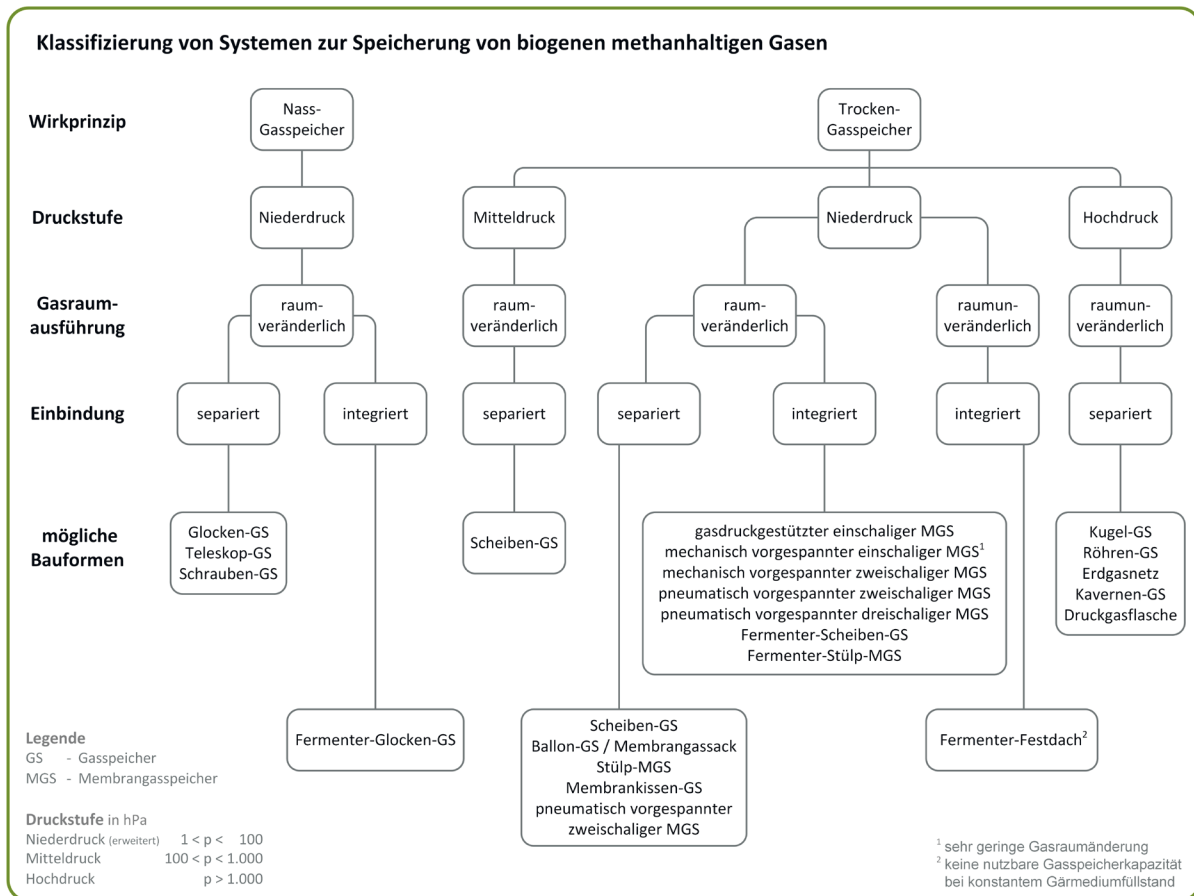


Abbildung 2: Klassifizierung Gasspeichersysteme

Die integrierten zweischalig ausgeführten Doppelmembrangasspeicher sind an rund 63% der deutschen Biogasanlagen auf Gärbehältern installiert (DANIEL-GROMKE 2017). Somit stellen sie das in Deutschland am weitesten verbreitete System zur temporären Speicherung von Biogas dar, weshalb diese Bauform mit der technischen Ausführung am Beispiel der FBGA im Folgenden näher betrachtet wird.

Aufbau und Funktion des Doppelmembrangasspeichers

Aufbau

Der in Abbildung 3 als Schnittansicht dargestellte integrierte pneumatisch vorgespannte zweischalige Membrangasspeicher (Doppelmembrangasspeicher) ist aus einer außenliegenden Schutzmembran (Pos. 1) und einer innenliegenden Gasspeichermembran (Pos. 2) aufgebaut. Beide Membranen sind flexibel und nicht dehnbar ausgeführt, an der Oberkante der Behälterwand (Pos. 7) befestigt und bilden über dem Gärbehälter angeordnet das integrierte gasdichte und raumveränderliche Speicherdach. Durch eine spezifische Konfiguration der Membrankonstruktion, bspw. durch einen Verbund von mehreren Membranschichten, Beschichtungen und unterschiedlichen Materialien, werden verschiedene Eigenschaften, wie Ausformbarkeit und Zugfestigkeit, UV-Beständigkeit und Permeation, erzielt. Auf der Gasspeicherinnenmembran ist der Flüssigkeitsschlauch (Pos. 5 bzw. MS5, Abbildung 4) des Gasspeicherfüllstandmessverfahrens befestigt. Unter der Gasspeicherinnenmembran befindet sich

das Gurthaltesystem, zusammengesetzt aus der Stützsäule (Pos. 9) und davon ausgehend radial zur Behälteraußenwand verlaufende Gurte (Pos. 3). Zur Unterstützung für die Ablage der Gasspeicherinnenmembran auf dem Gurthaltesystem ist ein Netz über den Gurten verlegt. Außerhalb des Daches ist ein Stützluftsystem (Pos. 6) eingebunden, bestehend aus einem Gebläse bspw. einem Seitenkanalverdichter, einer abschnittsweise flexiblen Gasleitung vom Gebläse zur Schutzmembran (Stützluftein- speisestelle) mit einer Durchführung in den Stützluftraum (Pos. 13) und einer im Teilstrom geschalteten Stauklappe. Gegenüber der Stützluftein- speisestelle ist die Ausspeisestelle der Stützluft mit einer zweiten Gasleitung (Pos. 13) und Stauklappe angeordnet. Die Über- und Unterdrucksicherung (Pos. 4) und die Biogasleitung (Pos. 11) sind jeweils über einen Durchbruch mit dem Gasspeicherinnenraum verbunden. Der Gärbehälter ist mit einem Paddelrührwerk (Pos. 8) und einem Seitenrührwerk (Pos. 12) unterhalb des Gärmediumspiegels (Pos. 10) ausgestattet.

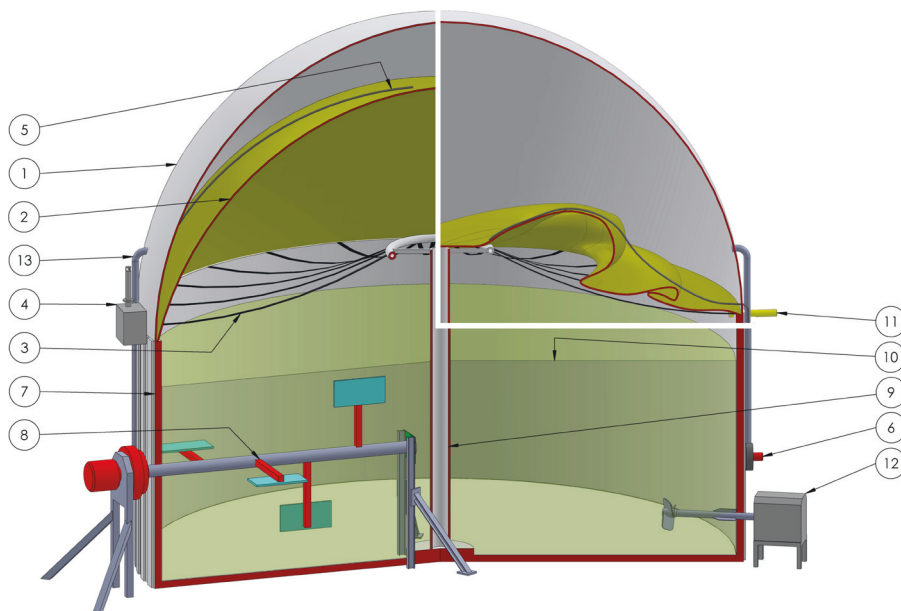


Abbildung 3: Aufbau Gärbehälter mit integriertem pneumatisch vorgespanntem zweischaligen Membrangasspeicher (gefüllt); Ausschnitt weißer Rahmen oben rechts - teilgefüllt mit beginnender undefinierter Ausformung der Gasspeicherinnenmembran; Legende 1 - Schutzmembran, 2 - Gasspeicherinnenmembran, 3 - Gurthaltesystem, 4 - Über- und Unterdrucksicherung, 5 - hydrostatisches Druckmessverfahren (Gasspeicherfüllstandmesssystem), 6 - Stützluftgebläse mit Stauklappe, 7 - gedämmter Stahlblechbehältermantel, 8 - Paddelrührwerk, 9 - Stützsäule, 10 - Gärmediumspiegel, 11 - Rohbiogasableitung, 12 - Seitenrührwerk, 13 - Stützluftabführung mit Stauklappe

Funktion

Zu Beginn befindet sich der Gasspeicher in einem technisch leeren Zustand mit der auf dem Gurthaltesystem aufliegenden, zusammengefalteten Gasspeicherinnenmembran und einer entsprechend geringen Biogasmenge im Gasspeicher. Durch die Bildung von Biogas im unteren gärmediumführenden Gärbehälterbereich füllt sich der Gasspeicher und die Gasspeicherinnenmembran wird in Abhängigkeit der vorliegenden Gasmenge ausgehoben und getragen.

Das Stützluftgebläse speist angesaugte Umgebungsluft, hier Stützluft benannt, in den Stützluft- und Gasspeicherinnenraum (Abbildung 4, Pos. 5). Dies führt zur Einstellung eines im Stützluft- und Gasspeicherinnenraum anliegenden Überdrucks zur Umgebung und resultierend daraus zu einer permanenten Aus-

formung der äußeren Schutzmembran in Form einer Kugelkalotte. Mit zunehmender Biogasmenge wird der Stützluftraum kleiner und der Nettogasspeicherraum zwischen dem Gurthaltesystem und der Gasspeicherinnenmembran größer (Abbildung 4, Pos. 1). Zwischen den beiden Gasräumen liegt ein Kräftegleichgewicht vor. Der durch den Stützluftvolumenstrom erzeugte Druck wird dabei als Flächenlast über die Gasspeicherinnenmembran und den raumbegrenzenden Gärbehälter auf den Gasspeicherinnenraum übertragen. Während der Befüllung des Gasspeichers formt sich die Gasspeicherinnenmembran undefiniert aus (Abbildung 3, rechter oberer Ausschnitt). Faktoren, die eine Auswirkung auf diese Membranausformung haben lauten:

- Anordnung von Ein- und Ausspeisestellen der Stützluft und des Biogases
- Anlagenaufstellung in Hauptwind- und Himmelsrichtung
- auf der Gasspeicherinnenmembran installierte Aufbauten wie messtechnische Komponenten oder Führungs- resp. Niederhaltersysteme zur Stabilisierung der Membranausformung
- die Konstruktion und Ausführung der Membran selbst

Nach dem Erreichen eines technisch vollen Zustandes des Gasspeichers folgt die Gasspeicherinnenmembran der kugelkalottenförmigen Gestalt der Schutzmembran und liegt in Abhängigkeit der Membranausführung teilweise an dieser an. Im oberen Polkappenbereich muss ein lichter Abstand zwischen der Schutzmembran und der Gasspeicherinnenmembranen sichergestellt werden, der gewährleistet, dass sich die Stützluft über den gesamten Stützluftraum verteilen kann, insbesondere wenn der kleinste Stützluftraum erreicht wird (Abbildung 3).

Über- und Unterdruckereignisse

Bei einer Ablage der inneren Gasspeichermembran auf dem Gurthaltesystem, bei einem leeren Zustand des Gasspeichers, baut sich das o. g. Gasraum-Kräftegleichgewicht ab und die Gasspeicherinnenmembran wirkt als unerwünschte Druckbegrenzung zwischen einem Überdruck im Stützluftraum und einem niedrigeren Druck im Gasspeicher bei fortlaufender Biogasentnahme (Unterdruckereignis). Somit wird der im Stützluftraum vorhandene Überdruck als Flächenlast auf die Gasspeicherinnenmembran, aufliegend auf dem Gurthaltesystem übertragen und über die Schutzmembran, die Stützsäule mit Bodenfundament und die Behälterwand aufgenommen. Der Unterdruck im Gasspeicher wirkt sich mit Ausnahme der Schutzmembran auf die gleichen Anlagenteile aus und stellt einen zu vermeidenden Betriebszustand mit höherer Belastung der Anlagenteile dar.

Wird der Gasspeicher in den technisch vollen Zustand überführt, ist die Gasspeicherinnenmembran vollständig zu einer Kugelkalotte ausgeformt. Bei zusätzlicher Zugabe von Biogas in den entstandenen isochoren Gasspeicher oder einer temperaturbedingten Gasausdehnung im isochoren Gasspeicher steigt ab diesem Moment der Druck und es liegt ein Überdruckereignis vor.

Zur Vermeidung von Schäden der Biogasanlage durch zu hohe Druckbelastungen wird für beide Druckereignisse eine Sicherheitseinrichtung, die Über- und Unterdrucksicherung eingesetzt. Diese löst ab einem relativen Überdruck von ca. 5 hPa oder einem relativen Unterdruck von < 0 hPa aus und bläst bei Überdruck Biogas aus dem Gasspeicher ab bzw. zieht bei Unterdruck Umgebungsluft in den Gasspeicher ein. Bei dem Einziehen von Luft in den Gasspeicher kann es in Abhängigkeit der Luftmenge und der sich ergebenden Gaskonzentration zur Überschreitung der unteren Explosionsgrenze (UEG) sowie Einstellung einer explosionsfähigen Atmosphäre führen. Durch diese genannten Aspekte wird die Notwendigkeit eines angepassten Gasspeicherinnendruckes hervorgehoben.

Stützluftsystem

Das Stützluftsystem ist ein zur Atmosphäre offenes System durch einerseits geplante Lecks wie Membrandurchführungen für bspw. Messtechnik oder Stauklappen ein- resp. ausspeiseseitig zum Stützluftraum. Andererseits gibt es ungeplante Lecks wie undichte Stellen durch Beschädigungen oder fehlerhafte Montage an der außenliegenden Schutzmembran. Durch die Stellung der oft masse- oder federbelasteten Stauklappen kann der austretende Stützluftvolumenstrom und damit verbunden der Gasspeicherinnendruck auf einen Betriebspunkt eingestellt werden. Kurzzeitige Druckschwankungen durch bspw. Witterungseinflüsse wie Windlasten auf der Schutzmembran können durch die bewegliche Stauklappe somit ausgeglichen werden.

Gasspeichervolumina

Der Doppelmembrangasspeicher wird aufgrund seiner integrierten Bauweise direkt auf dem Gärbehälter in zwei unterschiedliche gasführende Bereiche unterteilt. Zum einen gibt es das Bruttogasspeichervolumen, das die gesamte Gasmenge im Speicher fasst. Zum anderen gibt es das Nettogasspeichervolumen. Dieses Volumen steht dem Speicher als variables Nutzvolumen durch die Änderung der Gasspeicherinnenmembranausformung zwischen den Zuständen technisch leer und technisch voll zur Verfügung. Abbildung 4 zeigt die Bereiche der genannten Volumina.

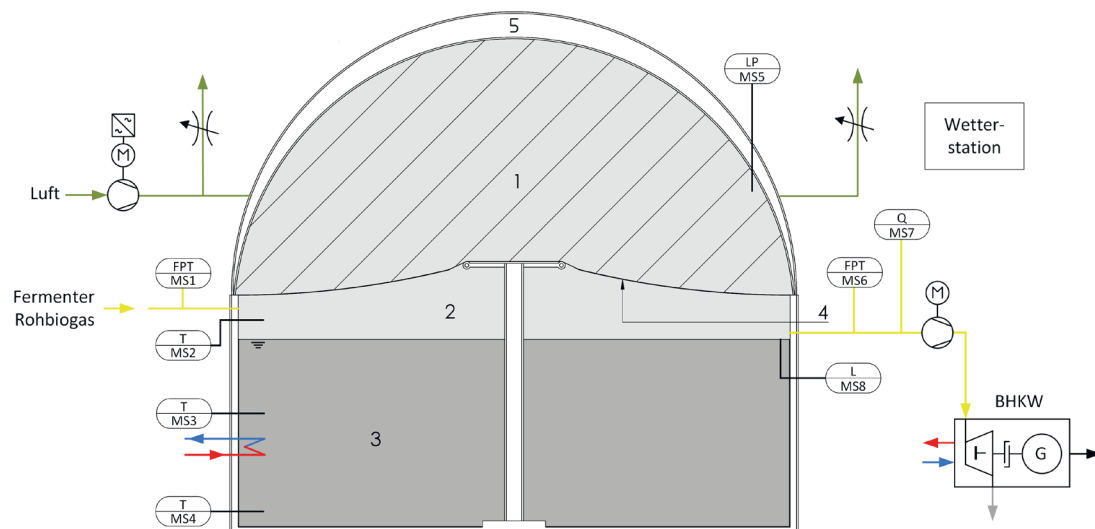


Abbildung 4: Darstellung unterschiedlicher Gasspeicherbereiche im Zustand technisch voll; 1 – variables Nettogasspeichervolumen (hellgrau schraffiert); 2 – variables Bruttogasspeichervolumen (hellgrau und hellgrau schraffiert); 3 – Gärmediumvolumen (dunkelgrau); 4 – Gurthaltesystem; 5 – variables Stützluftvolumen (weiß); Legende Messtechnik – F Volumenstrom, L Füllstand, MS Messstelle, P Druck, Q Gaskonzentration und T Temperatur; Wetterstation

Die Nettogasspeicherkapazität stellt hierbei die speicherfähige und nutzbare Biogasmenge dar. In Abhängigkeit von Temperatur und Druck ändert sich die vorhandene Nettogasspeicherkapazität bei gleichbleibendem Nettogasspeichervolumen. Nach der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase benötigt dieselbe Gasmenge bei gleichem Druck und höherer Temperatur mehr Volumen. Somit nimmt bei einer zunehmenden Gasspeicherinnentemperatur die Dichte des sich erwärmenden und ausdehnenden Gases ab und die Nettogasspeicherkapazität sinkt, da weniger Biogas in das Nettogasspeichervolumen gefasst werden kann.

Das Ansprechverhalten dieses Gasspeichers ist im Hinblick auf Druck und Temperatur sowie auf die zeitabhängige Ausformung der Gasspeicherinnenmembran und dem daraus resultierenden Gasspeicherfüllstand zu beschreiben. Wesentliche Erkenntnisse zum Ausformungsverhalten wurden oben dargestellt. Es ergibt sich beim Gasspeicherinnendruckverlauf ausgehend von einem technisch leeren Zustand ein konstanter Druckbereich über den gesamten Gasspeicherfüllstand bis zum Erreichen des technisch vollen Zustandes. Träge Druckänderungen durch bspw. Solarstrahlung, Anstieg der Umgebungstemperatur oder Änderungen des Luftdrucks führen somit nicht zu einer kurzzeitigen Druckerhöhung, da die Ausformung der Gasspeicherinnenmembran die Ausdehnung des Gases kompensiert. Durch erhebliche Windlasten können hingegen kurzzeitige Druckspitzen im Druckverlauf erzeugt werden, wenn die Stauklappen und der dadurch eingestellte Stützluftvolumenstrom und die Ausformung der Gasspeicherinnenmembran einen Ausgleich nicht gewährleisten. Aufgrund der Einflussnahme auf den Gasspeicherinnendruck durch die Anpassung des Stützluftvolumenstromes können somit mehrere korrespondierende Gasspeicher so aufeinander eingestellt werden, dass ein ausreichender Druckunterschied zwischen den Gasspeichern und den Konversionsaggregaten für eine optimale Ausnutzung der Nettogasspeicherkapazität realisiert werden kann (KUBE 2018). In Abhängigkeit der Anlagendimensionen kann es bei bspw. langen oder verwinkelten Leitungsverläufen oder ungeeigneten Leitungsinneindurchmessern zu einem zu hohen Druckverlust zwischen den Gasspeichern führen. In diesem Fall ist zur Sicherstellung eines erforderlichen Gasstromes eine erzwungene Konvektionsströmung des Rohbiogases durch Gebläse oder Verdichter einzustellen.

Füllstandmessverfahren

In der praktischen Anwendung zur Messung von Biogasspeicherfüllständen verschiedener Gasspeicherbauformen kommen im Wesentlichen die folgenden drei Verfahren zum Einsatz:

- hydrostatische Druckmessverfahren (Schlauchwaage-Verfahren)
- Seilzugmessverfahren
- Gasspeicherinnendruckmessverfahren

Diese Verfahren sind die am weitesten verbreiteten Messmethoden. Das Ultraschallmessverfahren zur direkten Erfassung der Membranausformung einer Gasspeicherabdeckung ist eine vergleichsweise selten eingesetzte Variante. Zur Vollständigkeit wird das Radarmessverfahren erwähnt, das analog zur Ultraschallmessung zur Lageüberwachung von Oberflächen, Flüssigkeitsspiegeln oder Membranen eingesetzt werden kann. Im Folgenden wird auf die drei relevanten Verfahren näher eingegangen.

Hydrostatisches Druckmessverfahren

Bei diesem System handelt es sich um einen mit einem Wasser-Glykol-Gemisch gefüllten Schlauch, der auf einer Seite verschlossen und auf der anderen Schlauchseite mit einem Messwertumformer

ausgestattet ist. Der Messwertumformer wird an der Außenseite der Behälterwand befestigt und stellt den niedrigsten Punkt des Messsystemaufbaues dar. Der Schlauch wird tangential ausgehend von der Behälterwanddurchführung auf die Gasspeicherinnenmembran geführt und zur Polkappe verlegt. Im Bereich der Polkappe wird das Schlauchende mit Ösen befestigt. Durch den Hub der Membran bei zunehmendem Speicherfüllstand stellt sich ein veränderter hydrostatischer Druck im Schlauch ein, der vom Messwertumformer erfasst wird. Durch eine Umrechnung des Wassersäulendruckes kann der höchste Punkt des Schlauches ermittelt werden und somit auf den Füllstand des Gasspeichers geschlossen werden.

Seilzugmessverfahren

Bei dem Seilzugverfahren handelt es sich um ein einfaches mechanisches Verfahren, das hauptsächlich bei ein-, zwei- und dreischaligen Membrangasspeichern sowie bei liegenden Gassäcken verbaut wird. Der Messaufbau umfasst ein Seil und i. d. R. eine Gegenmasse. Das Seil wird an der Oberkante der Behälterwand befestigt und über wenige Ösen entlang der Oberseite der Gasspeicherinnenmembran und der Polkappe auf den diametral positionierten Schutzmembrandurchbruch geführt, sodass eine Relativbewegung des Seiles zur Membranoberfläche in Seilausrichtung sichergestellt ist. Auf der gegenüberliegenden Seite ist nach dem Durchbruch ein vertikales Führungsrohr angeordnet. Eine am freien Seilende befestigte Gegenmasse wird in dem Führungsrohr konzentrisch geführt. Die Gegenmasse wird in der vertikalen Lage überwacht und sorgt für eine erforderliche Zugvorspannung des Seiles, um ein Verklemmen zu vermeiden und ein straffes Anliegen an der Membranoberfläche sicherzustellen. Durch die Ausformung der Gasspeicherinnenmembran in Abhängigkeit der Gasmenge passt sich das Seil an die Membrangestalt an. Im vollen Speicherzustand folgt der Verlauf des Seiles der Kugelkalottenform der Gasspeicherinnenmembran und benötigt die größte Seillänge. Im leeren Zustand ist ein relativ flacher Seilzugverlauf zu erkennen und die geringste Seillänge erforderlich. Die sich einstellende Seillängenänderung wird auf die außenliegende Gegenmasse übertragen und mündet in der vertikalen Lageänderung der Masse in Abhängigkeit des Füllstandes. Die Erfassung des Füllstandwertes kann durch verschiedene Messvarianten der Gegenmasselageerfassung oder der Seillängenänderung außerhalb des Stützlufttraumes erfolgen. Dies ist beispielsweise durch einen Ultraschallsensor möglich, der die Gegenmasse in einem vertikalen Führungsrohr im Abstand (lichtes Innenmaß zwischen Masse und Sensor) permanent vermisst.

Gasspeicherinnendruckmessverfahren

Bei diesem Verfahren wird der Gasspeicherinnendruck zum Rückschluss auf den Gasspeicherfüllstand erfasst. Dieses Verfahren ist für Gasspeicherarten geeignet, die bei der Zunahme der gefassten Gasmenge einen Anstieg des Gasspeicherinnendruckes erreichen. Wie unter dem Abschnitt „Kennlinie der Füllstandmessverfahren“ dargestellt, ist dieses Verfahren für pneumatisch vorgespannte Gasspeichersysteme mit einem konstanten Druckverlauf bei Zunahme der Gasmenge nicht geeignet.

Technische Anforderungen, Zustandsgrößen, Einflussfaktoren

Die Anforderungen an Gasspeichersysteme sind im Rahmen einer bedarfsgerechten Biogasbereitstellung höher als bei dem Normalbetrieb einer konventionell betriebenen Biogasanlage mit konstanter Vor-Ort-Verstromung. Es muss ein Messsystem zur Ermittlung des Gasspeicherfüllstandes vorhanden sein, das zum einen für die eingesetzte Bauform geeignet ist und zum anderen eine ausreichende

de Genauigkeit sowie eine Dokumentierbarkeit der Messungen aufweist. Die Messgenauigkeit muss dabei in einem Bereich liegen, mit dessen Hilfe detaillierte Aussagen für die Betriebsführung der Anlage getroffen werden können. Eine Nachweisbarkeit der Füllstände sollte durch eine persistente Aufzeichnung, Speicherung und Verarbeitung der Messwerte ermöglicht werden. Die Speicheranlage muss auf die Biogasbildungsrate, einwirkende Witterungsbedingungen sowie auf die variable Verwertung und dafür erforderliche Gasmenge ausgelegt und betriebssicher ausgeführt sein. Die Ein- und Ausspeisung von Biogas nimmt im Gasspeichersystem eine wichtige Rolle ein, da im Gegensatz zur konventionellen Anlagenführung betriebsbedingte hohe und kurzzeitig anfallende Volumenströme auftreten und ein prozesssicherer Betrieb gewährleistet werden muss. Bei einer Zusammenschaltung mehrerer Gasspeicher muss eine Vereinheitlichung der Speicherstände sichergestellt werden, um Verluste zu minimieren und die gesamte Speicherkapazität zur Verfügung zu stellen (KUBE 2018). Eine hohe Anlagendichtheit und die Vermeidung von Zündquellen sind für einen sicheren und effizienten Betrieb erforderlich. Der Schutz gegen Über- und Unterdruck im Gasspeicherbereich und damit verbunden eine ausreichend ausgelegte Stützluftversorgung bei pneumatisch vorgespannten Gasspeichersystemen ist sicherzustellen (STUR et al. 2018). Tabelle 1 sind die allgemeinen Anforderungen an Biogasspeichersysteme in Anlehnung an das Merkblatt DWA-M 377 aufgeführt (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL 2016).

Tabelle 1: Übersicht zu den allgemeinen Anforderungen an Biogasspeichersysteme in Anlehnung an das Merkblatt DWA-M 377 (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL 2016)

Allgemeinen Anforderungen an Biogasspeichersysteme
Hohe Speicherkapazität von ca. 12 h (MAUKY et al. 2015; BARCHMANN et al. 2016)
Nachweis- resp. Dokumentierbarkeit
Füllstand in ausreichendem Maß messbar
Geringes Maß an Gasdurchlässigkeit (Methan-Permeation von Membranspeichersystemen aus bspw. EPDM oder PVC-beschichtetem Polyestergewebe $< 500 \text{ mL (m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ 1.000 hPa}^{-1})$ hier abweichend von DIN 1343 bei 23 °C (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL 2017)
Geruchsdicht
Gasspeicherdichtheit
Witterungsbeständig (temperatur-, UV-beständig, Wind-, Regen-, Schneelast durch Material-festigkeit und Bauform, sichergestellte Beweglichkeit von Anlagenteilen bei Frost)
Beständig gegen pflanzliche Ablagerungen, wie bspw. Laub
Schutz vor Gasüber- und -unterdruckereignissen
Chemisch beständig gegen Spurengase und Reaktionsprodukte wie Säuren oder elementarer Schwefel
Biologisch beständig gegen Mikroorganismen
Mechanisch beständig gegen Belastungen wie Zug, Druck und Faltenbildung (Knick-, Rissgefahr), Scheuerstellen und Verklemmen (durch bspw. Seil)
Schwer entflammbar
Elektrische Ableitfähigkeit (Zündquellenvermeidung)
Umgang mit auftretenden Gasvolumenströmen (maximale Produktion, Entnahme)
Einsatzfähig im Verbund mit mehreren geschalteten Speichern
Anwendungsspezifische Auslegung der Stützluftversorgung mit Stauklappe

Zustandsgrößen

Im Rahmen der Untersuchungen wurden folgende Zustandsgrößen identifiziert und in einer Übersicht dargestellt:

- Druck p in hPa
- Volumenstrom \dot{V} der Gas- und Substratmengen in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$
- Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$
- Gasspeichervolumen V_{GS} in m^3 (bspw. für Brutto-, Netto- oder Stützluftvolumen)
- Gasspeicherfüllstand L_{GS} in % oder m^3
- relative Feuchte φ in % rel.
- Gaskonzentration c in %
- BHKW-Feuerungswärmeleistung P_{FWL} in kW

Einflussfaktoren

Bei der Bestimmung der Nettogasspeicherkapazität haben folgende Faktoren einen Einfluss auf das Ergebnis:

- Volumenstrommessung (messtechnische Ausführung)
- Witterungsbedingungen, siehe Abschnitt „Einfluss von Witterungsbedingungen auf die Nettogasspeicherkapazität“
- Temperatur und Druck im Gasspeicher
- Gasbildung im Gärbehälter
- Ein- und Ausspeisung des Gärmediums (Fütterung und Füllstand Gärmedium)
- Wirkungsgrad des Konversionsaggregates
- Lastzustand des Verbrennungsmotors des BHKW,
- Einsatz zusätzlicher Betriebsmittel wie Zündöl
- Dauer der Gasausspeisung (Entnahmedauer bei Versuch)

Dabei sind die Faktoren Gastemperatur und die damit verbundene Gasdichte, der Wirkungsgrad des Konversionsaggregates, sowie die Gasbildung nur eingeschränkt oder kaum an der Forschungsbiogasanlage bestimmbar. Dieser Umstand ist jedoch vergleichbar mit den realen Bedingungen an Praxisanlagen aufgrund des geringen Grades an messtechnischer Ausstattung und den betriebsorganisatorisch engen Spielraum für die Durchführung von Versuchen im Normalbetrieb. Somit muss ein Kompromiss zwischen der Anwendbarkeit der Methode auf einer BGA und der Belastbarkeit der Werte in Hinblick auf die Genauigkeit gefunden werden.

Ziele der vorliegenden Veröffentlichung sind daher:

- Der Vergleich dreier Methoden zur praxisnahen Ermittlung des nutzbaren Volumens resp. der Speicherkapazität von Gasspeichersystemen,
- Vergleich des Anzeigeverhaltens unterschiedlicher Gasspeicherfüllstandmessverfahren und
- die Untersuchung des Einflusses der Witterungsbedingungen auf die Gasspeicherkapazität.

Material, Methoden und Durchführung

In diesem Kapitel werden die verwendeten Vorrichtungen beschrieben und die durchgeführten Methoden in ihrer Anwendung dargestellt.

DBFZ-Forschungsbiogasanlage (FBGA)

Die DBFZ-Forschungsbiogasanlage befindet sich auf dem Institutsgelände des DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum in Leipzig (Deutschland). Die beiden zentralgerührten Hauptgärbehälter haben ein Arbeitsvolumen von max. 190 m³. Darüber hinaus sind am Standort ein Pfropfenstromreaktor (53 m³ Arbeitsvolumen), ein optionaler Vorgärbehälter (88 m³ Arbeitsvolumen), ein Nachgärbehälter (215 m³ Arbeitsvolumen), ein Güllebehälter (174 m³ Reaktionsvolumen) sowie ein Gärrestlagerbehälter (215 m³) vorhanden. Der Nachgärbehälter und der Gärrestlagerbehälter sind mit einem Doppelmembrangasspeicher ausgestattet. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Nachgärbehälters mit integriertem pneumatisch vorgespanntem zweischaligem Membrangasspeicher, der im Folgenden untersucht wurde. Weiterhin vorhanden ist ein 75 kW Zündstrahlmotor-BHKW (Tabelle 2) und eine Gasfackel. Abbildung 4 gibt eine Übersicht über die eingesetzte Messtechnik.

Tabelle 2: Übersicht der eingesetzten Messtechnik

Anwendung	Messprinzip	Messbereich
Messstrecke Gasmenge und Volumenstrom (MS1 und MS6) ¹⁾	Differenzdruck, Staudrucksonde mit Messumformer	4 bis 20 mA, 0,02 bis 2,53 hPa, 1,03 bis 11,86 m s ⁻¹ , 8,7 bis 100 m ³ h ⁻¹
Messstrecke Gasmenge und Temperatur (MS1 und MS6) ¹⁾	PT 100	4 bis 20 mA, -50 bis 50 °C
Messstrecke Gasmenge und Absolutdruck (MS1 und MS6) ¹⁾	Drucktransmitter	4 bis 20 mA, 0 bis 2.500 hPa
Temperatur im Gasraum und Flüssigphase (MS2, MS3 und MS4) ¹⁾	PT 100	4 bis 20 mA, 0 bis 100 °C
Druck im Gasspeicher (MS5) ¹⁾	Drucktransmitter	4 bis 20 mA, -25 bis 25 hPa
Füllstand Gärmedium (MS8) ¹⁾	hydrostatisch, Drucktransmitter	4 bis 20 mA, 10 bis 1.000 hPa,
Gasspeicherfüllstand (MS5) ¹⁾	Wegmessung, Ultraschall	4 bis 20 mA, 0 bis 3,5 m
Gasspeicherfüllstand (MS5) ¹⁾	hydrostatisch, Drucktransmitter	4 bis 20 mA, 0 bis 1.000 hPa, 0 bis 9 m
Pyranometer, Solarstrahlung (Wetterstation) ¹⁾	Thermosäule	-200 bis 2.000 W m ⁻²
Multi-Wettersensorik		
Windgeschwindigkeit	Ultraschall	0,01 bis 60 m s ⁻¹ ,
Windrichtung	Ultraschall	0 bis 360°,
Niederschlag	Doppler-Radar	0,001 bis 100 mm h ⁻¹
Helligkeit	Fotosensor	1 bis 150 Lux
Temperatur	integrierter Hydro-Thermosensor	-40 bis 80 °C,
Feuchte	integrierter Hydro-Thermosensor	0 bis 100% rel. Feuchte
Druck (Wetterstation) ¹⁾	piezo-resistiver Drucksensor	300 bis 1.100 hPa

¹⁾ Messstellenname, Position der Messstellen in Abbildung 4 dargestellt.

Zur Bilanzierung der am Gasspeicher ein- und austretenden Gasmengen (Referenzmethode) befinden sich jeweils am Eingang und Ausgang eine Gasvolumenstrommessstrecke. Die Messstrecken besteht aus einer Staudrucksonde, einem Temperatursensor und einem Absolutdrucksensor. Im Bereich der Messstrecke ist eine Gasprobenentnahmestelle angeordnet, an der automatisch, diskontinuierlich Proben entnommen werden und die Gaszusammensetzung in einem Gasanalysestystem bestimmt wird. Die Messstrecken sind komplett eingehaust, isoliert und mit einer Begleitheizung versehen, um Ungenauigkeiten durch äußere Umwelteinflüsse zu vermeiden. Innerhalb des Gasspei-

chers werden der Relativdruck und die Gastemperatur erfasst. Der Füllstand des Gärmediums wird hydrostatisch mittels eines Referenzdrucksensors bestimmt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Technische Daten BHKW (Zündstrahl) unter der Annahme Volllastbetrieb - Werksangaben

Parameter	Wert
Feuerungswärmeleistung	187 kW
Elektrische Leistung	75 kW
Thermische Leistung	70 kW
Elektrischer Wirkungsgrad	40%
Thermischer Wirkungsgrad	37,5%
Verbrauch Zündöl (RME)	1 bis 2 L h ⁻¹

Um das Messverhalten des Gasspeicherfüllstandes genauer zu untersuchen wurde die standardmäßig vorhandene Messtechnik erweitert. Das aus einem Seilzug bestehende Seilzugmesssystem wurde auf 6 um 60° versetzte Seilzüge erweitert. Dabei sind die Seile mit variabel einstellbaren Massen ausgestattet. Die Seile sind an einem Ende nicht wie üblich am Behälterrand, sondern radial von der Polkappe der Gasspeicherinnenmembran nach außen verlaufend befestigt. Die Längenänderung wird bei drei um 120° versetzten Seilzügen mittels Ultraschallsensor kontinuierlich erfasst. Bei den anderen drei Seilzügen ist ein diskontinuierliches manuelles Ablesen an einer sich am Führungsrohr befindlichen Skala möglich. Des Weiteren sind auf der Gasspeichermembran zwei gegenüberliegend angeordnete Schlauchwaagen angebracht. Abbildung 5 zeigt die Lage der Messsysteme in der Draufsicht.

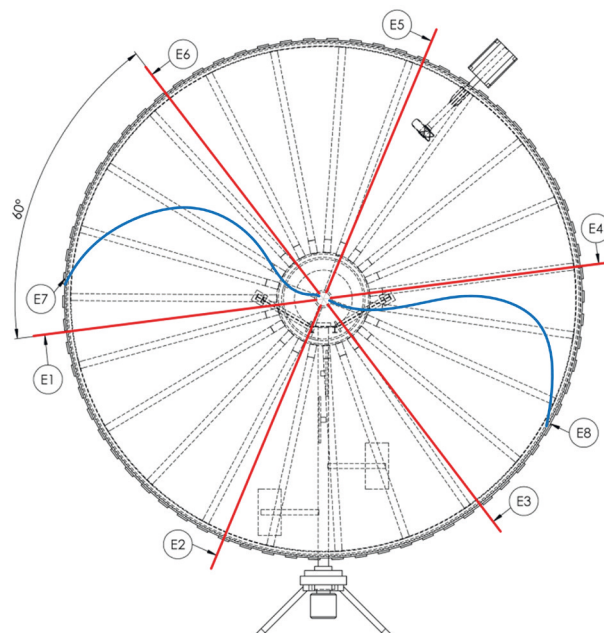


Abbildung 5: Draufsicht Gasspeicherdach; E1 bis E6 Lage/Verlauf der einzelnen Seilzüge des Seilzugmessverfahrens in rot; E7 und E8 Lage/Verlauf der Flüssigkeitsschläuche beider hydrostatischen Druckmessverfahren in blau

Zur Untersuchung des Wittereinflusses auf das Gasspeicherverhalten wurde eine Kombiwettermessstation installiert, bestehend aus Pyranometer (Kipp & Zonen, SMP11) und Multisensoreinheit

(RTS Automation Vertriebsgesellschaft, Clima Sensor US NHTFB). Der Gasspeicher ist mit einer Über- und Unterdrucksicherung nach dem Prinzip einer Wassertasse ausgerüstet. Diese löst bei einem relativen Unterdruck $\leq -2,5$ hPa und ab einem relativen Überdruck > 5 hPa aus.

Der Gasspeicher wird mit folgenden Methoden auf Dichtigkeit überprüft. Einmal jährlich wird der Anschlussklemmring zwischen Behälter und Gasspeicher mit schaumbildendem Mittel eingesprüht, um durch evtl. Blasenbildung Gasleckagen in diesem Bereich zu entdecken. Zusätzlich wird der Gasspeicher zu diesem Zweck mit einer Infrarotkamera gescannt. Einmal täglich wird die Methankonzentration in der Stützluft mit einem methansensitiven Messgerät am Auslass der Stützluft festgestellt.

Methoden zur Volumen- und Kapazitätsbestimmung

Eines der Ziele dieses Artikels ist die Darstellung von Einflüssen auf den Biogasspeicherbetrieb und die Anwendung von drei zu vergleichenden Methoden zur Volumenermittlung von integrierten zweischaligen pneumatisch vorgespannten Membrangasspeichersystemen und der Bestimmung der Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Nettogasspeicherkapazität zur Lagerung von Biogas. Zu diesem Zweck werden die folgenden drei Methoden gegenübergestellt (Abbildung 6):

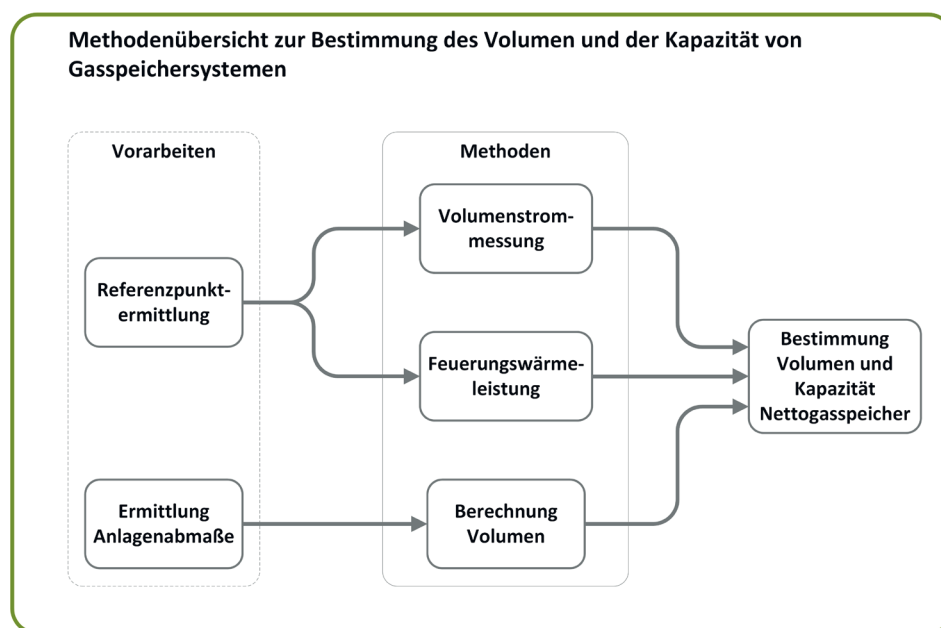


Abbildung 6: Übersicht zu den drei gegenübergestellten Methoden zur Bestimmung der Gasspeicherkapazität und -volumen

- M1** Volumenstrommessung - messtechnisch umfangreiche Referenzmethode zur Ermittlung der Nettogasspeicherkapazität
- M2** Feuerungswärmeleistung - praxisorientierte, methanverbrauchsbasierte Methode zur Ermittlung der Nettogasspeicherkapazität
- M3** Berechnung Volumen - theoretischen Berechnungsmethode zur Ermittlung des Nettogasspeichervolumens

Die beiden Methoden M1 Volumenstrommessung und M2 Feuerungswärmeleistung müssen zeitgleich durchgeführt werden, um für die Versuchsauswertung gleiche Ausgangsbedingungen vorliegen zu haben.

Methode M1 – Volumenstrommessung

Zur Ermittlung der Nettogasspeicherkapazität mittels der Biogas-Volumenstrommessmethode wird der Doppelmembrangasspeicher des Nachgärbehälters, ausgehend von einem technisch leeren Zustand, gefüllt und in einen technisch vollen Zustand überführt. Abschließend wird der Gasspeicher wieder in den Zustand technisch leer gefahren. Um eine Messbarkeit, Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit schaffen zu können, werden zunächst zwei Referenzpunkte für den Zustand technisch leer und technisch voll des integrierten Gasspeichers beschrieben und messtechnisch nachgewiesen. Die beiden Referenzpunkte umfassen dabei den gesamten Bereich der Nettogasspeicherkapazität. Durch die Erfassung der ein- resp. ausgespeisten Biogasmenge V_{Ein} und V_{Aus} mithilfe der Volumenstromsensoren MS1 und MS6, deren Differenz (Gleichung 1), mit Bezug auf das erfasste Volumen, und der Versuchsdauer der einzelnen Phasen, wird eine spezifische Biogasbildungsrate \dot{V}_{BB} ermittelt (Gleichung 2). Unter Berücksichtigung der Dauer für die jeweiligen Phasen der Pause und Ausspeisung, wird aus dem Quotient der spezifischen Biogasbildungsrate und dieser beiden addierten Dauern die gebildete Biogasmenge $V_{BB,P,A}$ während der Pause und Ausspeisung in Gleichung 3 festgehalten. Durch den Abzug der Biogasmenge $V_{BB,P,A}$ von der Ausspeisemenge V_{Aus} in Gleichung 4, wird auf die Nettogasspeicherkapazität $K_{GS,N}$ geschlossen.

$$\Delta V = V_{Aus} - V_{Ein} \quad \text{Differenz des aus- und eingespeisten Biogasvolumens} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\dot{V}_{BB} = \frac{\Delta V}{t_G} \quad \text{spezifische Biogasbildungsrate im Gärbehälter} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$V_{BB,P,A} = \frac{\dot{V}_{BB}}{t_p + t_A} \quad \text{während Pause und Ausspeisung gebildete Biogasmenge} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$K_{GS,N} = V_{Aus} - V_{BB,P,A} \quad \text{Nettogasspeicherkapazität} \quad (\text{Gl. 4})$$

Vorgehen zur Referenzpunktermittlung

Ziel dieser Untersuchung ist die Beschreibung und der messtechnische Nachweis der Referenzpunkte für den Zustand technisch leer und den Zustand technisch voll des integrierten Gasspeichers der FBGA.

Der Versuch wird in 2 Phasen zur Abbildung der beiden Gasspeicherzustände unterteilt. Für eine spätere Übertragbarkeit auf weitere Praxisanlagen wird auf eine Durchführung in Anlehnung an den Normalbetrieb der Anlage Wert gelegt. In der Phase 1 wird der Zustand technisch voll angefahren. Analog wird in der Phase 2 der Zustand technisch leer eingestellt. Im Folgenden werden die Anforderungen an die zu untersuchende Anlage genannt:

- Gasspeicherinnendruckmessung mit einer Genauigkeit von mindestens 0,1 hPa und einer Intervallzeit von mindestens 5 s

- Prüfung der Einstellungen der Über- und Unterdrucksicherung (Grenzwert zum automatischen Auslösen der Über- und Unterdrucksicherung im Unterdruckereignis bei $p_{\text{rel}} \leq -2,5$ hPa und im Überdruckereignis bei $p_{\text{rel}} > 5$ hPa)
- Gasleitungsschaltung mit ausschließlichem Abzug des in dem Gasspeicher befindlichen Rohbiogas direkt in ein Konversionsaggregat
- Sicherstellung der Dokumentierbarkeit der erzeugten Strommenge während BHKW-Betrieb
- Volumenstrommessung der ein- resp. ausgespeisten Rohbiogasmenge im Gasspeicher
- Biogastemperaturmessung
- Konstanter Gärmediumspegel im Gärbehälter
- Analyse der Biogaskonzentration, insbesondere von Methan und Kohlenstoffdioxid, durch Gasanalysegerät

Phase 1 – Einstellung des Referenzpunktes „technisch leer“

Während dieser Phase 1 ist die FBGA so geschaltet, dass der gesamte gebildete Rohbiogasstrom aus den anderen Gärbehältern der FBGA in den zweiten Gasspeicher des Gärrestlagers gespeist wird. Das Konversionsaggregat entzieht unter Vollast das für den Betrieb notwendige Biogas aus dem Gasspeicher des Gärbehälters und entleert den gefüllten Speicher somit. Wenn der Gasspeicherinnendruck nach einem konstanten Verlauf des Betriebsdruckes von ca. 2,7 hPa abfällt und 0,5 hPa erreicht, sowie bei der Sichtkontrolle am Sichtglas der Schutzmembran die Gasspeicherinnenmembran auf dem Gurthaltesystem leicht durchdringend aufliegt, sind die Bedingungen für den Zustand technisch leer für den Gasspeicher erfüllt. Damit ist der Referenzpunkt technisch leer beschrieben und anlagen- resp. messtechnisch nachgewiesen.

Phase 2 – Einstellung des Referenzpunktes „technisch voll“

In Phase 2 wird die FBGA daraufhin eingestellt, dass der gesamte gebildete Rohbiogasstrom der FBGA in den Gasspeicher des Gärbehälters gespeist wird. Alle weiteren gasführenden Armaturen des Gärbehälters sind geschlossen, damit kein Gas aus dem Gasspeicher entweicht. Zum Ende der Befüllung muss der Gasspeicherinnendruck den Wert von 4,5 hPa erreichen und sollte diesen Wert nicht überschreiten. Zur Unterstützung wird der Verlauf des Gasspeicherinnendruckes hinzugezogen. Ab dem Moment des Anstieges des Gasspeicherinnendruckes aus dem konstanten Verlauf heraus, kann auf eine vollständig gefüllte kalottenförmige Speichermembran geschlossen werden. Nach der Sichtprüfung durch das in der Schutzmembran eingebundene Sichtglas muss die Gasspeichermembran vollständig am Sichtglas anliegen. Sind diese genannten Bedingungen erfüllt, ist der Zustand technisch voll erreicht und nachgewiesen.

Methode M2 - Feuerungswärmeleistung

Bei dieser Methode wird die in dem Versuchszeitraum erzeugte elektrische Wirkarbeit W_{el} erfasst, um unter Verwendung eines angenommenen elektrischen Wirkungsgrades η_{el} des Konversionsaggregates, der verbrauchten Zündölmenge V_Z , sowie des Heizwertes für Methan $H_{i,M}$, Zündöl $H_{i,Z}$ und der gemessenen Methankonzentration c_M im Biogas auf einen Biogasverbrauch schließen zu können. Mit dem Biogasverbrauch kann anschließend die Biogasmenge V_{BG} , sowie die Nettogasspeicherkapazität $K_{\text{GS,N}}$ ermittelt werden. Zur Berechnung der verbrauchten Biogasmengen wird folgende Gleichung 5 verwendet.

$$V_{BG} = \frac{\left(\frac{W_{el}}{\eta_{el}}\right) - (V_Z \cdot H_{i,Z})}{H_{i,M} \cdot c_M} = K_{GS,N} \quad (\text{Gl. 5})$$

Beim Abzug des Biogases aus dem Speicher muss sich das BHKW in einem warmgelaufenen Betriebszustand befinden und anschließend dem Gasspeicher zugeschaltet werden. Somit wird sichergestellt, dass keine zum Normalbetrieb abweichenden Biogasverbrauchswerte (Kaltstartphase) erfasst werden. Dazu sind auf der zu untersuchenden BGA einerseits ein zum Gasspeicher separater Gaspuffer erforderlich. Andererseits ist die Möglichkeit zur Einstellung einer Rohrschaltung erforderlich, die keinen zeitgleich parallelen Biogasabzug bspw. durch weitere Konversionsaggregate aus dem Gasspeicher während der Versuchsphase erlaubt.

Methode M3 - Berechnung Volumen

Damit die Grundlage für eine Vergleichbarkeit geschaffen wird und eine Plausibilitätsprüfung der gemessenen Werte umgesetzt werden kann, wird eine theoretische Ermittlung des Gasspeichervolumens im Normzustand durchgeführt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. 1990). Dazu werden folgende Annahmen getroffen. Zur exakten Beschreibung der Gasspeicherinnenmembranausformung im technisch leeren resp. vollen Zustand sind keine geeigneten Messverfahren verfügbar. Die Ausformung der Membran wird daher unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten und der Ermittlung in einem 3D-CAD-System beschrieben. Dabei spielt der Gurtverlauf des Gurthaltesystems im axialsymmetrischen Schnitt ausgehend von dem Befestigungsring der Stützsäule hin zur Oberkante des Behältermantels eine wichtige Rolle. Durch die aufgespannte hyperboloide Gestalt des Gurthaltesystems wird der untere Bereich des Nettogasspeichervolumens bestimmt. Die weiteren Angaben sind den Planungsunterlagen entnommen.

Im Folgenden werden die Parameter und Gleichungen zur Berechnung der Volumina dargestellt:

d	Innendurchmesser Behältermantel Gärbehälter
$h_{K,S}$	lichtes Innenmaß zwischen Spiegel Gärmedium und Kalotte der Gasspeicherinnenmembran
h_K	Höhe Kalotte der Gasspeicherinnenmembran
V_Z	Volumen zylindrischer Behältergasbereich (Freibord)
V_H	Volumen Hyperboloid
V_K	Volumen Kalotte der Gasspeicherinnenmembran im Zustand technisch voll
$V_{GS,B}$	Bruttogasspeichervolumen
$V_{GS,N}$	Nettogasspeichervolumen
$V_{GS,K}$	temperatur- & druckkorrigiertes Nettogasspeichervolumen
pN	Normdruck (1013,25 hPa)
N	Normtemperatur (273,15 K)
p_{mess}	gemessener Druck
ϑ_{mess}	gemessene Temperatur
p_W	Partialdruck des Wasserdampfes
A, B, C	Parameter der Antoine-Gleichung

$$V_K = \pi \frac{h_K^2}{3} (1,5 d - h_K) \quad \text{Volumen der Kalotte (kalottenförmige Gasspeicherinnenmembran)} \quad (\text{Gl. 6})$$

$$V_Z = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot h_{K,S} \quad \text{Volumen des zylindrischen Behältergasbereiches (Freibord)} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$V_H = V_K \cdot 0,045 \quad \text{Volumen des Hyperboloids im Zustand technisch leer, ermittelt durch das 3D-CAD-System} \quad (\text{Gl. 8})$$

$$V_{GS,N} = V_K - V_H \quad \text{Nettogasspeichervolumen} \quad (\text{Gl. 9})$$

$$V_{GS,B} = V_K + V_Z \quad \text{Bruttogasspeichervolumen} \quad (\text{Gl. 10})$$

$$V_{GS,K} = \frac{V_{GS,N} \cdot p_N \cdot (\vartheta_{mess} + 273,15 \text{ K})}{(p_{mess} - p_w) \cdot T_N} \quad \text{Temperatur- und druckkorrigiertes Nettogasspeichervolumen} \quad (\text{Gl. 11})$$

$$p_w = 10^{A - \frac{B}{C + \vartheta_{mess}}} \quad \text{Partialdruck des Wasserdampfes mittels Antoine-Gleichung} \quad (\text{Gl. 12})$$

$$\begin{aligned} \text{mit: } A &= 7,19621 \\ B &= 1730,63 \\ C &= 233,436 \end{aligned}$$

Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Methoden M1 bis M3 in ihrer Anwendung aufgezeigt und diskutiert. Weiterhin wird das Anzeigeverhalten und die Eignung der untersuchten Gasspeicherfüllstandmessverfahren dargestellt und witterungsbedingte Einflüsse auf den Gasspeicherbetrieb und die Nettogasspeicherkapazität beleuchtet.

Methodenvergleich zur Volumen- und Kapazitätsbestimmung

Nach der Durchführung der Methode M1 Volumenstrommessung wurden die Werte der ein- und ausspeiseseitigen Volumenstrommessung mit Bezug auf das Gasvolumen dokumentiert. Es wurden $131,5 \text{ m}^3$ Rohbiogas (V_{Ein}) während der Einspeisung des Rohbiogases in den Gasspeicher erfasst. Die Dauer t_E betrug 3 h und 30 min. Beim Ausspeisevorgang (V_{Aus}) wurden $142,0 \text{ m}^3$ mit der Ausspeisedauer t_A von 3 h und 28 min gemessen. Die Gesamtversuchsdauer t_G , einschließlich einer Pausendauer t_P von 19 min zwischen den Speisevorgängen, betrug 7 h und 17 min. Die Differenz ΔV beider Volumenmessungen wird neben der Messgenauigkeit der Volumenstromsensoren maßgeblich der permanent andauernden Biogasbildung im Gärbehälter zugeordnet. ΔV entspricht nach Gleichung 1 $10,5 \text{ m}^3$ und die daraus resultierende spezifische Biogasbildungsrate \dot{V}_{BB} ergibt $1,45 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ unter Verwendung der Gleichung 2. Werden die Pausen- und Ausspeisedauer zusammengefasst, ergibt sich beim Einsetzen der Werte in Gleichung 3 und 4 eine Nettogasspeicherkapazität von $K_{\text{GS,N}} = 136,5 \text{ m}^3$.

In Anbetracht der Praxistauglichkeit dieser Methode wird auf die Einhaltung einer geringen Pausendauer von weniger als 30 min verwiesen. In Abhängigkeit der Überschreitung des Referenzpunktes „technisch-voll“ wird außerdem auf die Gefahr des Auslöseereignisses der Über- und Unterdrucksicherung hingewiesen. Durch die Reduzierung der Pausendauer t_p wird die dabei entstehende Biogasbildung auf ein geringes Maß herabgesetzt und die Genauigkeit des Versuchsergebnisses gesteigert.

Bei der zeitgleich durchgeführten Methode M2 Feuerungswärmeleistung wurde während der Ausspeisung des Biogases aus dem Gasspeicher das gesamte Biogas direkt einem nachgeschalteten BHKW zugeführt. Die dabei ermittelte Wirkarbeit W_{el} lag bei 259 kWh. Die verbrauchte Zündölmenge V_Z lag bei 4,7 L. Die gemittelte Methankonzentration c_M im Biogas betrug 49,7%. Der Wirkungsgrad η_{el} des BHKW wurde über die Werksangabe aus Tabelle 3 und einem Abschlag von 3,1% (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. 2021) mit 36,9% angenommen. Unter Verwendung der Gleichung 5 ergibt sich eine Nettogasspeicherkapazität von $K_{GS,N} = 133,0 \text{ m}^3$. Mit dem übertragenen Ergebnis der Nettogasspeicherkapazität aus Methode M1 würde sich ein Wirkungsgrad von 36,0% ergeben und liegt 0,9% unter dem angenommenen Wert von 36,9%.

Das Ergebnis ist somit stark vom Wert des Wirkungsgrades und des Methananteils im Biogas abhängig. Zur Einordnung der Werte ist in der folgenden Abbildung 7 die Abhängigkeit der berechneten Nettogasspeicherkapazität von einem unterstellten elektrischen Wirkungsgrad η_{el} des BHKW der FBGA von 36,9% dargestellt. Die Herausforderung liegt dabei in der Belastbarkeit des realen Wirkungsgradwertes des bauseitigen BHKW sowie in dem unbekanntem Wirkungsgradverlust über die Betriebsdauer des BHKW. Dieser hängt von verschiedenen Einflussfaktoren wie Betriebsstunden, Betriebsmittelqualität und durchgeführten Wartungsmaßnahmen ab (ASCHMANN UND EFFENBERGER 2012). Auch der Lastzustand des BHKW hat einen erheblichen Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad. So sinkt dieser im Teillastbetrieb, der im Rahmen der flexibilisierten Energiebereitstellung bei An- und Abfahrvorgängen in seiner Anwendung zugenommen hat.

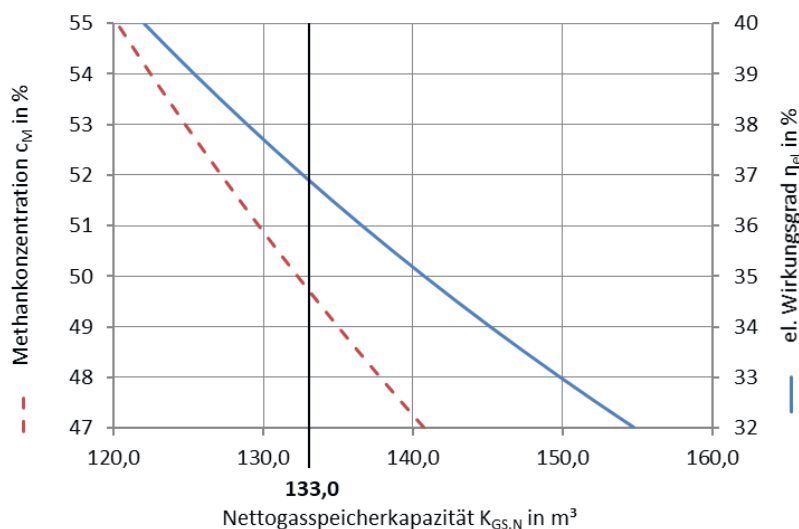


Abbildung 7: Darstellung des Bereiches der ermittelten Nettogasspeicherkapazität in Abhängigkeit eines unterstellten Methangehaltes c_M von 49,7 Vol.-% und elektrischen Wirkungsgrades η_{el} von 36,9% des BHKW der FBGA; Änderung der Nettogasspeicherkapazität bei veränderlichem Methangehalt (rot gestrichelt) resp. veränderlichem Wirkungsgrad (blau)

Neben dem Wirkungsgrad ist auch der Methangehalt in Abbildung 7 und die Abhängigkeit der Nettogasspeicherkapazität auf dessen veränderlichen Verlauf angegeben. Aufgrund der intervallweisen Erfassung wird der Methangehalt nur annäherungsweise in Praxisanlagen gemessen. Somit ist die Belastbarkeit dieses Wertes vergleichbar mit dem Wirkungsgrad als niedrig anzunehmen. Bei der Berechnung des Nettogasspeichervolumens über die Methode M3 Berechnung Volumen ergibt sich ein Nettogasspeichervolumen von $V_{GS,N} = 144,5 \text{ m}^3$.

Es wurde ein lichter Abstand zwischen Schutzmembran und Gasspeicherinnenmembran von 400 mm aus den Planungsunterlagen angenommen. Für den hyperboloiden Bereich des Gurthaltesystems wurde ein Volumen von 4,5% des kugelkalottenförmigen Bereiches der Gasspeicherinnenmembran gewählt und mithilfe eines 3D-CAD-Systems ermittelt. Diese Werte haben einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis des Nettogasspeichervolumens. Bei einer Praxisanlage sind diese Werte bzgl. der realen Ausführung, insbesondere der Gasspeicherinnenmembrangestalt und deren Kalottenformtreue und dem Verlauf der Gurte des Gurthaltesystems mit vorliegender Hyperboloidform, kaum überprüfbar.

Bei einer Umrechnung auf die Versuchsbedingungen (mittlere Gastemperatur während des Versuches von 31,4 °C bei 1013,25 hPa) ergibt sich in Bezug auf das geometrisch errechnete Volumen ein um 14,4% geringeres Nettogasspeichervolumen von 123 m³ (Gleichung 11 und 12). Bei Bezug auf den gemessenen Höchstwert (39,4 °C) am Versuchstag reduziert sich das reale Gasspeichervolumen bis auf 117,4 m³. Dies entspricht einer prozentualen Reduzierung um 18,7%.

Der Unterschied der Ergebnisse der Methode M3 zu den anderen beiden Methoden M1 und M2 kann auf Abweichungen zwischen den Planungsunterlagen und dem endgültigen Ausführungsstand hindeuten. Aufgrund der bereits genannten schwierigen Prüfbarkeit der genauen Abmaße der Gasspeicherform, stellt sich diese Methode bei diesem Beispiel als ungenau dar.

Kennlinie der Füllstandmessverfahren

Im Rahmen der Untersuchung der Prozessparameter des Gasspeichers während der Referenzpunkt-abfahrten wurden drei Füllstandmessverfahren einbezogen, deren Kennlinien in der Abbildung 8 dargestellt sind. Die beiden roten Graphen zeigen jeweils den konstanten Verlauf der Ein- resp. Ausspeisung. Es ist der charakteristische Verlauf des Gasspeicherinnendruckes (blauer Graph) des zweischaligen pneumatisch vorgespannten Gasspeichers zu erkennen. Nach dem Verlassen des Referenzpunktes „technisch-leer“ links im Diagramm, folgt ein starker Anstieg des Druckes aufgrund der Biogaseinspeisung bis zu einem ersten Plateau bei 3,3 hPa. Bis zu diesem Plateau reichert sich das Biogas im Gasraum ohne nennenswerte Raumvergrößerung in Form einer leichten Kompression von 0,5 auf 3,3 hPa an. Ab diesem Punkt beginnt die vertikal ausgerichtete Ausformung der Gasspeicherinnenmembran. Anschließend folgt ein konstanter Druckverlauf bis zum Erreichen des voll ausgeformten Zustandes der Gasspeicherinnenmembran. Ab diesem Moment liegt ein isochorer Raum vor und durch die weitere Einspeisung von Biogas steigt der Gasspeicherinnendruck schnell an. Mit dem Passieren von 4,5 hPa ist der Referenzpunkt „technisch-voll“ erreicht und die Biogaseinspeisung wird eingestellt. Bei dem Wechsel von Befüllung und Entleerung wurde darauf geachtet, dass kein Überdruck größer als 5 hPa eingestellt wurde, um das Auslösen der Über- und Unterdrucksicherung und damit verbunden diffusen Rohbiogasverlust zu vermeiden. Nach dem Umschalten zur Gasspeicherentleerung ist der Druckabfall von 4,5 auf 2,8 hPa durch den Abzug des Biogases zu erkennen. Im Unterschied zur Befüllung ist ein niedrigeres Druckniveau von 2,8 hPa während des konstanten

Druckverlaufes sichtbar. Dies ist durch den BHKW-Biogasverbrauch und den erzeugten Ausspeiseunterdruck des Gasverdichters nach dem Gasaufbereitungsmodul hervorgerufen. Abschließend fällt der Druck kurz vor dem Erreichen des Referenzpunktes „technisch-leer“ auf 0,5 hPa stark ab.

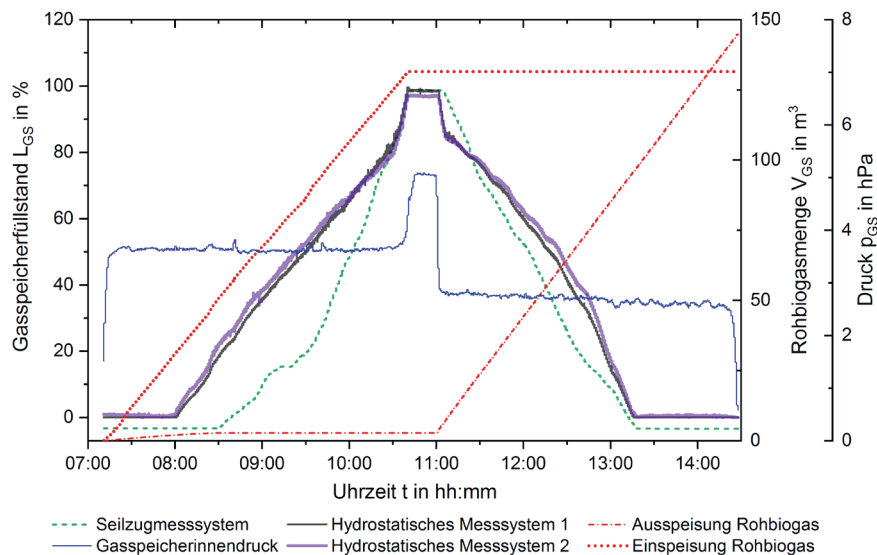


Abbildung 8: Darstellung der Kennlinie des integrierten zweischaligen pneumatisch vorgespannten Membrangasspeichers des Gärbehälter

Es ist sowohl bei Seilzug- als auch beim hydrostatischen Druckmessverfahren eine verzögerte Detektion der Füllstandänderung zu erkennen. Ursache dafür ist die undefinierte Ausformung der Gasspeicherinnenmembran bei der Biogaszunahme und die partielle Abtastung der Oberfläche der Gasspeicherinnenmembran durch die Seilzüge resp. die Schläuche. Diese messtechnische Totzone liegt während der Gasspeicherbefüllung beim Seilzugmessverfahren bei ca. 39% resp. beim hydrostatischen Druckmessverfahren bei ca. 24% Füllstand bezogen auf die erfasste Biogaseinspeisemenge. Der Versatz kann durch die unterschiedliche Positionierung der Messorgane und der partiell auftretenden Membranausformung hervorgerufen werden (Abbildung 3). Beim Entleerungsvorgang endet die Detektion der Füllstandänderung bei ca. 35% Restfüllstand bezogen auf die Biogasausspeisemenge. Daraus lässt sich ein ungeeignetes Anzeigeverhalten der beiden Messverfahren im unteren Füllstandbereich des Gasspeichers ableiten. Im mittleren und oberen Füllstandbereich hingegen ist ein zum Einspeisestrom vergleichbarer Verlauf zu erkennen. Die Ermittlung des Füllstandes über den Gasspeicherinnendruck ist aufgrund des technisch bedingten konstanten Druckverlaufes über den gesamten Befüll- resp. Entleerungsvorgang nicht möglich. Zur Detektion der Referenzpunkte ist der Druck hingegen von großer Bedeutung. Somit ist das Gasspeicherinnendruckmessverfahren für eine kontinuierliche Messung des Füllstandes bei dieser Gasspeicherbauform nicht geeignet.

Bei den Untersuchungen der Füllstandmessverfahren und der Beobachtungen der Gasspeichermembranausformung wurde zusätzlich die Polkappe in ihrer Lagetreue überwacht. Dies wurde mithilfe der an der Polkappe befestigten und radial ausgerichteten sechs Seilzüge und dem Vergleich der vertikalen Lage der Gegenmassen in den Führungsrohren bezogen auf den Füllstand, insbesondere im Bereich der Referenzpunkte, realisiert. Dabei konnte eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit der Polkappenlage im technisch vollen Zustand aufgrund der voll ausgeformten und definierten Gestalt

der Kugelkalotte erkannt werden. Bei der Ablage der Gasspeicherinnenmembran auf der Stützsäule im Referenzpunkt „technisch-leer“ konnte keine reproduzierbare Polkappenlage erzielt werden. Die Ursachen für den Polkappendrift werden u. a. in der undefinierten Faltenbildung der Membran, der veränderlichen strömungstechnischen Bedingungen im Gasspeicherinnenraum und in den ungleichmäßigen Witterungseinflüssen wie Wind und Solarstrahlung vermutet.

Einfluss von Witterungsbedingungen auf die Nettogasspeicherkapazität

Abbildung 9a zeigt beispielhaft den Verlauf der Messgrößen Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit sowie Umgebungstemperatur und -druck über einen Zeitraum von drei Tagen. Die Tage 1 und 3 waren bewölkt, wohingegen Tag 2 einen größtenteils klaren Himmel aufwies. Dies ist auch in der deutlichen Änderung in der direkten Globalstrahlung (Summe der direkten und diffusen Strahlung) zu erkennen, welche sich auch im Anstieg der Umgebungstemperatur äußert.

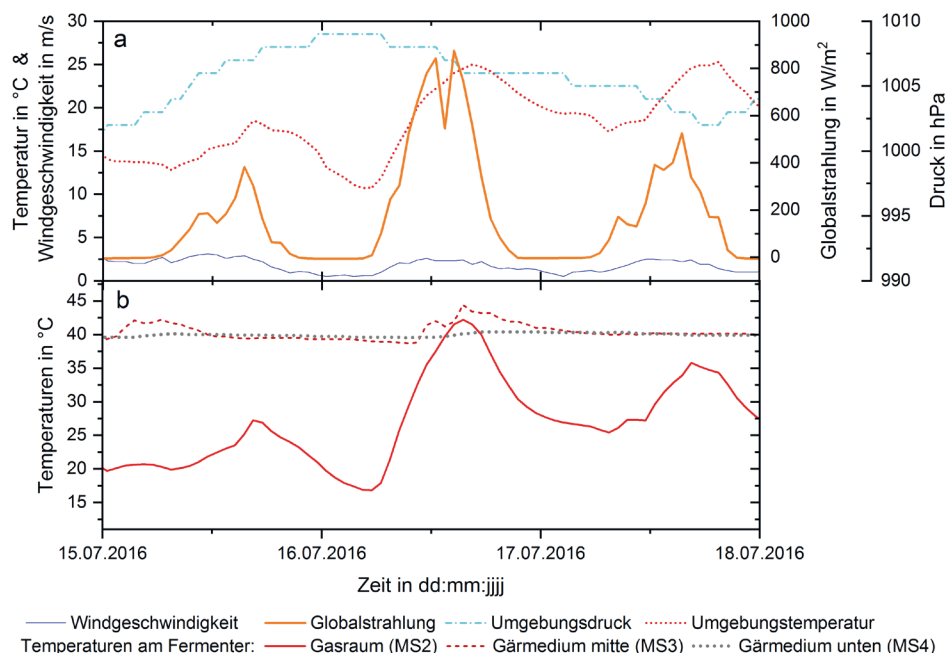


Abbildung 9: Einfluss der Wetterbedingungen auf den Verlauf der Temperaturen im Gasspeicher und Gärmedium

Abbildung 9b zeigt ausgewählte Temperaturverläufe im Gärbehälter (Nachgärer der FBGA) bzw. Gasspeicher. Zum einen wurde die Temperatur im unteren Bereich des Gärbehälters angetragen, zum anderen die Temperatur in der Behältermitte, welche sich in räumlicher Nähe der Behälterbeheizung befindet. Es zeigt sich, dass die Temperatur im Gasraum je nach Witterungsbedingung deutliche Änderungen erfährt. Es zeigt sich eine deutliche Abkühlung insbesondere nachts und am ersten der drei gezeigten Tage. Am Vormittag des zweiten Tages erhöht sich die Gasspeicherinnentemperatur deutlich infolge der starken Sonneneinstrahlung und gestiegenen Außentemperatur bis auf die Gärmediumtemperatur. In diesem Versuchszeitraum wurde das Gärmedium nur intervallweise mit geringer Intensität durchmischt. Infolge dessen ist von einer verminderten Wärmeübertragung in Richtung der Gasphase durch die Flüssigphase auszugehen. In Tabelle 6 werden ausgewählte Parameter und meteorologische Einflussgrößen hinsichtlich der Wirkung auf die Gasspeicherinnentemperatur beschrieben.

Tabelle 6: Wichtige Einflussgrößen auf die Gasspeicherinnentemperatur

Parameter	Beschreibung des Einflusses auf die Wärmebilanz des Gasspeichers
Solarstrahlung	Erwärmung der Wetterschutzmembran, Konvektive Wärmeübertragung sowie Wärmestrahlung über Innenmembran
Außentemperatur	Abkühlung oder Erwärmung, je nach Temperaturgradient zur Gasspeichertemperatur
Windgeschwindigkeit	Abkühlung der Wetterschutzmembran
Regen	Abkühlung der Wetterschutzmembran
Schnee	Isolationswirkung auf Wetterschutzmembran
Bewölkung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Klarer Himmel → Wärmeabstrahlung zwischen Wetterschutzmembran und Himmel höher, tendenziell höhere Auskühlung; unter den eher trocknen Winterbedingungen kann dieser Effekt noch verstärkt wirken ▪ Bewölkter Himmel → Geringere Temperaturdifferenz zwischen Wetterschutzmembran und Himmel (Wasserdampf in Form von Wolken, d. h. maßgebend ist die Taupunkttemperatur), führt zu verminderter Abkühlung durch Strahlung
Temperatur Gärmedium	Erwärmung des Biogases auf die Temperatur des Gärmediums
Durchmischung Gärmedium	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gute Durchmischung → Turbulenz ermöglicht hohe Wärmeübertragung zwischen Gärmedium und Gasphase ▪ Geringe bis keine Durchmischung → Durch geringe Turbulenz in der Flüssigphase verminderte Wärmeübertragung an die Gasphase; entstehende Schwimmschichten wirken als zusätzlicher Wärmeisolator gegenüber der Gasphase

Die durchgeführte Messung an der FBGA zeigen innertägliche Schwankungen der Gasspeicherinnentemperatur von bis zu 30 K. Um die Auswirkungen dieser Temperaturänderung auf das verfügbare Gasspeichervolumen zu beschreiben, wurde das ideale Gasgesetz, ergänzt um die Wasserdampfkomponente, herangezogen (Gleichung 11 und 12).

Abbildung 10 zeigt die Berechnungen bezogen auf einen gemessenen Temperaturverlauf, welcher auf Basis von 3 Temperaturgradienten ($\Delta T = 10, 20$ und 30 K) skaliert wurde. Dies bewirkt je nach Ausgangsniveau der Temperaturänderung ein bis zu 20% geringeres verfügbares Speichervolumen.

Um den Temperatureinfluss auf die verfügbare Speicherkapazität zu kompensieren, bestehen zwei Möglichkeiten:

1. Statische Variante: Für die Temperaturkorrektur bei der Kapazitätsbestimmung (Gleichung 11 und 12) wird näherungsweise eine Gasspeicherinnentemperatur von mindestens 50 °C (maximale an der FBGA gemessene Gastemperatur im Gasspeicher) angesetzt (bzw. die am jeweiligen zu korrigierenden Gasspeicher maximal gemessene Temperatur). Die resultierende korrigierte Gasspeicherkapazität wird statisch als maximal verfügbares Volumen angesetzt. Dies hat zur Folge, dass bei Phasen geringerer Temperaturen Speicherpotenzial ungenutzt bleibt, aber Überdruckereignisse durch hohe Temperaturen vermieden werden.
2. Dynamische Variante: Die Innentemperatur wird permanent überwacht und für eine Korrektur des Anzeigewertes benutzt. Dies würde erlauben bei geringeren Temperaturen dynamisch freier werdende Speicherkapazitäten zu nutzen und dennoch bei höheren Temperaturen Überdrucksituationen zu vermeiden.

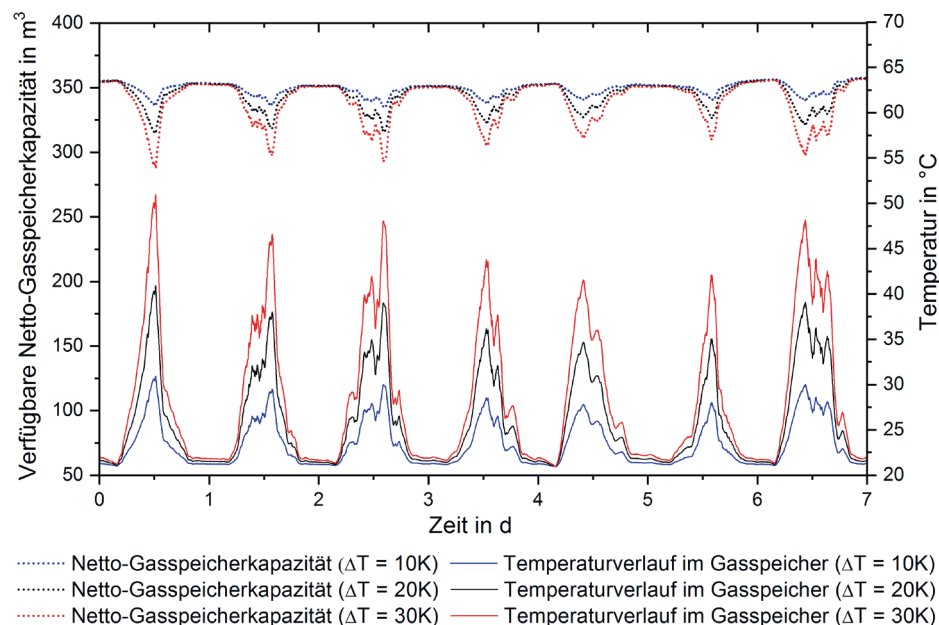


Abbildung 10: Rechnerische Veranschaulichung des Einflusses der Gasspeicherinnentemperatur auf das verfügbare Gasspeichervolumen bei unterschiedlichen Temperaturspreizungen

Insbesondere im Kontext der Flexibilisierung ist allerdings eine vorrausschauende Planung des Betriebes wichtig (MAUKY et al. 2015). Dafür wäre dann die Prognose der Biogastemperatur im Speicherinneren erforderlich, welche insbesondere von den Umgebungsbedingungen (u. a. Wetter und Gärbehälterbeheizung) und den baulichen Ausführungen des Speichers abhängt. Die jeweiligen thermodynamischen Prozesse könnten in einem Berechnungsmodell abgebildet werden, welches dann mit einer vorausschauenden Fütterungs- und Betriebsplanung kombiniert werden könnte (MAUKY et al. 2016). Ein weiterer Vorteil eines solchen modellgestützten Systems wäre das bilanzielle Abschätzen des Gasspeicherfüllstandes in Bereichen ungenügender Genauigkeit von Messsystemen insbesondere in Bereichen von Füllständen $< 40\%$.

Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Untersuchungen des Gasspeichers wurden Zustandsgrößen und Einflussfaktoren identifiziert und relevante Größen in ihrer Auswirkung beschrieben. Es konnten Grenzen im Anzeigeverhalten von Gasspeicherfüllstandmessverfahren gezeigt, sowie eine Untauglichkeit des Gasdruckmessverfahrens zur kontinuierlichen Messung des Füllstandes bei einem zweischaligen pneumatisch vorgespannten Membrangasspeicher nachgewiesen werden. Weiterhin wurden die Auswirkungen von witterungsbedingten Einflussfaktoren benannt und auf Maßnahmen zur Vermeidung von Biogasemissionen im Normalbetrieb einer Biogasanlage hingewiesen. Der ordnungsgemäße Betrieb des Gasspeichers im Bereich von 30 bis 70 % Füllstand stellt dabei eine einfache sowie sehr relevante und weitreichende Maßnahme dar, um Überdruckereignisse mit Emissionen von Biogas durch unvorhersehbaren Temperatureinfluss zu vermeiden. Dieser Bereich kann bei der Verwendung geeigneter mess- und anlagentechnischer Ausstattung mit der erforderlichen Messgenauigkeit, Überwachung und automatisierten Betriebsweise erweitert werden.

Somit sind durch einfache betriebliche Maßnahmen, wie einem angepassten Betriebsregime, welches insbesondere vor Sonnenaufgang einen maximalen Füllstand von 70 % sicherstellt, unerwünsch-

te Biogasemissionen sowie Biogasverluste für den Anlagenbetreiber ohne weitere Investitionen resp. technische Anlagenausstattung vermeidbar. Bei dem Vergleich der Methoden zur Bestimmung des Volumens resp. der Kapazität konnten einflussreiche Parameter gefunden werden, die in Abhängigkeit ihrer Verfügbarkeit maßgeblich an der Belastbarkeit des Ergebnisses beteiligt sind, bspw. der Wirkungsgrad des Konversionsaggregates, der Methangehalt im Biogas, Messgenauigkeiten von Volumenstromsensoren oder Abmaße, die Abweichungen von Planungsangaben zur bauseitigen Ausführung der Herstellungs- und Montagearbeiten des Gasspeichers aufzeigen.

Insbesondere im Zuge der Flexibilisierung kommt dem Gasspeicher als Bindeglied zwischen Erzeugung und Nutzung von Biogas eine besondere Rolle zuteil. Um den Gasspeicher optimal nutzen zu können, ist eine Erhöhung der Messgenauigkeit insbesondere in den Grenzbereichen wichtig. Dies kann zum einen durch Verbesserung von Messsystemen erfolgen, z.B. die Kombination von unterschiedlichen Messverfahren. Zum anderen könnte über die Entwicklung von speziellen Zuschnitten der Speichermembranen das Ablegen und Ausformen der Membran gleichmäßiger gemacht werden, was den Polkappendrift verringern und das Messen mit herkömmlichen Verfahren vereinfachen würde. Eine weitere Möglichkeit die verfügbare Speicherkapazität besser zu nutzen, wäre die vorrausschauende Temperaturkorrektur des Speichervolumens. Dafür sind weitere Untersuchungen zu den witterungsbedingten Einflussgrößen notwendig, die dann als Grundlage für die thermodynamische Beschreibung des Gasspeichers dienen.

Literatur

- Aschmann, V.; Effenberger, M. (2012): Elektrische Wirkungsgrade von biogasbetriebenen BHKW. *Landtechnik* 67(2), S. 118–121, <https://doi.org/10.1515/lt.2012.282>
- Barchmann, T.; Mauky, E.; Dotzauer, M.; Stur, M.; Weinrich, S.; Jacobi, H.F.; Liebetrau, J.; Nelles, M. (2016): Erweiterung der Flexibilität von Biogasanlagen – Substratmanagement, Fahrplansynthese und ökonomische Bewertung. *Landtechnik* 71(6), S. 233–251, <https://doi.org/10.1515/LT.2016.3146>
- Braun, R. (1982): *Biogas - Methangärung organischer Abfallstoffe. Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. Springer, Wien
- Daniel-Gromke, J. (2017): *Anlagenbestand Biogas und Biomethan - Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland*. (FKZ 37EV 16 111 0), Leipzig, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1990): DIN 1343:1990-01, Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen. Begriffe und Werte, Berlin
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2016): Merkblatt DWA-M 377 Biogas - Speichersysteme; Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit von Membranabdeckungen. Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2017): Merkblatt DWA-M 375 Technische Dichtheit von Membranspeichersystemen (Entwurf), Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hg.) (2021): *Biogasmessprogramm III. 61 Biogasanlagen im Vergleich*, Gülzow bei Güstrow, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.
- Kube, J. (2018): Management of Gas Storages in Biogas Plants. *Chemical Engineering & Technology* 41(4), pp. 702–710, <https://doi.org/10.1002/ceat.201700395>
- Mauky, E.; Jacobi, H.F.; Liebetrau, J.; Nelles, M. (2015): Flexible biogas production for demand-driven energy supply—feeding strategies and types of substrates. *Bioresource technology* 178, pp. 262–269, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.123>

Mauky, E.; Weinrich, S.; Nägele, H.-J.; Jacobi, H.F.; Liebetrau, J.; Nelles, M. (2016): Model Predictive Control for Demand-Driven Biogas Production in Full Scale. *Chemical Engineering & Technology* 39(4), pp. 652–664, <https://doi.org/10.1002/ceat.201500412>

Stur, M.; Krebs, C.; Mauky, E.; Oehmichen, K.; Barchmann, T.; Murnleitner, E. (2018): ManBio - Entwicklung von technischen Maßnahmen zur Verbesserung des Gasmanagements von Biogasanlagen. Gemeinsamer Schlussbericht für den Zeitraum von 01.09.2014 bis 28.02.2017, Leipzig, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Autoren

Mathias Stur ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **Marcel Pohl** ist Arbeitsgruppenleiter, **Christian Krebs** ist technischer Leiter der Forschungsbiogasanlage und **Dr.-Ing. Eric Mauky** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Biochemische Konversion (BK) – Arbeitsgruppe Prozessüberwachung und Simulation, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig. E-Mail: mathias.stur@dbfz.de

Hinweis

Alle Volumenangaben zu Gasen sind auf den Normzustand nach DIN 1343 bezogen.

Danksagung

Der vorliegende Artikel basiert auf Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens „ManBio“ (Fkz 03KB094). Besonderer Dank für die Unterstützung und Förderung des Vorhabens gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und der Projektträger Jülich/Forschungszentrum Jülich GmbH. Weitere Teile wurden im Rahmen des von der Sächsischen Aufbaubank – Förderbank unter dem Fkz 100267056 geförderten Projekt „Gazelle“ erarbeitet. Außerdem möchten wir uns bei Heiko Müller für die technische Unterstützung, Huifeng Zhou und allen weiteren Beteiligten, die durch ihre Mithilfe und Begeisterung am Thema Biogasmanagement Unterstützung geleistet haben, sowie bei dem Ideengeber und Vorhabeninitiator Dr.-Ing. Elmar Fischer recht herzlich bedanken.