

Kurzstudie zum Thema Effekte des Ausgleichs von Stromdefiziten durch Biogasanlagen

- Zusammenfassung aktueller
Forschungsergebnisse

Kurzstudie zum Thema Effekte des Ausgleichs von Stromdefiziten durch Biogasanlagen

- Zusammenfassung aktueller Forschungsergebnisse

Henning Hahn, Uwe Holzhammer, Norman Gerhardt, Dirk Kirchner, Bernd Krautkremer

Kontakt:

Dr. Bernd Krautkremer

Tel.: 0561-7294 420

Fax: 0561-7294 432

<http://www.iwes.fraunhofer.de>

Bereich Bioenergie Systemtechnik

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES)

Königstor 59

34 119 Kassel

Inhaltsverzeichnis.....	I
1 Hintergrund.....	1
2 Residuallastanalyse für Deutschland bei unterschiedlichem Anteil EE an der Stromversorgung.....	2
3 Effekte einer flexiblen am Bedarf orientierten Biogas- und Biomethanverstromung	6
3.1 Effekte auf die Stromverteilung und Versorgungssicherheit.....	6
3.2 Effekte auf den fossilen Kraftwerkspark.....	11
3.3 Effekte am Strommarkt	14
3.4 Sonstige Effekte	16
4 Zusammenfassung	19
Quellenverzeichnis.....	21

1 Hintergrund

Biogasanlagen sollten künftig ihr volles Potential zur Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien mobilisieren. Die Biogastechnologie ist in der Lage, elektrische Leistung gesteuert in Abhängigkeit des Bedarfs (zur Deckung der Residuallast) zur Verfügung zu stellen. Mit der Einführung der Flexibilitätsprämie im Rahmen des EEG 2012 wurden hierzu die Weichen in die richtige Richtung gestellt, indem sie den notwendigen (Biogas-) Speicher- und Leistungszubau stützt. Diese Regelung führt zur Weiterentwicklung einer Technologie, die auch ein großes Marktpotenzial für den Export besitzt. Die flexibel regelbare Stromerzeugung durch Biogasanlagen ist ein Schlüsselement für den Einsatz in Ländern mit schwach entwickelter Netzinfrastruktur.

Seit mehreren Jahren und insbesondere seit der Entwicklung und Einführung der Flexibilitätsprämie befasst sich das Fraunhofer IWES mit dieser Fragestellung. Derzeit laufen verschiedene Forschungsaktivitäten zum Thema. Leider gehen die Projektlaufzeiten über die aktuell gesetzten Fristen zur Überarbeitung des EEG deutlich hinaus. Es zeichnet sich bei den Vorhaben jedoch schon jetzt ab, dass das vorhandene Potential der Biogastechnologie zur Flexibilisierung genutzt werden sollte. Des Weiteren liegt es in der Natur länger angelegter Forschungsvorhaben, dass die Fragestellungen komplex sind und die Ergebnisdarstellungen entsprechend umfangreich und detailliert ausfallen wodurch eine politische Verwertbarkeit der Ergebnisse in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit der Gesetzesverfahren erschwert wird.

Diese Kurzstudie fasst die Zwischenergebnisse laufender, sowie die Abschlussergebnisse abgeschlossener, Forschungsvorhaben zum Thema knapp zusammen, um diese für den aktuellen politischen-Diskussionsprozess verfügbar zu machen. Dafür werden aufbauend auf einer Residuallastanalyse, Effekte der flexiblen Biogas- und Biomethanverstromung auf 1) die Stromverteilung und Versorgungssicherheit, 2) den fossilen Kraftwerkspark, 3) den Strommarkt sowie 4) sonstige Effekte erläutert.

2 Residuallastanalyse für Deutschland bei unterschiedlichem Anteil EE an der Stromversorgung

Residuallastanalyse für
Deutschland bei
unterschiedlichem Anteil EE an
der Stromversorgung

Die Bundesregierung hat sich in ihrem Energiekonzept das Ziel gesetzt, den Anteil Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch von derzeit ca. 25% auf mindestens 80% im Jahr 2050 zu steigern. Dabei stellen die fluktuierenden Erneuerbaren Energien Windkraft und Photovoltaik die tragenden Säulen für den zukünftigen EE-Ausbau dar. Aufgabe der energetischen Biomassenutzung wird es sein, sich an der Synchronisation der schwankenden Energieerzeugung mit der Energienachfrage zu beteiligen und damit für Systemstabilität zu sorgen. Die Anforderungen an eine flexible, bedarfsorientierte Biogasverstromung ist neben dem EE-Anteil am Stromverbrauch auch vom Mix der verschiedenen fluktuierenden Erneuerbaren Energien (fEE) Wind-Onshore, Wind-Offshore und PV sowie von Speichern im elektrischen Netz abhängig.

Im Folgenden werden verschiedene Bandbreiten von EE-Ausbauszenarien für Deutschland abgeleitet und hinsichtlich ihrer Fluktuationen analysiert. Die Analyse berücksichtigt Fluktuationen die sich aus der positiven Residuallast (Versorgungslücken) und der negativen Residuallast (EE-Überschüsse) ergeben. Auf Basis dieser Fluktuationsanalyse können die Flexibilitäts-Anforderungen, die an die Strombereitstellung aus Biomasse in Zukunft gestellt werden, abgeleitet werden. Stromspeicherung oder ein Ausgleich über Stromim- und exporte wurden in der Analyse noch nicht berücksichtigt.

Um die Residuallast zu analysieren wird diese in fünf Bänder geteilt. Dabei wird getrennt für die positive und negative Residuallast ermittelt, welche Energie- und Leistungsanteile der Fluktuationen in folgenden Lastbändern liegen. Die Unterteilung der Bänder erfolgt nach den folgenden Kriterien (auf Basis zentrierter gleitender Mittelwerte):

- Stündlich - innerhalb eines Tages (Stundenmittelwerte abzüglich Tagesmittelwerte)
- Täglich - innerhalb einer Woche (Tagesmittelwerte abzüglich Wochenmittelwerte)
- Wöchentlich - innerhalb eines Monats (Wochenmittelwerte abzüglich Monatsmittelwerte)
- Monatlich - innerhalb eines Jahres (Monatsmittelwerte abzüglich Jahresmittelwert)
- Jährlich – Restenergiebedarf innerhalb der Wetterjahre 2008-2011

In Abbildung 1 ist die erforderliche Energie zum Ausgleich von Fluktuationen (Residualenergie) und die EE-Überschüsse in TWh bei zunehmender EE-Durchdringung dargestellt. Dabei wurden Szenarien mit einem hohen Anteil PV, Onshore sowie Offshore Windenergie einem Basisszenario mit ausgewogenem Wind-PV-Verhältnis gegenübergestellt. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass insbesondere die Energiemengen zur Deckung des jährlichen Bandes der positiven Residuallast mit einer zunehmenden EE-Durchdringung abnimmt, während die Bänder im monatlichen bis stündlichen Bereich nahezu unverändert bleiben. EE-Überschüsse treten mit voranschreitender EE-Durchdringung vor allem kurzfristig (stündlich bis wöchentlich) auf. Erst ab einem Anteil von 80% EE treten diese in relevantem Umfang auch längerfristig auf.

 Residuallastanalyse für
 Deutschland bei
 unterschiedlichem Anteil EE an
 der Stromversorgung

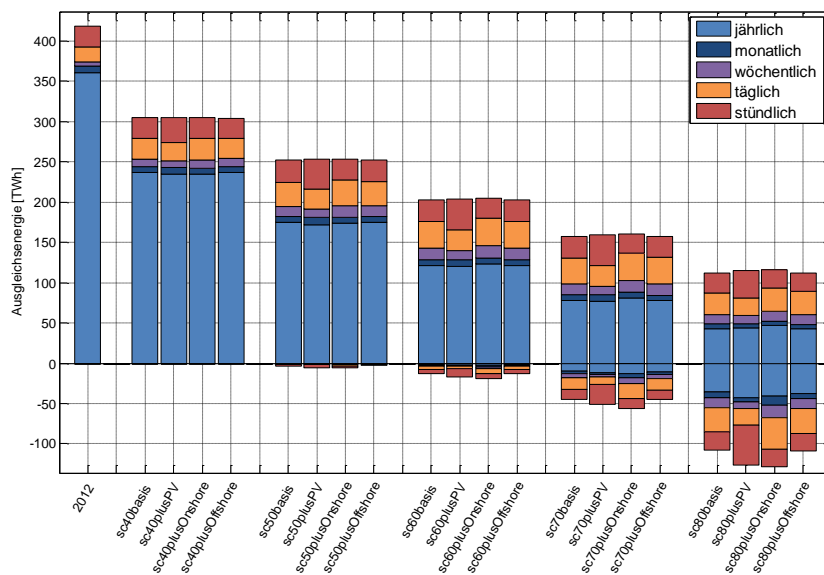


Abbildung 1: Fluktuation der Residuallast und der EE-Überschüsse (bezogen auf die Energiemenge) (Quelle: N. Gerhardt, Fraunhofer IWES)

- * EE-Anteile am Stromverbrauch (herkömmlicher Stromverbrauch zzgl. Verbrauch von „EE-Überschüsse“: 2012 = ca. 24% → 40% → 60% → 80%
- * Vergleich verschiedener EE-Mixe: Basis = Netzentwicklungsplan 2013, höherer PV-Anteil, höherer Wind-Onshore-Anteil, höherer Wind-Offshore-Anteil
- * Ausgleichsenergie wird hier als Energie verstanden, die notwendig ist Schwankungen der Residuallast auszugleichen

In Abbildung 2 ist die maximale Leistung in GW dargestellt, die erforderlich ist, um die Residuallast in dem entsprechenden Band (stündlich bis jährlich) zu decken bzw. im Falle von Überschüssen zu speichern. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass insgesamt relativ hohe Leistungen zum Ausgleich von kurzfristigen Überschüssen oder

Deckungslücken erforderlich sind. Mit steigender EE-Durchdringung nimmt v.a. die benötigte Leistung zum Ausgleich von Überschüssen zu.

Residuallastanalyse für Deutschland bei unterschiedlichem Anteil EE an der Stromversorgung

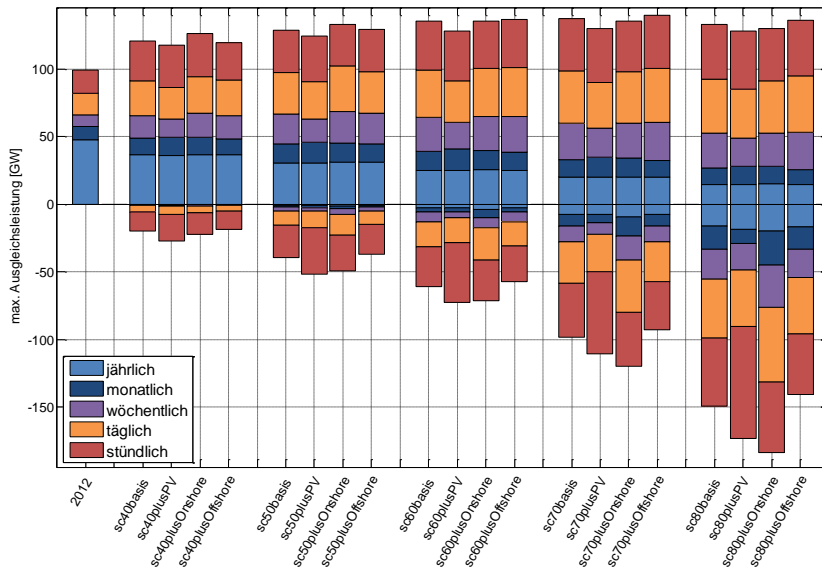


Abbildung 2: Fluktuation der Residuallast und EE-Überschüsse (bezogen auf die installierte Leistung) (Quelle: N. Gerhardt, Fraunhofer IWES)

* EE-Anteile am Stromverbrauch (herkömmlicher Stromverbrauch zzgl. Verbrauch von „EE-Überschüsse“: 2012 = ca. 24% → 40% → 60% → 80%

* Vergleich verschiedener EE-Mixe: Basis = Netzentwicklungsplan 2013, höherer PV-Anteil, höherer Wind-Onshore-Anteil, höherer Wind-Offshore-Anteil

Für den flexiblen Betrieb von Biogasanlagen lässt sich daraus ableiten, dass insbesondere eine Flexibilität im Stunden bis Wochenbereich erforderlich ist. Diese Aussage wird auch mittels Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben OptiKoBi² bestätigt. Die heute bereits ca. 28 TWh_{el}/a aus Biogas (AGEE Stat 2014) bzw. knapp 50 TWh_{el}/a (mit fester Biomasse, Klär- und Abfallbiogas) könnten dabei einen relevanten Anteil zum Ausgleich von Residuallastschwankungen beitragen, die in Abbildung 1 mit ca. 50 – 80 TWh_{el}/a im stündlich bis wöchentlichen Zeitraum ausgewiesen wird. Eine bedarfsorientierte Verstromung dieser Energiemenge aus Biomasse führt darüber hinaus auch zur Vermeidung von EE-Überschüssen (in folgenden Kapiteln ausführlicher beschrieben). Aus Abbildung 2 ist ersichtlich, dass allein die heute installierte Biogasleistung (Biomasseleistung) von ca. 3,5 GW_{el} (8 GW_{el}) bei einem Überbau auf 10,5 GW_{el} (27 GW_{el}) einen wesentlichen Anteil der benötigten Leistung aus der Stromproduktion nehmen kann, um einen relevanten Beitrag zur Deckung von Residuallastschwankungen (maximal ca. 80 GW_{el}) zu leisten. Auch den zukünftigen Anforderungen, längerfristige Schwankungen zu berücksichtigen, können Biogasanlagen

gerecht werden, erste Ansätze hierfür sind in Hahn et al. (2014) beschrieben.

Residuallastanalyse für
Deutschland bei
unterschiedlichem Anteil EE an
der Stromversorgung

3 Effekte einer flexiblen am Bedarf orientierten Biogas- und Biomethanverstromung

Effekte einer flexiblen am Bedarf orientierten Biogas- und Biomethanverstromung

In den folgenden Kapiteln, in denen die Effekte einer flexiblen Biogasverstromung zusammengefasst und kurz erläutert werden, wird Biogas als Synonym für die regenerativen, biogenen Gase, Biogas und Biomethan, verwendet. Die Effekte werden entsprechend ihrer Auswirkungen auf die 1) Stromverteilung und Versorgungssicherheit, 2) den fossilen Kraftwerkspark, 3) den Strommarkt und nach 4) sonstigen Effekten unterteilt.

3.1 Effekte auf die Stromverteilung und Versorgungssicherheit

Räumliche Verteilung von Biogasverstromungsanlagen erhöht die Versorgungssicherheit

Nach § 1 des Energiewirtschaftsgesetzes wird, die „möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche“ Versorgung der Allgemeinheit mit Strom und Gas als erklärtes Ziel definiert. Zur Erreichung dieses Ziels haben die Betreiber von Übertragungsnetzen insbesondere durch entsprechende Übertragungskapazität und Zuverlässigkeit des Netzes zur Versorgungssicherheit beizutragen (§ 12 EnWG).

Die Erweiterung der Übertragungskapazität kann zum einen durch Netzausbau, zum anderen Teil durch Vermeidung von Redispatchmaßnahmen und Netzbelastungen erfolgen. Im Projekt Kombi-Kraftwerk II wurde die notwendige Zusammensetzung eines zukünftigen Kraftwerksparks untersucht, der bei einer 100% EE-Versorgung eine hohe Versorgungssicherheit aufweist (Knorr et al., 2014). Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit ist dabei das intelligente Zusammenspiel von bedarfsgerecht betreibbaren Kraftwerkseinheiten im Verbund besonders wichtig. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Biogasanlagen, aufgrund ihrer dezentralen räumlichen Verteilung in einem solchen System dazu beitragen, die Netzbelastung zu minimieren und die Notwendigkeit von Redispatchmaßnahmen und Netzausbau zu reduzieren (Knorr et al., 2014).

Erhöhung der Auslastung der Stromnetze

Der größte Teil der Biogasanlagen speist den gleichmäßig produzierten Strom ca. 7.500 Stunden im Jahr in Mittelspannungsebene der Stromnetze ein. Hohe Anschlussleistungen von PV- und Windenergie-Anlagen, die nur an ca. 1.000 bis 2.000 Stunden im Jahr Strom in diese Netze einspeisen, können dazu führen, dass die berechnete Anschlussleistung (begrenzt durch die physische Netzausführung, Betriebsmittel, Lasten und Erzeugungsleistungen) schnell die zulässige maximal mögliche Netzkapazität erreicht. Ein darüber hinausgehender Transport von EE-Strom bzw. Anschluss von EE-Anlagen ist ohne Netzausbau nicht zulässig. Durch flexible und über den Strombedarf gesteuerte Energieerzeuger (z.B. von flexiblen Biogasanlagen), die garantieren nicht zu z.B. Spitzenerzeugungszeiten von PV, einzuspeisen, können die Netze ohne Zusatzinvestitionen stärker ausgelastet werden. Durch die flexible Stromproduktion können somit höhere Strommengen transportiert, bzw. mehr EE-Anlagen an das Netz angebunden werden. Dies setzt jedoch eine Änderung aktuell geltender Netzkapazitätsberechnungsverfahren voraus (Holzhammer 2014).

Bereitstellung von positiver und negativer Regelleistung

Ergebnisse aus dem Monitoring der Direktvermarktung von Strom aus EE zeigen, dass steuerbare Biomasseverstromungsanlagen seit Anfang 2012 am Regelleistungsmarkt präqualifiziert sind und dort Sekundärregelleistung und Minutenreserve anbieten. Der Anteil dieser Anlagen wächst seither stetig (aktuell: präqualifizierte Anlagenleistung ca. 800 MW_{el}). Flexible Biogasverstromungsanlagen stellen z.T. auch positive Regelleistung für das System bereit. Darüber hinaus wird seit Januar 2014 von einem Direktvermarkter Primärregelleistung mit Biogasanlagen angeboten. Die erforderlichen technischen Voraussetzungen wurden im Rahmen der Präqualifikation nachgewiesen (Lange et al., 2014).

Im Rahmen des Projekts Kombikraftwerk II konnte ermittelt werden, dass Biomasseanlagen bei einer 100% EE Versorgung nahezu den gesamten Regelenergiebedarf decken könnten (Kirchner et al., 2014).

Blindleistungsbereitstellung im Verteilnetz

Effekte einer flexiblen am Bedarf
orientierten Biogas- und
Biomethanverstromung

Blindleistungskompensation ist im Vergleich zur Bereitstellung von Regelenergie eine lokale Systemdienstleistung. Hierbei wird zwischen der Blindleistungskompensation in Übertragungsnetzen und der von elektrischen Verbrauchern unterschieden. Elektrische Netze benötigen je nach Auslastung kapazitive oder induktive Blindleistung zur Kompensation. Elektrische Lasten dagegen hauptsächlich kapazitive Blindleistung. Durch Blindleistungskompensation wird die Übertragungskapazität der elektrischen Leitungen erhöht. Durch Biogas-Vorortverstromungsanlagen können Verteilnetze (VN) auf Mittelspannungsebene sowie darunterliegende Niederspannungsnetze und die daran angeschlossenen Lasten gestützt werden. Für die Blindleistungskompensation des übergeordneten Übertragungsnetzes (ÜN) sind sie nur bedingt geeignet, da die Koppelstellen (Trafos) zwischen dem VN und dem ÜN nur begrenzt Blindleistung übertragen können. Der Einsatz von dynamisch gestuften Transformatoren zwischen dem Verteilnetz und dem Übertragungsnetz kann hier Abhilfe schaffen (Knorr et al., 2014). Eine Blindleistungskompensation der angeschlossenen Lasten erfolgt am besten durch Anlagen in lokaler Nähe zu der angeschlossenen Last. Daher sind hier biomethanbetriebene BHKWs oder die von Vorortverstromungsanlagen in Industriegebieten angesiedelten Vergärungsanlagen besonders geeignet.

Hohe Anforderungen an die Laständerungsgeschwindigkeit werden erfüllt

Die durch einen immer größeren Anteil fEE am Energiemix bedingte Volatilität der Energieerzeugung gilt es in Zukunft auszugleichen. Strom speichern ist jedoch aufwendig und geprägt durch Konversionsverluste. Ergebnisse des VDE (2012) zeigen, dass das Netz und die Speicherkapazitäten im deutschen Energiesystem bis 2020 voraussichtlich nicht genügend ausgebaut werden, um die Schwankungen der Energieerzeugung auszugleichen. Daher ist es empfehlenswert, die Netzregelung durch flexible thermische Kraftwerke zu gestalten. Dies gewährleistet eine dauerhaft stabile und sichere Stromversorgung während der Transformationsphase hin zu einem EE-System. In Abbildung 3 ist die Flexibilität des heutigen Kraftwerkparks inkl. Biogas betriebenen BHKWs dargestellt. Die Spannbreiten zeigen den heutigen Stand bis hin zu einem in den nächsten Jahren prognostizierten Fortschritt (der heute teilw. schon möglich ist). Es wird

deutlich, dass insbesondere Gas betriebene thermische KW (insbesondere Biogas-BHKWs) problemlos den zukünftigen Anforderungen an hohe Laständerungsgeschwindigkeiten gerecht werden können.

 Effekte einer flexiblen am Bedarf orientierten Biogas- und Biomethanverstromung

Kraftwerkstyp		Stein- kohle	Braun- kohle	GUD	Gas- turbine	Biogas- BHKW
Lastgradient	%P _N /min	1,5 - 6	1 - 4	2 - 8	8 - 15	8 - 20
Im Bereich	%P _N	40 - 90	50 - 90	40 - 90	40 - 90	50 - 100
Minimallast	%P _N	40 - 20	60 - 40	50 - 30	50 - 20	0
Anfahrtszeiten:						
Heiß	h	3-2	6-2	1,5 - 0,5	< 0,1	< 0,1
Kalt	h	10-4	10 - 6	4 - 2	< 0,1	< 0,1

Abbildung 3: Flexibilität im heutigen Kraftwerkspark (Quelle: VDE 2012, Knorr et al. 2013, Vollbrecht et al. 2014)

*Erklärung Anfahrtszeiten: Alle Kraftwerkstypen weisen eine kürzere Anfahrtszeit auf, wenn sie „heiß“ sind und nicht aus einem „kalten“ Zustand heraus betrieben werden. Die Anfahrtszeiten können sich verdoppeln, wenn das Kraftwerk länger im Stillstand war (>48 h).

Reduzierter Energiespeicherbedarf

Unter den in Kapitel 0 getroffenen Annahmen reduziert sich nach Holzhammer et al. (2013b) der Bedarf Strom z.B. durch Pumpspeicherkraftwerke oder andere Stromspeicher zu speichern. Die Ergebnisse zeigen, dass in Abhängigkeit der jährlich mittels Biogas und Biomethan flexibel erzeugten Strommenge 6 bis 10 TWh Strom direkt für den Verbrauch nutzbar gemacht werden können.

Biogasanlagen als Energiespeicher

Energiespeicher dienen der Speicherung von Energie zur späteren Nutzung. Ist die Speicherung einer Energieform wegen technischer Probleme, ungenügender Kapazität oder Stillstandsverlusten ungünstig, wird sie in eine andere, für die Speicherung geeignetere Energieform umgewandelt und gespeichert. Im Bedarfsfalle wird die Energie zurückgewandelt. An Biogasanlagen kann die Energie in Form des produzierten Biogases, aber auch in Form der zur Biogasproduktion benötigten Biomasse gespeichert bleiben. In Strombedarfszeiten findet dann die Verstromung der Energie in Form der Biomasse bzw. des Biogases statt. Biogasanlagen bzw. deren Biogassubstrate können somit zur Kurzzeit-, aber auch Langzeitspeicherung eingesetzt werden. Eigene Berechnungen zeigen, dass die spezifischen Leistungsinvestitionskosten

um eine durchschnittliche Bestandsbiogasanlage (500 kW_{el}) zu einem flexiblen Energieerzeuger mit einem Stromspeicherpotential von 4-19 Std./Tag umzurüsten bei ungefähr 100 bis 2.400 €/kW_{el} liegen. Womit Biogasanlagen bei den spezifischen Leistungsinvestitionskosten im Bereich von Pumpspeicherkraftwerken und Batterien nach Peht (2009) liegen.

Effekte einer flexiblen am Bedarf orientierten Biogas- und Biomethanverstromung

Vermeidung von Stromüberschüssen (bei hohem Anteil EE >60%)

Simulationen der Energieversorgung mit unterschiedlichen Anteilen EE, die in Holzhammer et al. (2013b) beschrieben sind, haben gezeigt, dass durch eine flexible Biogasverstromung auf Basis der in Kapitel 0 gemachten Annahmen, Stromüberschüsse vermieden werden. Dieser Effekt gewinnt bei einer hohen Durchdringung von fluktuierenden Energieerzeugern an der Stromversorgung an Relevanz (ab EE-Anteilen von über 60 %).

Sicherung der Stromversorgung bei steigender Stromproduktion durch fEE

Der Netzwiederaufbau (NWA) stellt eine seltene Extremsituation im Versorgungssystem dar. Er ist eine Systemdienstleistung, die von den systemverantwortlichen Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) erbracht bzw. von diesen koordiniert wird. Die ÜNB sind in diesem Zusammenhang insbesondere auf die Systemdienstleistung „Schwarzstartfähigkeit“ angewiesen, die heute ausschließlich von thermischen oder Wasserkraftwerken erbracht wird. Die zunehmenden Erzeugungskapazitäten die ans Verteilnetz angeschlossen sind, erhöhen jedoch die Komplexität bei der Beurteilung des Verhaltens von Netzbereichen. Je größer die installierte Leistung erneuerbarer und dezentraler Erzeuger wird, desto mehr müssen diese auch im Netzwiederaufbauprozess berücksichtigt werden. Biogasanlagen wird hierbei eine große Bedeutung zugemessen, da sie die für diese Aufgabe notwendigen technischen Eigenschaften besitzen. Daher können Biogasanlagen sukzessive die Aufgabe von fossilen Kraftwerken übernehmen. Hinter dieser Annahme steht ein großes Industriekonsortium, das im Rahmen des geplanten Projektes „Netzkraft“ diese Option intensiv untersuchen möchte (Degener & Heckmann, 2014).

3.2 Effekte auf den fossilen Kraftwerkspark

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen eines flexiblen Biogasverstromungsbetriebs auf den fossilen Kraftwerkspark beschrieben. Allen Effekten liegen die folgenden Rahmenbedingungen und Annahmen zugrunde:

- Die Kraftwerkseinsatzsimulation beruht auf den für die Leitstudie 2011 (IWES, DLR 2012) zugrunde gelegten Annahmen. Abweichend davon wurde ein fossiler KWK-Stromanteil von knapp 25 % unterstellt.
- Es wird von einem Anteil von 60 % EE an der Versorgung des Bruttostromverbrauchs ausgegangen. Die installierte Wind- und PV-Leistung sind in etwa gleich und tragen zusammen zu etwa 45 % Strombereitstellung bei.
- Bezugsraum ist Deutschland. Stromim- und -exporte wurden bei den Berechnungen berücksichtigt. Das Stromnetz und dessen Ausbau etc. blieben unberücksichtigt (Deutschland als Kupferplatte).
- Bei der Flexibilität für den Biogasverstromungsbetrieb wird davon ausgegangen, dass kurz- und langfristige (saisonale) Schwankungen der Stromnachfrage berücksichtigt werden können (d.h. auch längere Zeiten ohne Stromnachfrage (mehrere Tage)).
- Es werden die Effekte verglichen von nahezu unveränderter installierter Biogasleistung von 3,5 GW_{el} zu einer erhöhten installierten Leistung von 5,9 GW_{el} (jeweils bezogen auf die Bemessungsleistung).
- Die Flexibilität des Biogasverstromungsbetriebs wird durch die Jahresvolllaststunden beschrieben und von 5.500 bis 1.500 Vbh/a berücksichtigt. Dabei werden Residuallastschwankungen im Tages, Wochen und/oder Jahresverlauf berücksichtigt.

Detailliertere Informationen können den jeweils genannten Quellen entnommen werden.

Erhöhung der Auslastung (Volllaststunden) von fossilen Kraftwerken bei verringerter Starthäufigkeit

Nach Holzhammer et al. (2013b) führt eine erhöhte Flexibilität des Verstromungsbetriebs (bezogen auf die Vbh/a) sowie der insgesamt zur Verfügung gestellten Bruttostrommenge aus Biogas zu steigenden

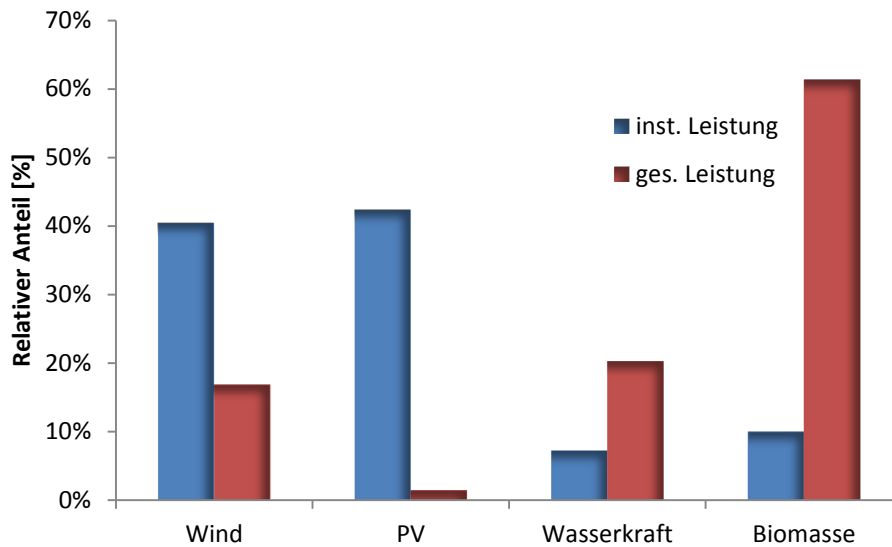
Volllaststunden im fossilen Kraftwerkpark, der zur Residuallastdeckung betrieben wird.

Da bei einer hohen flexibel verstromten Menge Biogas, fossile Kraftwerke nicht mehr so häufig auf Residuallastschwankungen reagieren müssen, reduziert sich deren Starthäufigkeit. Die größte Reduktion der Starthäufigkeit wird bereits bei einer Reduzierung der jährlichen Vollbetriebsstunden (Vbh/a) von Biogas betriebenen BHKWs von 8.760 auf 5.500 erzielt (Holzhammer et al., 2013b).

Effekte einer flexiblen am Bedarf
orientierten Biogas- und
Biomethanverstromung

Erhöhung der gesicherten Leistung durch EE

Um eine hohe Versorgungssicherheit zu gewährleisten, ist es erforderlich jederzeit ausreichend Kraftwerksleistung gesichert zu Verfügung zu stellen. Aufgrund dessen, dass Wind nicht immer weht und die Sonne nicht immer scheint, fällt die gesicherte Leistung von EE-Anlagen deutlich niedriger aus als deren installierte Leistung. Energie aus Biomasse dagegen hat einen hohen Anteil gesicherter Leistung an der installierten Leistung. Der flexible Biogasverstromungsbetrieb führt durch die Bereitstellung von Überschusskapazitäten zu einer Erhöhung der installierten Leistung und demzufolge zu einer Erhöhung der gesicherten Leistung, die durch EE beigetragen werden kann (basierend auf AGEE 2013). Eine Gegenüberstellung der installierten und gesicherten Leistung von EE kann der Abbildung 4 entnommen werden. Aus dieser wird deutlich, dass Biomasseanlagen trotz ihrer relativ geringen installierten Leistung den größten Teil der durch EE-Anlagen gesicherten Leistung beitragen.



Effekte einer flexiblen am Bedarf orientierten Biogas- und Biomethanverstromung

Abbildung 4: Gegenüberstellung der installierten und gesicherten Leistung von EE

Quelle: verändert nach AEE 2013 und AGEE Stat 2013

Reduktion fossiler Kraftwerksleistung

Bei nahezu unveränderter installierter Biogasleistung von 3,5 GW_{el} (bezogen auf den Grundlastbetrieb mit 8.760h/a) können nach Holzhammer et al. (2013b) durch die Flexibilisierung des Verstromungsbetriebs knapp 19 % weniger fossile Kraftwerksleistung betrieben werden (verglichen mit einer Grundlastverstromung der Biogasmenge) (stark abhängig von der Flexibilität).

Wird die installierte Biogasleistung in Deutschland auf 5,9 GW_{el} (entspricht ca. 52 TWh/a Strom aus Biogas) erhöht und wird diese zur bedarfsgerechten Strombereitstellung mit zusätzlicher Leistung ausgestattet, ist es möglich, weitere 5 % und damit insgesamt 24 % der installierten fossilen Kraftwerksleistung nicht mehr zu betreiben.

Der simulierte Kraftwerkseinsatz zeigt, dass der flexible Biogasverstromungsbetrieb neben GUD-Kraftwerken auch Kohlekondensationskraftwerke substituiert (Holzhammer et al. 2013b).

Energiebedingte CO₂ Emissionen

Die Reduktion der eingesetzten fossilen Kraftwerksleistung durch einen flexiblen Biogasverstromungsbetrieb hat positive Effekte auf den Ausstoß von Klimagasen. Nach Holzhammer et al. (2013a) führt der flexible Verstromungsbetrieb von Biogas bei einer jährlichen Stromproduktion aus Biogas von 52 TWh_{el} in Abhängigkeit der Flexibilität des

Biogasverstromungsbetriebs von 5.500 Vbh/a bis 1.500 Vbh/a zu keiner Erhöhung der energiebedingten CO₂-Emissionen.

Ähnliche Ergebnisse wurden auch in einer Studie von Hochloff et al. 2013 erzielt, bei der es durch die flexible Biogasverstromung sogar zu einer Emissionsminderung kam. Das Zustandekommen der Emissionsminderungen wird dabei hauptsächlich durch das geänderte Betriebsverhalten fossiler Kraftwerke erzielt.

 Effekte einer flexiblen am Bedarf orientierten Biogas- und Biomethanverstromung

3.3 Effekte am Strommarkt

Absenkung von Strompreisspitzen am Großhandelsmarkt

In Hochloff et al. (2013) wurde der Einfluss eines flexiblen Biogasverstromungsbetriebs auf die Strompreise am Großhandelsmarkt für die Jahre 2015 und 2020 anhand von stundenscharfen Simulationen untersucht. Dabei wurde der in Nitsch et al. (2012) und dem Netzentwicklungsplan (2013) unterstellte Kraftwerkszubau angenommen. Darüber hinaus wurde in Hochloff et al. (2013) ein starker Zubau von kleinen Biogasanlagen mit elektrischem Überbau berücksichtigt (V3+).

In Tabelle 1 ist die Einsparung der Stromgestehungskosten des konventionellen Kraftwerksparks in den flexiblen Verstromungsszenarien (V2 mit 2-facher Überbauung und V3 mit dreifacher Überbauung der Biogas Verstromungskapazität sowie V3+ mit zusätzlichem Potential an 3-fach überbauten Biogasverstromungskapazitäten durch die Mobilisierung von kleinen Güllebiogasanlagen) gegenüber dem Szenario ohne Flexibilisierung des Biogases (V1) dargestellt.

Tabelle 1: Kosteneinsparung im Einsatz konventioneller Kraftwerk durch eine Flexibilisierung der Biogasstromerzeugung

	2015			2020			
	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V3+
Änderung Anfahrkosten	-	-3,4 %	-9,5 %	-	-7,9 %	-15,2 %	-23,9 %
€/MWh flexible Biomasse	-	-1,0	-0,9	-	-0,7	-0,7	-0,7
Mio. €	-	-12	-27	-	-22	-42	-67
Änderung Brennstoffkosten	-	-0,1 %	-0,2 %	-	-0,4 %	-0,6 %	-4,3 %
€/MWh flexible Biomasse	-	-4,7	-4,3	-	-5,6	-4,6	-20,8
Mio. €	-	-60	-123	-	-166	-273	-1.855
SUMME €/MWh	-	-5,7	-5,2	-	-6,3	-5,3	-21,5
SUMME Mio. €	-	-72	-150	-	-188	-316	-1.923

Die Einsparungen der Betriebskosten im konventionellen Kraftwerkspark durch den flexiblen Einsatz der Biogasanlagen beträgt im Jahr 2015 zwischen 5,7 und 5,2 € pro MWh flexibel produzierter Strommenge aus Biogas. Im Jahr 2020 steigt dies Einsparung unter den unterstellten Annahmen weiter auf 6,3 und 5,3 €/MWh an.

Werden die Strommengen aus Biogas erhöht, steigen die Einsparungen weiter auf 21,5 €/MWh an.

Die spezifischen Effekte sind umso höher, je geringer der Anteil der Flexibilisierung ist, da zunächst die höchsten Kostentreiber verdrängt werden. Die Einsparungen sind auf mehrere Effekte zurückzuführen. Durch die flexible Stromproduktion mittels Biomasse finden deutlich weniger Anfahrvorgänge im konventionellen Kraftwerkspark statt. Dadurch erfolgt eine effizientere Brennstoffnutzung durch reduzierte Betriebsstunden in Teillast. Zudem werden die sogenannten Grenzkraftwerke (Pumpspeicher- und Gaskraftwerke) verdrängt, welche die höchsten Brennstoffkosten aufweisen.

Durch die Einstellung der Stromproduktion aus Biogas in Phasen mit hohen Wind und PV-Strommengen ist eine Verminderung der Zeiten mit negativen Strompreisen an der Strombörse zu erreichen, ohne das die Stromproduktion aus Windenergie oder PV-Anlagen reduziert werden muss.

Reduktion der Kosten für die Regelleistungsbereitstellung

Die Teilnahme von Biogas verstromenden Anlagen und anderen EE (z.B. Holzheizkraftwerke) führte in den vergangenen zwei Jahre zu einem größeren Wettbewerb am Regelleistungsmarkt. Dies hatte zur Folge, dass die durch Biomasse angebotene Strommenge die Leistung von fossilen Kraftwerken mit hohen Grenzkosten am Strommarkt verdrängte (Merit-Order Effekt). Dadurch konnten die Strombeschaffungskosten für Regelenergie und somit die Kosten für die Ausgleichsenergie gesenkt werden. Die Zunahme der flexiblen Biomasseanlagen im Regelleistungsmarkt ist daher gerade im Hinblick auf die derzeit wieder steigenden Preise im positiven Regelleistungsmarkt und einem leicht zunehmenden Regelleistungsbedarf zu begrüßen.

In Lange et al. (2014) wurde der Effekt möglicher Einsparung durch die Regelleistungsbereitstellung durch Biogasanlagen bei verschiedenen angebotenen Leistungen abgeschätzt. Vergleicht man diese mit den realen Gesamtkosten (bezuschlagte Leistungspreisgebote und der Summe der Kosten aller Regelleistungsabrufe) für die Sekundärregelleistungsbereitstellung im Jahr 2013 von 354 Mio. € und

für Minutenreserve von 155 Mio. €, können Biomasse-/Biogasanlagen die Kosten um ca. 5-10 % reduzieren.

Das Leistungspreisgebot basiert auf den zu erwartenden Preisen im Markt. Der Preis wird durch das letzte ersetzte Gebot bestimmt. Das bedeutet, dass ein kleinerer Pool flexibler Biogasanlagen (zusätzliche 150/300 MW) einen sehr viel höheren Leistungspreis bietet als der unflexible Biogasanlagen-Pool mit einer höheren installierten Leistung (zusätzliche 500/1000 MW), da der Leistungspreis aus dem sehr hochpreisigen Plateau am Ende der Merit-Order-Liste bestimmt wird. Bei einem weiteren Ausbau insbesondere auch bei einem Zubau von Zusatzkapazitäten können die Einspareffekte weiter steigen. Die Einsparung ist absolut höher, je mehr Biomasse am Regelleistungsmarkt bezuschlagt wird. Gleichzeitig ist die spezifische Einsparung pro MW geringer und damit auch das betriebswirtschaftliche Ergebnis für den Anlagenbetreiber (Lange et al. 2014).

 Effekte einer flexiblen am Bedarf orientierten Biogas- und Biomethanverstromung

Tabelle 2: Mögliche Einsparungen durch zusätzliche Biogasanlagen im Regelleistungsmarkt

	Installierte Leistung	Markt	
		Sekundärregelleistung	Minutenreserve
Flexible Biogasanlage	150 MW	3.0 Mio. €	0.2 Mio. €
	300 MW	8.6 Mio. €	0.7 Mio. €
Unflexible Biogasanlage	500 MW	17.5 Mio. €	6.0 Mio. €
	1000 MW	23.5 Mio. €	17.3 Mio. €

Quelle: verändert nach Lange et al. (2014)

3.4 Sonstige Effekte

Erhöhung der regenerativen Deckung des Wärmebedarfs

Durch Einführung des KWK-Bonus im EEG 2004 wurde die Erhöhung der Gesamteffizienz von Biogasanlagen angereizt. Laut dem Monitoring der Stromerzeugung aus Biomasse konnte eine Abwärmemenge von rund 11 TWh_{th} bei der Biogasverstromung extern genutzt werden und damit den Anteil regenerativer Energien zur Deckung des Wärmebedarfs erhöhen (Scheftelowitz et al., 2013). Die Stromproduktion aus Biogas trägt somit zur CO₂-Minderung der Wärmeversorgung bei und erhöht den EE Anteil.

Technologieentwicklung: Effizienzsteigerung von BHKWs

Effekte einer flexiblen am Bedarf
orientierten Biogas- und
Biomethanverstromung

Seit Beginn der Förderung der Biogastechnologie konnte ein Anstieg des elektrischen Wirkungsgrades von Biogas-BHKW verzeichnet werden. Eine Auswertung der ASUE-Daten hat eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads um mehrere Prozent von dem Jahr 2005 bis 2011 ergeben (ASUE, 2005; ASUE, 2011). Diese technische Entwicklung verlief parallel zu dem in diesen Jahren starken Biogasanlagenzubau.

Diese Effizienzsteigerung wirkt sich nicht nur vorteilhaft auf die direkt mit Biogas betriebenen Einheiten durch geringeren Biomassebedarf für die gleichen Strommengen aus, sondern hat auch Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeiten der mittelständig geprägten Hersteller für den Export von dezentraler BHKW-Technik, die zunehmend nachgefragt wird. Werden weiterhin Bemühungen unternommen, Biogasanlagen zu flexibilisieren und dahingehend zu optimieren, kann dieser Effekt voraussichtlich weiter verstärkt werden.

Biogasanlagen als biogene CO₂-Quelle für Power-to-Gas (PtG) Anlagen

Aus technischer Sicht kann die PtG-Technologie einen Beitrag zur Langzeitspeicherung im Stromsektor leisten, eine Quelle regenerativen Kraftstoffs im Verkehr- bzw. Wärmesektor darstellen sowie einen Beitrag bei der stofflichen Nutzung im industriellen Sektor leisten.

Dabei stellt PtG eine Möglichkeit dar, die fluktuierende Stromerzeugung in ein gut speicher- und transportierbares Gas zu konvertieren, wobei Biogasanlagen als nachhaltiger CO₂-Produzent für eine effiziente Methanisierung dienen können (Verwendung des CO₂ von Biogasaufbereitungsanlagen). Zusätzlich ermöglicht eine intelligente Kombination von PtG- und Biogasanlagen eine zusätzliche Flexibilisierungsoption der Stromerzeugung aus Biomasse (direkte Methanisierung).

Im Projekt Kombi-Kraftwerk II wurde gezeigt, dass zukünftig trotz Netzausbau und Lastmanagement vermehrt Speicher benötigt werden. Die dabei geforderten Speichereigenschaften können sehr gut von Methan-basierten Speichern erbracht werden. (Knorr et al., 2014). Die Biogastechnologie stellt eine gute Brückentechnologie für PtG-Anlagen dar. CO₂ wird in guter Qualität bereitgestellt. Die Speicher- und Einspeiseinfrastruktur existiert bereits und zukünftig kann die Biogasproduktion aus Biomasse (NaWaRo) sukzessive durch E-Gas substituiert werden und damit einen gleitenden Technologieübergang möglich machen.

Nach Hahn et al. (2012) ergibt sich durch den bestehenden Biogasanlagenpark ein theoretisches CO₂-Potential¹ von 13,7 Mio. t, welches für die Erzeugung von erneuerbarem Methan durch PtG-Konzepte genutzt werden kann. Würde dieses zur Verwertung von Überschussstrom durch PtG-Anlagen erschlossen, könnten ca. 120 TWh Strom pro Jahr für die Herstellung von erneuerbarem Gas gespeichert und bedarfsorientiert verstromt werden.

Effekte einer flexiblen am Bedarf
orientierten Biogas- und
Biomethanverstromung

¹ Hierbei handelt es sich um das maximal theoretische Potenzial an CO₂ für die Methanisierung aus Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung. Es wird keine Klassifizierung nach installierter Leistung der einzelnen Biogasanlagen vorgenommen. Somit ist davon auszugehen, dass eine Vielzahl bzw. der Zusammenschluss kleinerer Anlagen nicht genügend CO₂ produzieren, um eine kommerzielle Methanisierungsanlage versorgen zu können.

Die Kurzstudie zu den Effekten des Ausgleichs von Stromdefiziten durch Biogasanlagen fasst die (Zwischen-)Ergebnisse aktueller, zum Teil noch nicht abgeschlossenen Forschungsprojekte, zusammen. Aufbauend auf einer Residuallastanalyse mit steigenden Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien (fEE) werden in der Kurzstudie die Effekte einer flexiblen Biogas- und Biomethanverstromung auf die Stromverteilung und Versorgungssicherheit, den Strommarkt sowie den fossilen Kraftwerkspark betrachtet.

Auf Basis der Residuallastanalyse kann abgeleitet werden, dass ein flexibler Verstromungsbetrieb vor allem im Stunden- bis Wochenbereich zum Ausgleich von Residuallastschwankungen erforderlich ist. Dabei ist es bereits mit dem heute bestehenden Park an Biomasseverstromungsanlagen möglich, bei entsprechendem Überbau der Verstromungskapazitäten, einen relevanten Beitrag zur Deckung von Residuallastschwankungen beizutragen.

In Bezug auf die Versorgungssicherheit ist fest zu halten, dass durch die erfolgreiche Einführung der Direktvermarktung im EEG 2012 bereits heute 800 MW installierter elektrischer Leistung zur Bereitstellung von Sekundärregelleistung und Minutenreserve aus Biogas zur Verfügung stehen. Die Direktvermarktung in Kombination mit der Flexibilitätsprämie ermöglicht es ersten Anlagen auch positive Regelleistung bereit zu stellen. Im Rahmen des Projekts Kombikraftwerk II konnte darüber hinaus ermittelt werden, dass Biomasseanlagen bei einer 100 % Stromversorgung aus erneuerbaren Energien nahezu den gesamten Regelenergiebedarf decken können.

Auch in Bezug auf weitere Systemdienstleistungen wie Blindleistungsbereitstellung und Schwarzstartfähigkeit können Biogasanlagen und Biomassekraftwerke einen Beitrag leisten und damit eine nachhaltige und sichere Stromversorgung auf Basis von erneuerbaren Energien gewährleisten. Die zukünftigen Anforderungen an hohe Laständerungsgeschwindigkeiten können dabei durch Biogas betriebene BHKWs problemlos erfüllt werden.

Der flexible Biogasverstromungsbetrieb führt darüber hinaus durch die Bereitstellung von Zusatzkapazitäten zu einer Erhöhung der installierten Leistung und aufgrund der hohen Zuverlässigkeit des Biogasverstromungsbetriebs zu einer Erhöhung der gesicherten Leistung, die durch EE insgesamt bereit gestellt werden kann.

Durch eine Kostenanalyse konnte gezeigt werden, dass der flexible Betrieb von Biogasanlagen zu einer Einsparungen bei den Betriebskosten im konventionellen Kraftwerkspark führt. Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass durch den flexiblen Einsatz der Biogasanlagen im Jahr 2015 bei rund 5,5 € pro MWh flexibel produzierte Strommenge aus Biogas im konventionellen Kraftwerkspark eingespart werden können. Werden die Strommengen aus Biogas im Rahmen des zur Verfügung stehenden Potenzials erhöht, steigen die Einsparungen weiter auf 21,5 €/MWh an.

Flexible Biogasanlagen und Biomasseanlagen stellen Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien zur Verfügung und tragen darüber hinaus dazu bei, einheimische Energieträger zu nutzen und regionale Wertschöpfungskreisläufe zu schließen. Eine Flexibilisierung des Biogasanlagenbestands und die damit verbundenen Möglichkeiten zum Ausgleich von Residuallastschwankungen und der Erbringung von Systemdienstleistungen kann ein wichtiges Element in einer nachhaltigen und versorgungssicheren Stromversorgung auf Basis regenerativer Energien darstellen.

Quellenverzeichnis

- AGEE 2013 Agentur für erneuerbare Energien (AGEE) 2013: Studienvergleich: Bedarf an steuerbaren Kapazitäten im Stromsystem, Berlin.
- AGEE Stat 2013 Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (AGEE Stat): Erneuerbare Energien 2013
- AGEE Stat 2014 Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (AGEE Stat): Erneuerbare Energien 2014
- ASUE 2005 BHKW Kenndaten 2005, Frankfurt
- ASUE 2011 BHKW Kenndaten 2011, Frankfurt
- BDEW 2012 Technische und wirtschaftliche Situation konventioneller Kraftwerke in Deutschland. In: Dialogforum dena 2012
- Degener & Heckmann, 2014 T. Degener, W. Heckmann, 2014: Forschungsvorhaben: Netzwiederaufbau unter Berücksichtigung zukünftiger Kraftwerksstrukturen, unveröffentlicht, Kassel 2014
- Hahn et al., 2012 H. Hahn, M. Jentsch, J. Kasten, F. Schünemeyer, P. Härtel, T. Trost, B. Krautkremer, 2012: Wissenschaftliche Vorstudie zum Hauptprojekt: „Methanisierung am Eichhof“ für das HMUELV, unveröffentlicht, Kassel.
- Hahn et al., 2014 Hahn H., Krautkremer, B., Hartmann, K., Wachendorf, M.: Review of concepts for a demand-driven biogas supply for balance power generation. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, S. 383-393.
- Hochloff et al. (2013) Hochloff, P., Gerhardt, N., Holzhammer, U., Hahn, H. 2013: Kosten und Nutzen der Flexibilisierung von kleinen Gülle-Biogasanlagen

- Holzhammer et al. (2013a) Holzhammer, H., Scholwin, F., Nelles, M., 2013: Auswirkung der flexiblen Stromproduktion aus Biogas auf den konventionellen Kraftwerkspark und dessen CO₂-Emissionen. In: 7. Biomasseforum, Bad Hersfeld.
- Holzhammer et al. (2013b) Holzhammer, H., Kirchner, D., Scholwin, F., Nelles, M., 2013: Flexible Stromerzeugung aus Bioenergie – Ein relevanter Beitrag zum Gelingen der Energiewende? Auswirkungen einer flexiblen Stromproduktion aus Bioenergie auf den konventionellen Kraftwerkspark. 7. Rostocker Bioenergieforum.
- Holzhammer 2014 Flexible Stromproduktion aus Biogas unterstützt Verteilnetze. Otti-Konferenz: Zukünftige Stromnetze für erneuerbare Energien, Berlin.
- Hochloff et al. (2013) P. Hochloff, N. Gerhardt, U. Holzhammer, H. Hahn 2013: Kosten und Nutzen der Flexibilisierung von kleinen Güllebiogasanlagen, Kassel.
- IWES, DLR 2011 J. Nitsch, Gerhardt, M., B. Wenzel, et al. 2012: „Leitstudie 2011“ - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global; Berlin 2012
- Kirchner et al., 2014 D. Kirchner, O. Grün, 2014: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Kombikraftwerk 2 aus Sicht der Biogastechnologie, Kassel 2014
- Knorr et al., 2014 K. Knorr et al., 2014: Abschlussbericht zum Kombi-Kraftwerk II, unveröffentlicht, Kassel.
- Lange et al., 2014 A. Lange, C. Richts, U. Holzhammer, M. Klobasa, W. Lehnert, et al., 2014: Regelleistungsbereitstellung von

- Erneuerbaren Energien in der Direktvermarktung – Auswirkungen, Potenziale und Weiterentwicklung, Arbeitspapier aus dem Projekt: Laufende Evaluierung der Direktvermarktung von Strom aus erneuerbaren Energieträgern, unveröffentlicht, Berlin, Kassel, Karlsruhe.
- Netzentwicklungsplan 2013 Netzentwicklungsplan Strom, zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, 2013.
- Pehnt 2009 Kurzstudie: Wasserstoff und Stromspeicher in einem Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien: Analyse der kurz- und mittelfristigen Perspektive, Heidelberg 2009
- Scheftelowitz et al., 2013 J. Daniel-Gromke, V. Denysenko, P. Sauter, K. Naumann, M. Scheftelowitz, A. Krautz, M. Beil, W. Beyrich, W. Peters, S. Schicketanz, C. Schultze, 2013: Stromerzeugung aus Biomasse, 03MAP250. Zwischenbericht, Leipzig.
- Vollprecht et al., 2014 J. Vollprecht, U. Holzhammer, et al. 2014: Fördervorschläge für Biogas-Bestandsanlagen im EEG, UBA Projekt 31 151, Schlussbericht, unveröffentlicht, Berlin, Kassel
- VDE 2012 Verband der Elektrotechnik (VDE) (Hrsg.): Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke – Szenarien bis 2020, April 2012.