



HINTERGRUNDPAPIER

Flexibilisierung von Biogasanlagen in Deutschland

Ein Überblick zu technischen
Ansätzen, rechtlichem Rahmen und
Bedeutung für das Energiesystem

März 2016

Autoren: Marcus Trommler, DBFZ, marcus.trommler@dbfz.de
Martin Dotzauer, Tino Barchmann, Markus Lauer,
Christiane Hennig, Eric Mauky, Jan Liebetrau, Daniela Thrän

Kontakt: Julian Risler, Referent Bioenergien, DFBEE,
julian.risler@developpement-durable.gouv.fr

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Disclaimer

Der vorliegende Text wurde von externen Experten für das Deutsch-französische Büro für erneuerbare Energien (DFBEE) verfasst. Das DFBEE stellt den Autoren lediglich eine Plattform zur Veröffentlichung ihres Beitrags zur Verfügung. Die vertretenen Standpunkte stellen deshalb ausschließlich die Meinung der Autoren dar. Die Ausarbeitung erfolgte mit der größtmöglichen Sorgfalt. Das DFBEE übernimmt allerdings keine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Informationen.

Alle textlichen und graphischen Inhalte unterliegen dem deutschen Urheber- und Leistungsschutzrecht. Sie dürfen, teilweise oder gänzlich, nicht ohne schriftliche Genehmigung seitens des Verfassers und Herausgebers weiterverwendet werden. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Bearbeitung, Übersetzung, Verarbeitung, Einspeicherung und Wiedergabe in Datenbanken und anderen elektronischen Medien und Systemen.



Inhaltsverzeichnis

I. - Einleitung	4
II. - Flexibilität – Bedeutung für das Energiesystem	5
III. - Technische Ansätze zur Flexibilisierung von Biogasanlagen	7
III.a - Anlagentechnik	9
III.b - Gasaufbereitung zu Biomethan und Einspeisung in das Erdgasnetz	10
III.c - Fütterungsmanagement – Regelung der Gasproduktion	11
III.d - Sektorkopplung – Biogasanlagen in Hybridkonzepten	12
IV. - Anreize für die Flexibilisierung von Biogasanlagen	13
IV.a - Die Flexibilitätsprämie im EEG	13
IV.b - Vermarktungskonzepte an Strom- und Regelenergiemärkten	15
V. - Flexible Biogasanlagen – ein Ausblick	16

I. - Einleitung

Der Übergang von einem fossilen zu einem erneuerbaren Energiesystem ist von entscheidender Bedeutung für eine zukünftige nachhaltige Entwicklung. Diese Transformation des Energiesystems erfordert ein Umdenken und eine Neugestaltung, wie Energie in der Zukunft produziert und verteilt werden soll. Mit einem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien entsteht die Anforderung, neue Energiequellen intelligent in das Energiesystem zu integrieren und dabei vorhandene fossile Energiequellen effizient zu ersetzen. Vor allem die volatile Bereitstellung von Strom basierend auf Wind- und Sonnenenergie bedarf neuer Lösungen, um eine nachhaltige und sichere Energieversorgung zu ermöglichen. Eine Strategie dieser Herausforderung zu begegnen ist die Schaffung von Flexibilität im Stromsystem.

Flexibilität kann im Allgemeinen als Möglichkeit für den zeitlichen und räumlichen Ausgleich des Auseinanderfallens von Energieangebot und Energienachfrage anhand unterschiedlicher Technologien definiert werden. So kann z.B. auf der Nachfrageseite der Energieverbrauch gesteuert und die Nachfrage auf Schwachlastzeiten verlagert werden (Demand-Side-Management). Auf der Angebotsseite können z.B. zusätzliche Speicherkapazitäten geschaffen werden oder die Betriebsweise der Energieerzeugungsanlagen der Nachfrage angepasst werden, d.h. es erfolgt eine bedarfsorientierte Bereitstellung von Strommengen.

Biomasse-Technologien bieten die Möglichkeit einer flexiblen und erneuerbaren Energieerzeugung, die die von den Witterungsbedingungen abhängige Verfügbarkeit von Wind- und Sonnenenergie ausgleichen kann. Dadurch tragen flexible Biogasanlagen zum Ausgleich benötigter Strommengen und damit zu einer Entlastung der Stromnetze bei. Die flexible Stromerzeugung aus Biomasse, vor allem Biogas, ist somit ein geeigneter Ansatz für die Integration eines zunehmenden Anteils fluktuierender erneuerbarer Energiequellen in das Stromsystem.

Aktuell kann man den flexiblen Betrieb von Biogasanlagen vor allem in Deutschland finden. Seit 2012 wird die Flexibilisierung von Biogasanlagen über eine Prämienzahlung „Flexibilitätsprämie“ im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), ein Einspeisevergütungssystem, angereizt¹. Bis Mitte 2015 hatten sich rund 3.000 Biogasanlagen für den Erhalt der Flexibilitätsprämie in Deutschland bei ihrem Netzbetreiber angemeldet².

Mit der Novellierung des EEG im Jahr 2014 und der damit einhergehenden Einführung der Direktvermarktung von Strom aus Biogasanlagen von über 500kW in 2014, bzw. von über 100kW seit 1. Januar 2016 ist die Vergütungshöhe für die Stromerzeugung aus Biomasse stark herabgesetzt worden. Folglich ist seit 2014 die Installation von neuen Bioenergieanlagen signifikant zurückgegangen.

¹ (Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG), 2012), (Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014), 2014)

² (Scheftelowitz et al., 2015).

Der Beitrag der Bioenergie im Strom- und dem gekoppelten Wärmesektor wird daher mittelfristig vor allem von den Bestandsanlagen getragen. Für den kurzfristigen Ausgleichsbedarf im Stromsektor werden perspektivisch Batteriespeicher zum Einsatz kommen³. Daher ist es wichtig, die bisher praktizierte und relativ einfach zu implementierende kurzfristige Flexibilität an Biogasanlagen technologisch so weiter zu entwickeln, dass auch mittelfristige, d.h. ein- oder mehrtägige, sowie saisonale Fluktuationen ausgeglichen werden können, für die es weniger technologische Alternativen gibt.

Die nachfolgenden Kapitel zeigen den Status quo des Themas Flexibilisierung von Biogasanlagen in Deutschland in einem Überblick und stellen Bezüge zum Energiesystem, zu technischen Flexibilisierungsansätzen und zum Rechtsrahmen her.

II. - Flexibilität – Bedeutung für das Energiesystem

In einem von fluktuierenden erneuerbaren Energien geprägten Energiesystem gewinnt der Ausgleich von Angebots- und Nachfrageschwankungen durch Flexibilitätsoptionen zunehmend an Bedeutung. Unter den erneuerbaren Energien sind aktuell, neben Geothermie- und Wasserkraftwerken, Bioenergieanlagen im Allgemeinen und Biogasanlagen im Besonderen die verfügbaren erneuerbaren Technologien, die eine gesteuerte Stromproduktion erlauben. Flexible Stromerzeuger - wie Biogasanlagen - bilden zusammen mit anderen Flexibilitätsoptionen - wie Stromnetzen, Speichern und Demand-Side-Management - die Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit des zukünftigen Stromsystems.

Der ansteigende Flexibilitätsbedarf im Stromsystem resultiert vor allem durch zeitliche und räumliche Unterschiede von Angebot und Nachfrage und deren Schwankungen. Räumliche Diskrepanzen können durch leitungsgebundene Infrastrukturen (Gas-, Stromnetze) überwunden werden. Für zeitliche Diskrepanzen ist es wichtig, nach deren Fristigkeit zu differenzieren. So gibt es im Stromsystem sehr kurzfristige Schwankungen von Angebot und Nachfrage im Bereich von wenigen Sekunden bis hin zu einigen Minuten, die durch verschiedene Arten von Regellenergie ausgeglichen werden können.

In der Regel fokussiert der häufig kommunizierte Flexibilitätsbedarf im Stromsektor auf zeitnahe bzw. kurzfristige Bedarfe. Dies korrespondiert mit den Regellenergie-, Intraday- und Spot-Märkten. Hinsichtlich der Fristigkeiten sind zeitliche Anforderungen für Energieerzeuger definiert, um an diesen Märkten teilnehmen zu können. Abbildung 2-1 zeigt die zeitlichen Fristen, die für die Teilnahme an den Strom- und Regelleistungsmärkten verpflichtend sind, im Überblick⁴.

³ (Sternier et al., 2015a)

⁴ Siehe hierzu DFBE-Hintergrundpapier : [Regelreserven und Regelleistungsmärkte in Frankreich und Deutschland](#) (DFBEE, 2015).

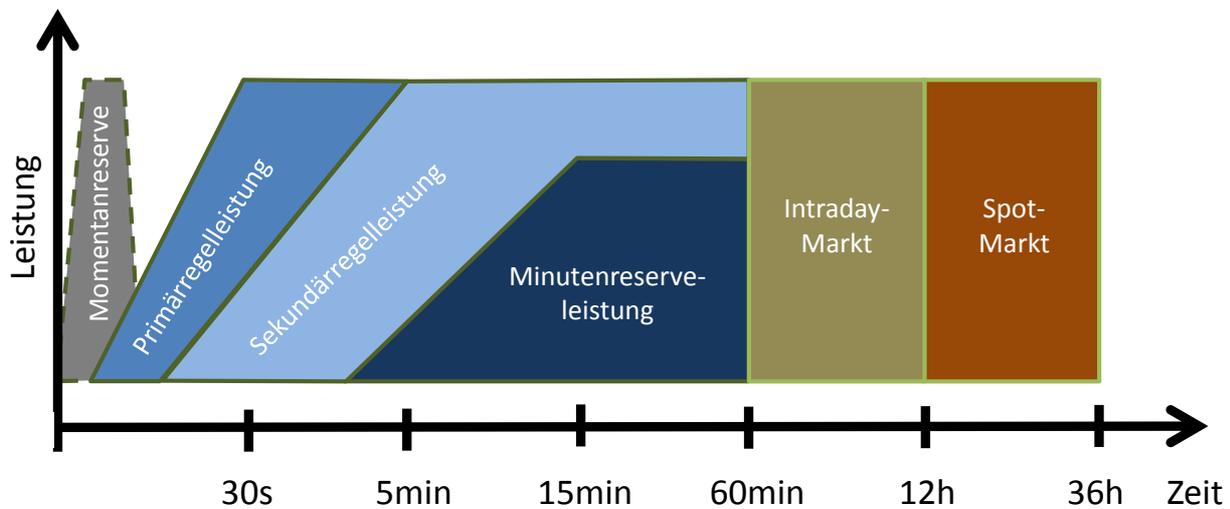


Abbildung 2-1: Schema des zeitlichen Einsatzes der unterschiedlichen Regelleistungsarten und nachfolgender Intraday- und Spotmärkte (Darstellung: DBFZ in Anlehnung an: (dezero GmbH, 2016))

Während Biogasanlagen bereits heute im Rahmen der Direktvermarktung an diesen Märkten teilnehmen (Abbildung 2-1) existieren auch mittel- und langfristige Flexibilitätsbedarfe, die heute noch über die vorhandenen fossilen Kraftwerkskapazitäten abgedeckt werden. Mittelfristige Schwankungen innerhalb von Stunden werden durch den Handel an der Pariser Strombörse EPEX SPOT ausgeglichen (Kapitel IV.b). In Abhängigkeit vom Witterungsverlauf treten auch längerfristige Schwankungen bei Stromerzeugern und -verbrauchern auf, die Ausgleichsbedarfe im Bereich mehrtägiger, mehrwöchiger oder im saisonalen Maßstab induzieren. Auch diese Bedarfe müssen zukünftig, bei einer Reduktion fossiler Kapazitäten, durch erneuerbare Energien getragen werden⁵. Ein möglicher Ansatz liegt in der Nutzung regionaler KWK-Anlagen, großer Gas- und Wärmespeicher sowie der Nutzung von Power-to-Gas-Ansätzen (siehe auch Kapitel III.c).

Die aktuelle Situation ist vor allem durch kurzfristige Flexibilitätsbedarfe geprägt. Deshalb wird hier am Beispiel des deutschen Lastgangs vom 27.12.2015 verdeutlicht, wie fluktuierende Energieeinspeisungen und Nachfrageschwankungen den Bedarf für mittelfristige Flexibilitätsoptionen determinieren (Abbildung 2-2). Der aktuelle mögliche Beitrag von Pumpspeicherkraftwerken (PSW) und der zukünftig mögliche Beitrag von Bioenergie (Bio-Flex) zum Ausgleich von Schwankungen sind zusammen abgebildet. Die Lastprofile, die auf Daten der vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber basieren, zeigen im linken Teil der Abbildung 2-2, dass in Deutschland an diesem Tag stundenweise bereits ein Großteil des Strombedarfs aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden kann. Zugleich ist gut zu erkennen, dass Verbrauchs- und Erzeugungslastgänge nicht parallel verlaufen. Des Weiteren trifft am Abend des 27.12.2015 ein steigender Verbrauch mit einer abnehmenden Gesamterzeugung aus erneuerbaren Energiequellen zusammen.

⁵ (Thrän, 2015a)

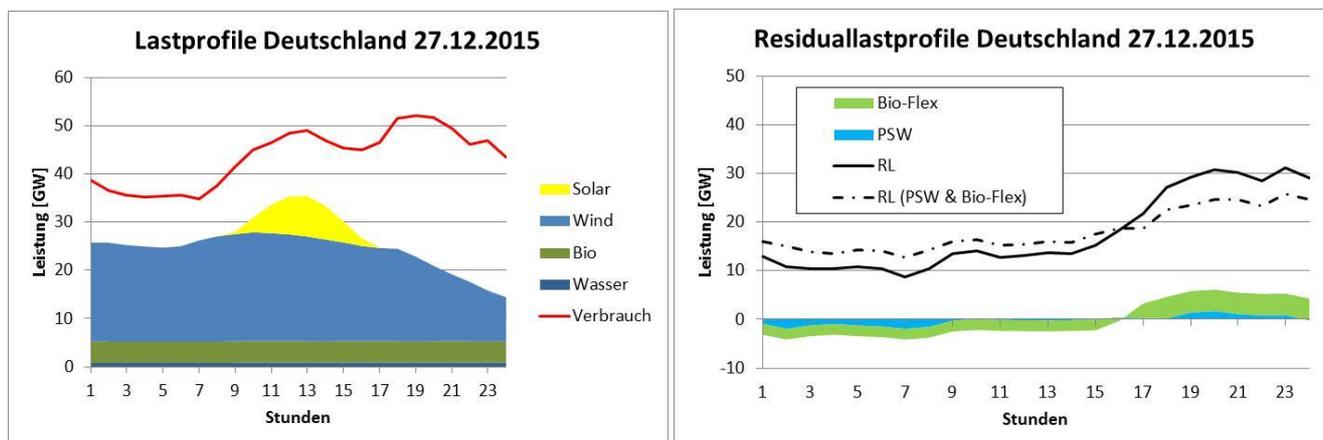


Abbildung 2-2: Lastprofile für Deutschland am 27.12.2015 eigene Darstellung auf Basis (ENTSOE, 2016); Bio-Flex=Flexibilisierungseffekt der Bioenergie, PSW=Pumpspeicherwerke, RL=Residuallast

Bioenergieanlagen speisen heute (linker Teil der Abbildung 2-2) überwiegend konstant in Grundlastfahrweise Strom ins Netz ein. Im Rahmen einer fortschreitenden Energiewende wird die Schwankungsbreite der fluktuierenden Einspeiseanlagen zunehmen und es werden immer weniger fossile Kraftwerke für den Ausgleich dieser Schwankungen zur Verfügung stehen.

Die Differenz aus dem Strombedarf und der Einspeisung aus Wind und Solarenergie wird als Residuallast (RL) bezeichnet (rechter Teil der Abbildung 2-2). Die Kurve illustriert die großen Schwankungen, denen die Residuallast unterliegt. Die Kurve RL (PSW & Bio-Flex) in Abbildung 2-2 zeigt den möglichen Anteil, den die heutigen PSW und Bioenergieanlagen perspektivisch zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage beitragen können. Der Effekt einer Flexibilisierung des gesamten Bestandes an Bioenergieanlagen (Biogas, feste Biomasse) beruht dabei auf der Annahme, dass die installierte Leistung aller Anlagen bei konstanter Jahresarbeit (konstante Gasproduktion) verdoppelt wird und 50 % der Jahresarbeit im Grundlastsockel verbleiben. Technisch machbar sind aber auch Ansätze, die den Grundlastsockel weiter reduzieren, wodurch das auf der rechten Seite von Abbildung 2-2 abgebildete Potenzial zur Verschiebung der Stromerzeugung weiter gesteigert werden könnte.

III. - Technische Ansätze zur Flexibilisierung von Biogasanlagen

Landwirtschaftliche Biogasanlagen wurden in Deutschland überwiegend für einen konstanten Energieoutput ausgelegt. Für einen flexiblen Anlagenbetrieb stehen mehrere technische Optionen zur Verfügung. Die unterschiedlichen Optionen zur Flexibilisierung entlang der Verwertungskette einer Biogasanlage sind in Abbildung 3-1 dargestellt.

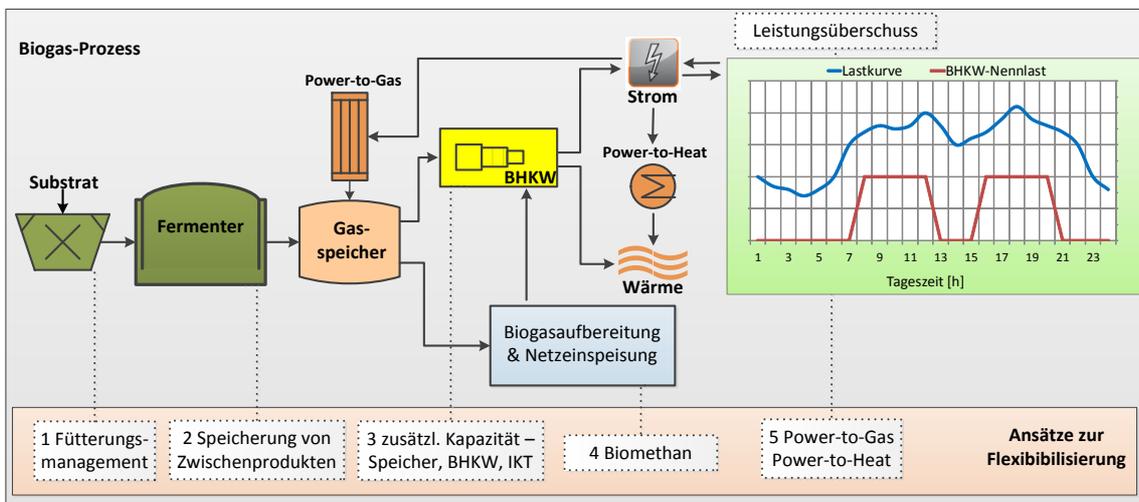


Abbildung 3-1: Optionen für die Flexibilisierung von Biogasanlagen (angepasst nach Szarka u. a., 2013); BHKW=Blockheizkraftwerk, IKT=Informations- und Kommunikationstechnologie

In der Regel erfolgt die Flexibilisierung von Biogasanlagen in Deutschland heute mit dem Ziel der bedarfsgerechten Stromproduktion, um kurzfristige Preisschwankungen an der Strombörse zu nutzen⁶. Ziel solcher Flexibilisierungsansätze ist es, die Stromerzeugung dort zu konzentrieren, wo hohe Erlöspotentiale liegen. Dazu ist es grundsätzlich notwendig, die Gaserzeugung durch die Fermentation von der Stromerzeugung durch das Blockheizkraftwerk (BHKW) zu entkoppeln. Praxisrelevante Ansätze zur Flexibilisierung von Biogasanlagen, die dies ermöglichen, umfassen:

1. **Anlagentechnik:** Erweiterung der BHKW- und Gasspeicherkapazität sowie weiterer Komponenten; bei gleichbleibender Gaserzeugung treten temporär erhöhte Gasvolumenströme durch die gesteigerte Verstromungsleistung auf. Im kleinen Umfang können auch baulich unveränderte Anlagen, die für den kontinuierlichen Betrieb ausgelegt sind, Flexibilität bereitstellen, wenn bspw. das BHKW kurzfristig abgeschaltet wird und die vorhandene Gasspeicherkapazität die Gasmenge aufnehmen kann (siehe Kapitel III.a).
2. **Gasaufbereitung zu Biomethan und Einspeisung in das Erdgasnetz für zeitliche, räumliche und sektorale Flexibilität:** Das auf Erdgasqualität aufbereitete Biomethan wird dabei in das Erdgasnetz eingespeist und kann nachfolgend in diversen Sektoren (Strom, Wärme, Kraftstoff) sowie der chemischen Industrie Verwendung finden (siehe Kapitel III.b).
3. **Fütterungs- bzw. Substratmanagement:** Beim Substratmanagement wird kurzfristig die gezielte Gabe von schnell umsetzbaren Substraten dazu genutzt, die Gasproduktion in Zeiträumen hoher Strompreise zu steigern. In Niedrigpreiszeiten erfolgt zunächst die Reduzierung von schnell umsetzbaren Substraten. Dieser Ansatz kann mit der Speicherung von Zwischenprodukten kombiniert werden. Dabei erfolgen eine Speicherung von Intermediaten aus der Hydrolyse und deren zielgerichteter Einsatz als schnell umsetzbarer Einsatzstoff. Im weiteren Sinne kann mittel- bis langfristige Flexibilität auch durch die Reduktion von Substratmengen geschaffen werden. Dabei werden die gesamterzeugte Strommenge und damit auch die Bemessungsleistung reduziert.

⁶ (Drescher, 2015)

Für derartige Konzepte ist der Bedarf an technischen Anpassungen kleiner als bei Konzepten, die die gesamt erzeugte Strommenge konstant halten (siehe Kapitel III.c).

4. Sektorkopplung über Power-to-Heat und Power-to-Gas: Biogas- und insbesondere Biomethananlagen bieten Verknüpfungspunkte zu den Technologien Strom-zu-Wärme (Power-to-Heat, PtH) und Strom-zu-Gas (Power-to-Gas, PtG). Ab dem Jahr 2030/2035 werden im Zuge der Energiewende Stromüberschüsse in Deutschland deutlich zunehmen, weshalb dann Speicheransätze für diese Energiemengen an Bedeutung gewinnen, um Überschüsse zielgerichtet zu nutzen und Abregelungen weitestgehend zu vermeiden. Bis 2050 werden je nach Szenario jährliche Stromüberschüsse in Höhe von etwa 154 TWh pro Jahr erwartet⁷ (siehe Kapitel III.d).

III.a - Anlagentechnik

Um bei konstanter Jahresarbeit die Stromproduktion in hochpreisigen Zeitabschnitten zu konzentrieren, ist die Steigerung der BHKW-Kapazität notwendig. Mit zunehmendem Grad der Überbauung, kann die Verstromungsleistung des BHKW von der Gaserzeugungsleistung der Biogasanlage entkoppelt werden (siehe Abbildung 3-2)⁸. In Abhängigkeit von der Anlagenkonfiguration können weitere Komponenten auf die Leistungserhöhung angepasst werden. Tabelle 1 zeigt einen Überblick von Anlagenkomponenten, die bei der Flexibilisierung tangiert werden:

Tabelle 1: Bei konstanter Jahresarbeit notwendige und weitere optionale technische Komponenten zur bedarfsgerechten Stromerzeugung von Biogasanlagen

Notwendige Komponenten	Komponenten in Abhängigkeit vom Flexibilisierungskonzept (optional)
Zusätzliche BHKW-Kapazität	Anpassungen bei Fütterungssystem / Einbringtechnik
Zusätzliche Gasspeicher-Kapazität	Ggf. Erweiterung, der Gasleitungen als Anpassung an die veränderten Gasvolumenströme
Informations- und Kommunikationstechnologie	Anpassung der Rohbiogasaufbereitung (Entschwefelung und Trocknung)
	Transformator und Netzanbindung
	Wärmespeicher

Die zentrale Anlagenkomponente für die Flexibilisierung durch Erweiterung der Verstromungskapazität ist das BHKW. Die Installation eines zusätzlichen BHKW zu bereits bestehenden Aggregaten ist vor allem bei Bestandsanlagen zu bevorzugen, wenn das bestehende Aggregat noch nicht vollständig abgeschrieben ist. Der Austausch des Bestands-BHKW durch ein neues und größeres BHKW bringt dagegen den Vorteil, dass der spezifische Investitionsbedarf kleiner ist und hohe Wirkungsgrade erreicht werden können.

⁷ (Sternier et al., 2015b)

⁸ (Liebetrau et al., 2015)

Auf der anderen Seite bietet eine Biogasanlage mit mehreren BHKW auch Vorteile hinsichtlich der Vermarktungsstrategie, da dann mit verschiedenen BHKW unterschiedliche Märkte bedient werden können (vgl. Kapitel IV.b). Die Erweiterung bzw. Aufrüstung eines Gasspeichers sowie die entsprechende Installation von Informations- und Kommunikationstechnologien zur Fernsteuerung der Biogasanlagen ist in den meisten Fällen eine obligatorische Voraussetzung für den flexiblen Betrieb.

Daneben gibt es eine Reihe weiterer Komponenten, die je nach Art und Ausprägung der zukünftig geplanten Flexibilisierung eine Modifikation bzw. Erweiterung erfahren. Hierzu zählen die Beschickung, die Gasleitungen sowie die Gaskonditionierung, ggf. der Transformator und die Stromanschlussleitung. Außerdem sind je nach Wärmekonzept zusätzliche Wärmespeicherkapazitäten vorzusehen. Eine Möglichkeit, die dargestellten technischen Optionen für Flexibilität zu flankieren, ist mit dem Fütterungsmanagement gegeben. Ziel ist dabei, die Gasbildungsrate durch Umfang, Zusammensetzung und Zeitpunkt der Substratgaben zu beeinflussen.

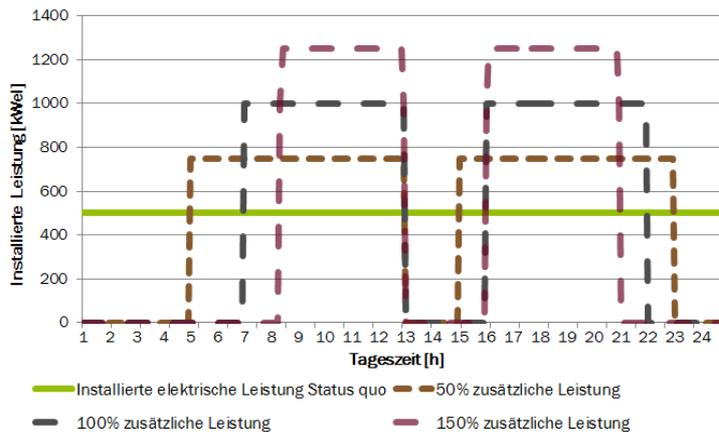


Abbildung 3-2: Konzentration der Stromproduktion durch Steigerung der installierten Leistung gegenüber der Leistung in Bezug auf die Gaserzeugung

Flexibilisierung eine Modifikation bzw. Erweiterung erfahren. Hierzu zählen die Beschickung, die Gasleitungen sowie die Gaskonditionierung, ggf. der Transformator und die Stromanschlussleitung. Außerdem sind je nach Wärmekonzept zusätzliche Wärmespeicherkapazitäten vorzusehen. Eine Möglichkeit, die dargestellten technischen Optionen für Flexibilität zu flankieren, ist mit dem Fütterungsmanagement gegeben. Ziel ist dabei, die Gasbildungsrate durch Umfang, Zusammensetzung und Zeitpunkt der Substratgaben zu beeinflussen.

III.b - Gasaufbereitung zu Biomethan und Einspeisung in das Erdgasnetz

Ein weiterer Ansatz zur flexiblen Strombereitstellung ist die Aufbereitung des Biogases zu Biomethan. Das Biomethan wird in das Erdgasnetz eingespeist und kann dann unabhängig von der Gasproduktion in den Sektoren Strom, Wärme, Mobilität als auch zur Herstellung chemischer Grundstoffe eingesetzt werden. Im Falle der Stromerzeugung aus Biomethan erfolgt die Verstromung in dezentralen Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung. Diese Option gewährleistet eine optimale Ausnutzung des Biogases, da Strom und Wärme vorrangig in direkter Nähe zu Wärmesenken erzeugt und dort bei hohen Gesamtwirkungsgraden in der Regel fossile Energieträger substituiert werden. Die Zwischenspeicherung von Biomethan im Gasnetz bietet einen hohen Grad an zeitlicher und räumlicher Flexibilität, da das Gas im Gasnetz transportiert und zwischengespeichert werden kann.

Die Erzeugung und Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz zeigt so bereits heute, welche Vorteile mit einer Sektorkopplung Strom-Gas in der Erzeugung und bei Strom-Wärme-Mobilität in der Nutzung möglich sind.

III.c - Fütterungsmanagement – Regelung der Gasproduktion

Um Energie aus Biogasanlagen flexibel und bedarfsorientiert bereitzustellen, besteht auf der Prozessstufe der Gasproduktion die Möglichkeit, den Einfluss auf die Energiebereitstellung aus Biogasanlagen qualitativ zu verbessern. Bisher werden Biogasanlagen weitestgehend konstant gefüttert und Rationsanpassungen vor allem dann vorgenommen, wenn die Energiegehalte der Substrate schwanken oder der Gasspeicherfüllstand bei Grundlastfahrweise zum oberen oder unteren Füllstand driftet. Im Rahmen der Flexibilisierung von Biogasanlagen kann eine gezielte Rationierung aber auch dazu genutzt werden, vorrangig in den Zeiträumen Gas zu produzieren, in denen die Verstromung des BHKW konzentriert werden soll. Da die Gasbildungsrate von vielen Faktoren abhängt und nicht einfach zu prognostizieren ist, wird mit diesem Instrument momentan meist ein mittel- bis langfristiger Flexibilisierungsbedarf abgedeckt (saisonal, monatlich, wöchentlich). Allerdings konnte gezeigt werden, dass sich auch kurzfristige Bedarfsschwankungen (täglich, stündlich) mit einem Fütterungsmanagement realisieren lassen⁹. Die Abbaugeschwindigkeit der Substrate spielt dabei eine entscheidende Rolle. Insbesondere durch den flexiblen Einsatz von schnell abbaubaren Substraten (z.B. Zuckerrüben) kann eine hohe Prozessdynamik erzeugt werden. Um den Verlauf der Gasbildungsrate entsprechend des Bedarfes prognostizieren und manipulieren zu können, bedarf es einer vorausschauenden Regelung. Eine solche modellgestützte Regelung wurde am DBFZ entwickelt und erfolgreich an der DBFZ-Forschungsbiogasanlage (165 m³ Fermentervolumen) sowie an der Biogasanlage „Unterer Lindenhof“ (800 m³ Fermentervolumen) der Universität Hohenheim getestet¹⁰. Durch die flexible und vorausschauende Fütterung konnte der Prozess hochflexibel betrieben und die notwendige Gasspeicherkapazität im Vergleich zur konstanten Betrieb um bis zu 45 % reduziert werden. Die dabei verwendeten Substrate waren Rindergülle, Mais-, Gras- und Zuckerrübensilage sowie Getreideschrot.

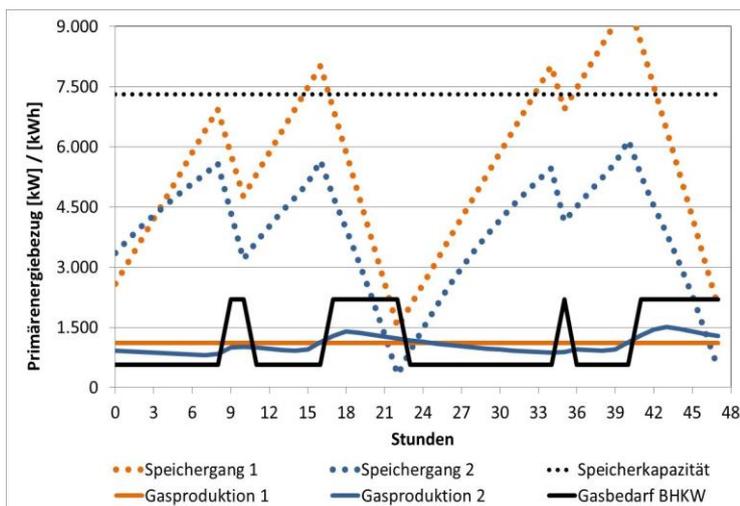


Abbildung 3-3: Modellhafter Vergleich zwischen statischer Fütterung (1) und dynamischer Fütterung (2), in Bezug auf Gasproduktion und der resultierenden Gasspeichergänge über 48 Stunden, eigene Abbildung

Das Fütterungsmanagement als Flexibilisierung der ersten Konversionsstufe im Biogasprozess kann somit dazu dienen, die im Kapitel III.a beschriebenen Instrumente zur technischen Flexibilisierung bei der Gasverwertung zu flankieren. Es entstehen dabei gegenüber einer konstanten Gasproduktion vor allem größere Spielräume in der Fahrplangestaltung, da der Gasverbrauch und die Gaserezeugung synchronisiert werden können, womit absolut gesehen für den gleichen Fahrplan weniger Gasspeichervolumen beansprucht wird (siehe Abbildung 3-3).

⁹ (Mauky et al., 2015)

¹⁰ (Mauky et al., in Press)

III.d - Sektorkopplung – Biogasanlagen in Hybridkonzepten

Weitere technische Ansätze zur Nutzung des Flexibilitätpotentials von Biogasanlagen liegen bei einem sektor-gekoppelten Einsatz von Biogas in so genannten Power-to-Heat und Power-to-Gas-Konzepten (Liebetrau et al., 2015). Die Biogastechnologie, die in Deutschland im Wesentlichen durch KWK-Anlagen getragen wird, bietet sinnvolle Anknüpfungspunkte für PtH- und PtG-Ansätze. Bereits heute werden Biogasanlagen mit PtH kombiniert, um die Versorgung von Wärmekunden der Biogasanlage während einer Verstromungspause der BHKW sicherzustellen. Dies wird vor allem in Netzbereichen genutzt, die schon heute schon temporär mit der Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien überlastet sind, wodurch der Netzbetreiber Anlagen im Rahmen des Einspeisemanagements vom Netz nimmt. Bei PtH werden elektrische Heißwassererzeuger oder Wärmepumpen dazu genutzt, Überschussstrom in Wärme umzuwandeln. Biogasanlagen bieten sich für den Einsatz von PtH an, da durch temporäre BHKW-Abschaltung durch den Netzbetreiber in Zeiten mit hohen Stromüberschüssen, die Versorgung der Wärmekunden und der Eigenwärmebedarf der Biogasanlage gesichert werden kann und Standorte von Biogasanlagen so als Stromsenken fungieren¹¹.

Bei PtG wird Überschussstrom über eine Elektrolyse in Wasserstoff umgesetzt. Dieser kann zusammen mit dem bei der Fermentation in Biogasanlagen erzeugten CO₂ durch Katalysatoren oder im Rahmen einer biologischen Methanisierung, zu Methan transformiert werden. Dabei stellt die biologische Methanisierung durch die gezielte Nutzung der in Biogasanlagen vorkommenden Bakterien eine gut erschließbare Schnittstelle dar, um mit einem relativ einfachen Verfahren erneuerbares Methan als Langzeitspeicher zu erzeugen^{12,13}. Zur Kombination von Biogasanlagen mit PtG existieren bereits erste Pilotprojekte, die auch im industriellen Maßstab zeigen, wie eine Sektorkopplung Strom-Gas unter Einbindung von Biogasanlagen funktionieren kann. Am Beispiel der 6,3 MW-PtG-Anlage in Werlte wurde gezeigt, wie eine katalytische Methanisierung anhand von CO₂ aus der am Standort befindlichen Biogasanlage umgesetzt werden kann¹⁴. Ein Überblick zu aktuellen und im Bau befindlichen PtG-Pilot- und Demonstrationsprojekten ist auf der Strategieplattform Power to Gas der Deutschen Energieagentur einsehbar¹⁵.

¹¹ (Schwill, 2014)

¹² (Sievers, 2013)

¹³ (Viessmann, 2015)

¹⁴ (Etogas, 2013)

¹⁵ (Dena, 2015)

IV. - Anreize für die Flexibilisierung von Biogasanlagen

Die fluktuierende Einspeisung erneuerbarer Energien und die schwankende Stromnachfrage beeinflussen zu einem großen Teil die kurzfristigen Strommärkte (Spotmärkte). Aufgrund der Schwankungen von Angebot und Nachfrage können sich zum Teil stark variierende Preise zwischen den einzelnen Stunden am Spotmarkt der Strombörse einstellen. Mittel- bis langfristig ist mit steigenden Preisvolatilitäten in Folge des weiteren Ausbaus erneuerbarer Energien und dem Abbau konventioneller Kraftwerkskapazitäten zu rechnen, so dass sich Flexibilitätsoptionen in zunehmendem Maße über diese Preisschwankungen refinanzieren können. Damit Biogasanlagen als Flexibilitätsoption eingesetzt werden können, muss Biogas durch Speicher oder flexible Gasproduktionsraten so verfügbar gemacht werden, dass sie ihre Stromproduktion variieren und diese auf Phasen von Hochpreiszeiten konzentrieren können. Da Zeiten hoher Preise meist durch eine hohe Nachfrage bei gleichzeitig geringer Einspeisung aus volatilen erneuerbaren Erzeugern gekennzeichnet sind, wird damit die Systemintegration von Wind- und Photovoltaikanlagen unterstützt.

Die Stromgestehungskosten von Biogasanlagen liegen in Deutschland bei etwa 16 bis 25 ct/kWh_{el} in Abhängigkeit der Anlagengröße und der eingesetzten Substrate. Bei sehr guten Rohstoff- und Anlagenkonzepten sind auch geringere Stromgestehungskosten möglich¹⁶. Die durchschnittlichen Strompreise an der EPEX SPOT SE liegen jedoch deutlich unterhalb der Stromgestehungskosten von Biogasanlagen. Daher wurde mit dem EEG und der Implementierung einer festen Einspeisevergütung ein Förderinstrument geschaffen, welches einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb ermöglicht. Darüber hinaus wird seit der Novellierung des EEG im Jahr 2012 die Flexibilisierung von Biogasanlagen durch die Flexibilitätsprämie finanziell angereizt. Ein flexibler Anlagenbetrieb erhöht in Folge der notwendigen Überkapazitäten an Verstromungsleistung und ggf. zusätzlich notwendigen Gas- und Wärmespeichern die Stromgestehungskosten um rund 2 bis 5 ct/kWh_{el}¹⁷. Ziel der Flexibilitätsprämie ist es diese erhöhten Kosten zum Teil auszugleichen und dabei einen systemdienlichen flexiblen Betrieb der Biogasanlagen anzureizen. Diese wird im Folgenden genauer dargestellt.

IV.a - Die Flexibilitätsprämie im EEG

Mit der Novellierung des EEG im Jahr 2012 wurde die Flexibilitätsprämie für Anlagen, die Strom aus Biogas erzeugen (einschließlich Biomethan), eingeführt (EEG 2012, §33i). Die Prämie dient als Anreiz, zusätzliche installierte elektrische Leistung für eine bedarfsorientierte Stromerzeugung bereitzustellen. Dies kann durch Installation eines oder mehrerer zusätzlicher BHKW oder den Austausch eines Alt-BHKW durch ein größeres BHKW geschehen. Der Anreiz zur Flexibilisierung besteht mit dem EEG 2014 fort (§ 54 EEG 2014). Die Flexibilitätsprämie soll ein Paradigmenwechsel bei Biogasanlagen einleiten; von einer Maximierung der Volllaststunden bei Grundlastfahrweise hin zu einer flexiblen Fahrweise zur Unterstützung der Systemintegration fluktuierender erneuerbarer Energien.

¹⁶ (Kost, C. et al., 2013; Nitsch et al., 2012; Scheffelowitz et al., 2014)

¹⁷ (Hauser et al., 2014)

Die Flexibilitätsprämie kann als eine Kapazitätsprämie für flexible Biogasanlagen interpretiert werden. Stark vereinfacht, erhält der Anlagenbetreiber für die zusätzliche Anlagenleistung, die er für einen flexiblen Betrieb einsetzt, 130 €/kW_{el} pro Jahr auf 10 Jahre begrenzt.

Die kumulierte Anlagenanzahl und installierte Leistung der Anlagen, die sich zur Inanspruchnahme der Flexibilitätsprämie im Zeitverlauf von Januar 2012 bis Juli 2015 angemeldet haben, sind in Abbildung 4-1 dargestellt. Das Jahr 2014 zeichnete sich durch einen enormen Anstieg der Inanspruchnahme der Flexibilitätsprämie von Biogasanlagen in Deutschland aus. Da im Jahr 2014 eine Novellierung des EEG angesetzt war, die am 01.08.2014 in Kraft trat, bestand für viele Anlagenbetreiber im Vorfeld Unklarheit über die zukünftigen Regelungen zur Flexibilisierung. Der starke Anstieg der Anmeldungen zur Flexibilitätsprämie im Juni/Juli 2014 ist daher als Vorzieheffekt aufgrund großer Unsicherheit hinsichtlich der EEG-Novellierung 2014 zu interpretieren. Zum Stand August 2015 haben sich rund 3.000 Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 1.700 MW_{el} zur Inanspruchnahme der Flexibilitätsprämie angemeldet.

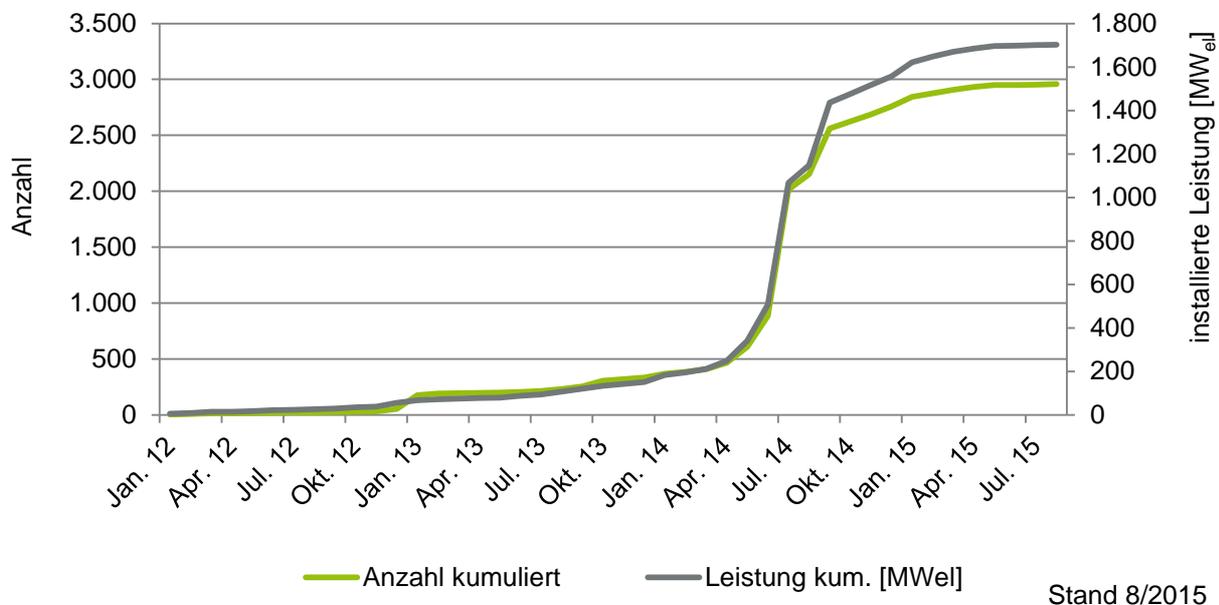


Abbildung 4-1: Kumulierte Anlagenanzahl und installierte elektrische Anlagenleistung nach Anmeldung zur Inanspruchnahme der Flexibilitätsprämie (Scheftelowitz et al., 2015)

Mit Hilfe der Flexibilitätsprämie sollen die notwendigen Investitionen für einen flexiblen Anlagenbetrieb teilweise refinanziert werden. Zusätzliche Einnahmen können durch eine Verlagerung der Stromproduktion in hochpreisige Zeiten erreicht werden, wodurch Erlöse oberhalb des monatlichen Durchschnittspreises an der Börse für kurzfristige Strommarktprodukte (EPEX SE) generiert werden.

IV.b - Vermarktungskonzepte an Strom- und Regelleistungsmärkten

Prinzipiell bietet die Direktvermarktung für Anlagenbetreiber von Biogasanlagen die Möglichkeit sowohl an den Strom- als auch den Regelleistungsmärkten teilzunehmen. Aus Gründen der Erläusoptimierung ist es wichtig zu hinterfragen, ob ein Vermarktungskonzept für nur einen der beiden Märkte oder eine Kombination aus Strom- und Regelleistungsmärkten vorzuziehen ist¹⁸.

Bei der Teilnahme an den Regelleistungsmärkten erhält der Anlagenbetreiber in Abhängigkeit des Regelleistungserzeugnisses einen Leistungspreis für das Vorhalten der angebotenen Leistung und einen Arbeitspreis für den Fall des tatsächlichen Regelleistungabrufs. Grundsätzlich wird zwischen positiver und negativer Regelleistung bzw. Regelleistung unterschieden. Bei positiver Regelleistung muss die Stromproduktion kurzfristig erhöht und bei negativer Regelleistung abgesenkt werden. Mit Biogasanlagen sind beide Arten der Regelleistungserbringung möglich. Bietet der Anlagenbetreiber nun für einen bestimmten Zeitraum negative Regelleistung an, muss dieser sicherstellen, dass er bei Abruf auch seine Einspeiseleistung um das abgegebene Gebot absenken kann. Damit ist der Betreiber an dieses Zeitfenster gebunden und kann nur noch bedingt seine Stromproduktion für die Vermarktung an der Strombörse optimieren. Gleiches gilt für positive Regelleistung. In diesem Fall darf die Anlage nicht mit Nennleistung Strom produzieren, da eine Leistungserhöhung bei Regelleistungabruf sichergestellt werden muss.

Die Zeitscheiben für die Regelleistungsvorhaltung sind produktabhängig und liegen bei den für Biogasanlagen relevanten Produkten zwischen 4 und 12 Stunden bei Tertiär- und Sekundärregelleistung (Abbildung 4-2). Darüber hinaus wird Tertiärregelleistung täglich und Sekundärregelleistung (SRL) wöchentlich ausgeschrieben. Bei wöchentlichen Ausschreibungszeiten wird eine strommarktoptimierte Fahrweise deutlich erschwert, da sich die Anlage für eine ganze Woche an die Regelleistungervermarktung bindet und somit nicht tageweise entscheiden kann, welches Marktsegment vorteilhafter zu bedienen ist. Zum anderen können aktuell bei einer synchron zur Zeitscheibe erfolgenden BHKW-Taktung (12-Stunden-Blöcke) nur vergleichsweise geringe Mehrerlöse an der Strombörse erwirtschaftet werden. Dies liegt an der zumeist zweigipfligen Ausprägung des Preisprofils zu den nachfrageintensiven Stunden am Morgen und Abend an der Strombörse (Abbildung 4-2), wodurch ein 12-Stundenblock die hochpreisigen Stunden nicht optimal abdecken kann. Verfügt die Biogasanlage nur über ein BHKW, macht dies in der Regel eine Entscheidung notwendig, an welchem Markt die Erlöse primär optimiert werden sollen. Eine unbeschränkte Kombination der Vermarktung von Biogasanlagen ist durch die aktuell geltenden Bedingungen der verschiedenen Märkte nicht möglich.

¹⁸ (Lauer and Dotzauer, 2015)

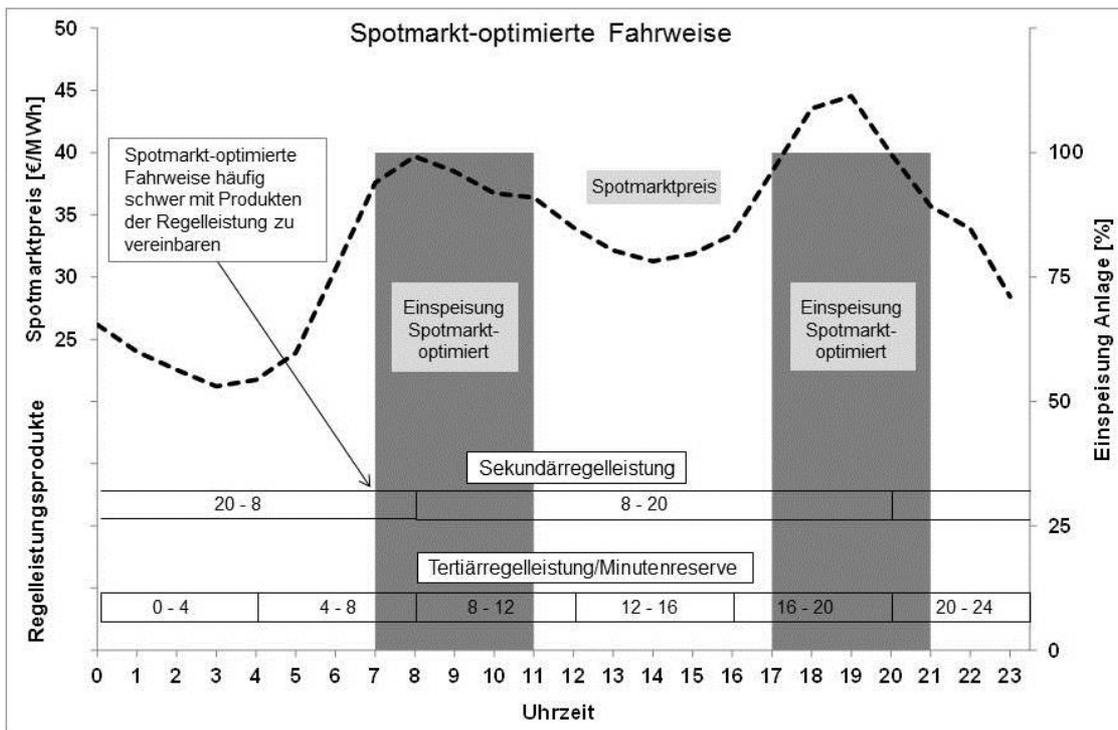


Abbildung 4-2: Darstellung des stündlichen Durchschnittspreises des Jahres 2014 an der EPEX Spot SE (European Energy Exchange (EEX), 2015) sowie der Einspeisung einer Biogasanlage für einen Beispieltag. Zugleich sind Sekundär- und Tertiärregelung mit den für die Vermarktung geltenden Zeitscheiben abgebildet.

Für flexibilisierte Biogasanlagen mit mehreren Verstromungsaggregaten bietet es sich derzeit an, mindestens eines weiterhin in Grundlastfahrweise zu betreiben und zum kontinuierlichen Anbieten negativer Regelleistung zu verwenden¹⁹. Die verbleibenden Aggregate werden flexibel am Strommarkt möglichst zu Hochpreiszeiten eingesetzt (sog. teilflexible Fahrweise). Damit können Mehreinnahmen sowohl an Strom- als auch an den Regelleistungsmärkten generiert werden. Bedingt durch schwankende Strom- und Regelleistungspreise kann sich die optimale Vermarktungsstrategie von Biogasanlagen an den Strom- und Regelleistungsmärkten ändern, weshalb sie in regelmäßigen Abständen von den Stromhändlern evaluiert und angepasst wird.

V. - Flexible Biogasanlagen – ein Ausblick

Ein zunehmend von fluktuierenden erneuerbaren Energien getragenes Energiesystem wird zukünftig verstärkt konventionelle Kraftwerkskapazitäten verdrängen. Daraus ergeben sich Auswirkungen hinsichtlich der Versorgungssicherheit und der Funktionsweise der Stromversorgung. Wo zuvor der konventionelle Kraftwerkspark, dessen Strombereitstellung gegenüber Windkraft- und Photovoltaikanlagen wetterunabhängig ist, gesicherte Leistung für das Stromsystem bot, müssen nun zunehmend Flexibilitätsoptionen die Versorgung sicherstellen.

¹⁹ (Lauer and Dotzauer, 2015)

Dabei entstehen Flexibilitätsbedarfe für verschiedene Fristen, die durch die Angebots- als auch durch die Nachfrageseite bedient werden können.

Ein weiterer Aspekt der Energiewende ist die mit ihr einhergehende Dezentralisierung der Energiebereitstellung²⁰. Während bisher Strom vorwiegend zentral in Großkraftwerken erzeugt und anschließend über die verschiedenen Spannungsebenen (Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannung) zum Konsumenten transportiert wurde, findet die Erzeugung bereits heute zu einem erheblichen Anteil auf Ebene der Stromverteilernetze (Mittel- und Niederspannung) statt²¹.

Beide Aspekte, die Änderung der gesicherten Leistung im Gesamtsystem und der Trend zur Dezentralisierung der Stromerzeugung, führen jeweils zu einem Bedarf an Flexibilitätsoptionen. Biogene KWK-Anlagen tragen bereits heute zur flexiblen und bedarfsgerechten Stromerzeugung bei, indem sie verschiedene Strom- und Regelenergieprodukte anbieten (Kapitel IV.b). Aufgrund der fortschreitenden Reduktionen fossiler Kraftkapazitäten wird die Bedeutung von KWK-Anlagen voraussichtlich weiter zunehmen, da diese im Kreise der erneuerbaren Energien verhältnismäßig gut gesicherte Leistung bereitstellen können. Grundvoraussetzung hierfür ist eine weitere Steigerung der Stromvermarktung von Biogasanlagen an den Strom- und Regelenergiemärkten. Auch zur Begrenzung des Netzausbaubedarfs können flexible Erzeuger, wie Biogasanlagen bei entsprechender Fahrweise, einen wertvollen Beitrag leisten, wenn sie intelligent in die Netzplanung und -bewirtschaftung mit einbezogen werden.

Zusätzlich verfügen Biogasanlagen über verschiedene Anknüpfungspunkte zu anderen Technologien in unterschiedlichen Nutzungspfaden. Stand der Technik ist heute beispielsweise die Aufbereitung von Biogas zu Biometan und dessen Einspeisung in das Erdgasnetz. Durch die bereits in großem Umfang vorhandenen Speicherkapazitäten des Erdgasnetzes kann die Biogaserzeugung von der Biogasnutzung weitestgehend entkoppelt werden. Dadurch entsteht ein hohes Maß an Flexibilität in der Art der Nutzung (Strom, Wärme, Mobilität) als auch zum Ausgleich zeitlicher und räumlicher Disparitäten.

Die beschriebenen Anknüpfungspunkte für eine Sektorkopplung mit den Technologien Strom-zu-Wärme (Power-to-Heat) und Strom-zu-Gas (Power-to-Gas) werden voraussichtlich erst ab dem Jahr 2030/2035 von Bedeutung sein. Ab dann werden die Stromüberschüsse deutlich zunehmen, weshalb intelligente Nutzungs- bzw. Speicheransätze für diese Energiemengen an Bedeutung gewinnen²². Die Biogastechnologie, die in Deutschland im Wesentlichen durch KWK-Anlagen getragen wird, bietet hier sinnvolle Anknüpfungspunkte²³. Zur Kombination von Biogasanlagen mit PtG existieren bereits erste Pilotprojekte, die negative SRL vermarkten und Überschussstrom in erneuerbares Gas umwandeln^{24,25}.

²⁰ (Karl, 2012)

²¹ (Büchner et al., 2014)

²² (Stern et al., 2015b)

²³ (Thrän, 2015b)

²⁴ (Dena, 2015)

²⁵ (Viessmann, 2015)

Zukünftig können insbesondere Biomethan-Anlagen aufgrund des vorhandenen Erdgasanschlusses für PtG geeignet sein, indem sie mit Überschussstrom Wasserstoff erzeugen und diesen mit dem in der Anlage vorhandenen biogenen CO₂ in Methan konvertieren. PtG-Ansätze werden ihr Potential voraussichtlich erst entfalten, wenn zunehmende Stromüberschüsse ausreichend lange Betriebszeiten erlauben. Insofern handelt es sich hier um eine Zukunftstechnologie, deren Entwicklung heute ratsam erscheint, damit sie ab 2030 mit der dann notwendigen Kapazität genutzt werden kann. Die bestehende Erdgasinfrastruktur bietet gute Voraussetzungen, diese Technologie schrittweise in einer bestehenden Technologieumgebung (z.B. zusammen mit Biogasanlagen) zu entwickeln und in einen bestehenden Markt einzuführen.



Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
BHKW	Blockheizkraftwerk
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
CSTR	continuous stirred-tank reactor
ENTSOE	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EPEX	European Power Exchange
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
PSW	Pumpspeicherwerk
PtH	Power to Heat: Umwandlung von Überschussstrom in Wärme
PtG	Power to Gas: Umwandlung von Überschussstrom in Gas
RL	Residuallast (Last abzüglich unterschiedlicher Erzeugung)
SRL	Sekundärregelleistung
TRL	Tertiärregelleistung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schema des zeitlichen Einsatzes der unterschiedlichen Regelleistungsarten und nachfolgender Intraday- und Spotmärkte (Darstellung: DBFZ in Anlehnung an: (dezera GmbH, 2016)	6
Abbildung 2-2: Lastprofile für Deutschland am 27.12.2015 eigene Darstellung auf Basis (ENTSOE, 2016); Bio-Flex=Flexibilisierungseffekt der Bioenergie, PSW=Pumpspeicherwerke, RL=Residuallast	7
Abbildung 3-1: Optionen für die Flexibilisierung von Biogasanlagen (angepasst nach Szarka u. a., 2013); BHKW=Blockheizkraftwerk, IKT=Informations- und Kommunikationstechnologie	8
Abbildung 3-2: Konzentration der Stromproduktion durch Steigerung der installierten Leistung gegenüber der Leistung in Bezug auf die Gaserzeugung	10
Abbildung 3-3: Modellhafter Vergleich zwischen statischer Fütterung (1) und dynamischer Fütterung (2), in Bezug auf Gasproduktion und der resultierenden Gasspeichergänge über 48 Stunden, eigene Abbildung	11
Abbildung 4-1: Kumulierte Anlagenanzahl und installierte elektrische Anlagenleistung nach Anmeldung zur Inanspruchnahme der Flexibilitätsprämie (Scheftelowitz et al., 2015)	14
Abbildung 4-2: Darstellung des stündlichen Durchschnittspreises des Jahres 2014 an der EPEX Spot SE (European Energy Exchange (EEX), 2015) sowie der Einspeisung einer Biogasanlage für einen Beispieltag. Zugleich sind Sekundär- und Tertiärregelleistung mit den für die Vermarktung geltenden Zeitscheiben abgebildet.	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bei konstanter Jahresarbeit notwendige und weitere optionale technische Komponenten zur bedarfsgerechten Stromerzeugung von Biogasanlagen	9
---	---

Literatur- und Referenzverzeichnis

Büchner, J., Katzfey, J., Flörcken, O., Moser, A., Schuster, H., Dierkes, S., Leeuwen, T. van, Verheggen, L., Uslar, M., Amelsvoort, M. van, 2014. Moderne Verteilernetze für Deutschland (Verteilernetzstudie).

Dena, 2015. Strategieplattform Power to Gas.

dezera GmbH, 2016. Die Regelleistungsmärkte.

DFBEE, 2015. Regelreserven und Regelenenergiemärkte in Frankreich und Deutschland. URL <http://enr-ee.com/de/systeme-maerkte/nachrichten/leser/regelreserven-und-regelenenergiemaerkte-in-frankreich-und-deutschland.html>.

Dotzauer, M., Naumann, K., Billig, E., Thrän, D., 2015. Demand for the flexible provision of bioenergy carriers – an overview of the different energy sectors in Germany, in: Thrän, D. (Ed.), Smart Bioenergy - Technologies and Concepts for a More Flexible Bioenergy Provision in Future. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 11 – 31.

Drescher, B., 2015. Flexibilisierung – Option für die Verbesserung der Ertragslage? Biogas J. – Sonderh. Direktvermarktung, Biogas Journal Seiten 46–48.

Etogas, 2013. Industrielle 6,3 MW PtG-Anlage (Audi e-Gas-Anlage).

European Energy Exchange (EEX), 2015. EPEX SPOT SE: Day-Ahead Auction [WWW Document]. URL <http://www.epexspot.com/en/market-data/dayaheadauction> (accessed 3.24.15).

Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014), 2014.

Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG), 2012.

Hauser, E., Baur, F., Noll, F., 2014. Endbericht zum Projekt: Beitrag der Bioenergie zur Energiewende.

Karl, J., 2012. Dezentrale Energiesysteme: Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt. Oldenbourg, München.

Kost, C., Mayer, J. N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Philipps, S., Nold, S., Lude, S., Schlegl, T., 2013. Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien.

Lauer, M., Dotzauer, M., 2015. Optimale Betriebsstrategien für die flexible Strombereitstellung aus Biogasanlagen, in: Tagungsband (online) 9. Internationale Energiewirtschaftstagung. Presented at the 9. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, IEWT 2015, Wien, Österreich, pp. 1–15.

Liebetrau, J., Daniel-Gromke, J., Jacobi, F., 2015. Flexible power generation from biogas, in: Thrän, D. (Ed.), Smart Bioenergy - Technologies and Concepts for a More Flexible Bioenergy Provision in Future. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 67–82.

Mauky, E., Jacobi, H.F., Liebetrau, J., Nelles, M., 2015. Flexible biogas production for demand-driven energy supply – Feeding strategies and types of substrates. *Bioresour. Technol.* 178, 262–269. doi:10.1016/j.biortech.2014.08.123.

Mauky, E., Weinrich, S., Jacobi, H.F., Neagele, H.J., Liebetrau, J., Nelles, M., in Press. Model predictive control for demand-driven biogas production in full-scale. *Chemical Engineering & Technology*. doi:10.1002/ceat.201500412.

Nitsch, J., Pregger, T., Naegler, T., Heide, D., Luca de Tena, D., 2012. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - BMU Leitstudie 2011.

Scheftelowitz, M., Rensberg, N., Denysenko, V., Daniel-Gromke, J., Stinner, W., Hillebrand, K., Naumann, K., Peetz, D., Hennig, C., Thrän, D., Beil, M., Kasten, J., Vogel, L., 2015. Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben IIa) Zwischenbericht Mai 2015. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.

Scheftelowitz, M., Thrän, D., Krautz, A., Denysenko, V., Daniel-Gromke, J., Hillebrand, K., Lenz, V., Liebetrau, J., Naumann, K., Ortwein, A., Rensberg, N., Stinner, W., Trommler, M., Barchmann, T., Witt, J., Zeymer, M., Schaubach, K., Büchner, D., Peters, W., Sven Schicketanz, Schlutze, C., Deumelandt, P., Reinicke, F., Gröber, H., Beil, M., Beyrich, 2014. Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG, Vorhaben IIa Stromerzeugung aus Biomasse. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.

Schwill, J., 2014. Power-to-Heat (PtH) und Regelenergie - Was sind Vor- und Nachteile? Power-Heat PtH Regelenergie - Was Sind Vor- Nachteile.

Sievers, J., 2013. Demonstration und Vergleich von optimal leistungsregelbaren Biogastechnologien. Presented at the 5. Statuskonferenzen, Programm energetische Biomassenutzung, Leipzig.

Sterner, M., Eckert, F., Thema, M., Bauer, F., 2015a. Der positive Beitrag dezentraler Batteriespeicher für eine stabile Stromversorgung.

Sterner, M., Thema, M., Eckert, F., Lenck, T., Götz, P., 2015b. Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland.

Szarka, N., Scholwin, F., Trommler, M., Jacobi, F., Eichorn, M., Ortwein, A., Thrän, D., 2013. A Novel Role for Bioenergy: A flexible, demand-oriented power-supply. Energy, Online 1-9.

Thrän, D., 2015a. Conclusion and Outlook, in: Thrän, D. (Ed.), Smart Bioenergy - Technologies and Concepts for a More Flexible Bioenergy Provision in Future. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 161 – 177.

Thrän, D. (Ed.), 2015b. Smart Bioenergy. Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems. Springer-Verlag, Heidelberg.

Viessmann, 2015. Power-to-Gas-Anlage in Betrieb genommen, Pressemitteilung.