



Biogas-Nutzungspfade im Vergleich

Effiziente Biogasnutzung als Ziel

Wenn Biogas einen höheren Beitrag zur Strom- und Wärmeversorgung leisten soll, so ist nicht nur die Mobilisierung von zusätzlichen Mengen von Biomasse für die Verwertung in Biogasanlagen notwendig. Entscheidend ist auch ein effizienter Einsatz des erzeugten Biogases, d.h. die eingesetzte Primärenergie sollte idealerweise mit einem sehr hohen Wirkungsgrad genutzt werden. Größere Verluste sollten auf den Verwertungspfaden von der Biogaserzeugung zum Endverbraucher möglichst vermieden werden.

Da Biogas in verschiedenen Nutzungspfaden vielfältig einsetzbar ist, sollen diese Pfade auf ihre Effizienz hin untersucht werden. In zahlreichen Biogasanlagen wird das Biogas vor allem zur Strom- und Wärmeerzeugung in Blockheizkraftwerken (BHKW) eingesetzt. Biogas kann auch zu Biomethan aufbereitet, ins Erdgasnetz eingespeist und an anderer Stelle zur Nutzung in einem BHKW wieder aus dem Erdgasnetz entnommen werden. Erdgasversorger bieten dem Endverbraucher immer häufiger zu Biomethan aufbereitetes Biogas als Beimischung zu konventionellen Erdgasprodukten an (sog. „Bioerdgas“), womit Biogas auch in Erdgasthermen zur reinen Wärmeversorgung z.B. in Privathaushalten eingesetzt werden kann.

Vor diesem Hintergrund hat die Agentur für Erneuerbare Energien vier Grafiken erstellt, die verschiedene Nutzungspfade von Biogas hinsichtlich

1. ihrer Strom- und Wärmeerträge,
2. der Zahl der versorgten Haushalte,
3. ihrer Wirkungsgrade und
4. ihres Beitrags zum Klimaschutz

untereinander vergleicht.

Verglichene Nutzungspfade für Biogas

Als Rohmaterial dient in allen Nutzungspfaden der Ertrag von einem Hektar Mais als primärenergetischer Input. Die Maisernte wird als Substrat im Fermenter einer Biogasanlage vergoren. Das auf diese Weise gewonnene Biogas wird dann in vier unterschiedlichen Nutzungspfaden genutzt:

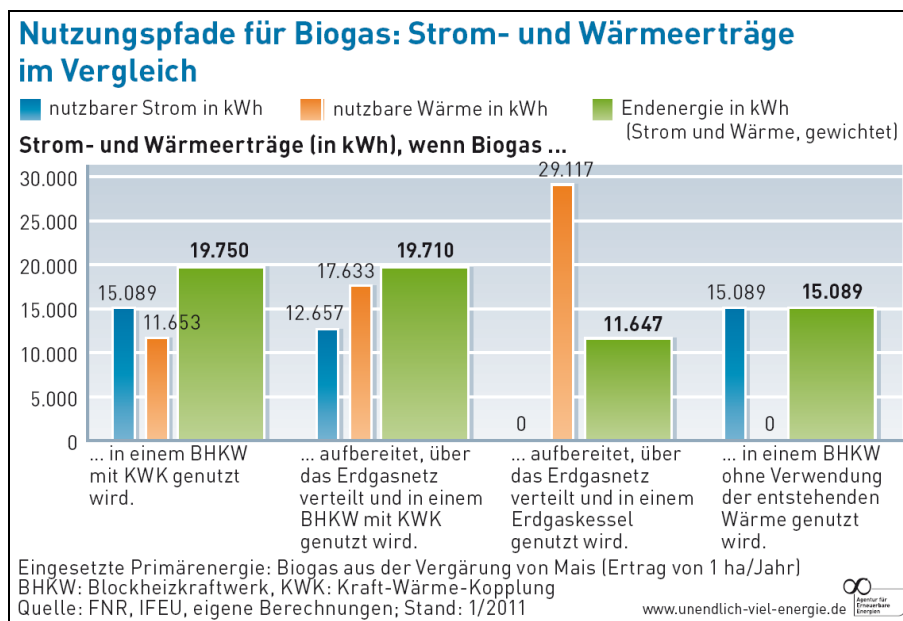
- a) Das Biogas wird in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) verbrannt. Durch die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird sowohl Strom als auch Wärme erzeugt. Der Strom wird ins Netz eingespeist und vollständig genutzt. Es wird angenommen, dass die bereitgestellte Nutzwärme nicht vollständig, sondern zu 60 Prozent genutzt wird. In der Praxis liegt der Nutzungsgrad je nach Anlagenkonzept teilweise weit darunter, kann jedoch mit entsprechenden Wärmeabnehmern auch über 60 Prozent erreichen.
- b) Das Biogas wird auf Erdgasqualität aufbereitet, in das Erdgasnetz eingespeist, verteilt und anschließend wiederum in einem BHKW zu Strom und Wärme umgewandelt. Der Strom wird vollständig, die Nutzwärme zu 100 Prozent genutzt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und gesetzlichen Rahmenbedingungen (EEG) ist ein entsprechend hoher Nutzungsgrad der Wärme anzunehmen.
- c) Das Biogas wird auf Erdgasqualität aufbereitet, in das Erdgasnetz eingespeist, verteilt und anschließend in einem Erdgaskessel ausschließlich zu Wärme, nicht jedoch zu Strom umgewandelt.
- d) Das Biogas wird in einem BHKW verbrannt und zu Strom umgewandelt. Die anfallende Wärme wird dabei jedoch gar nicht genutzt.

Annahmen:

- Biogasertrag von einem Hektar Mais (Quelle: FNR):
 - Ernte: ca. 45 Tonnen Frischmasse von einem Hektar Anbaufläche; ca. 185 m³ Rohbiogas je Tonne Frischmasse ergibt 8.325 m³ Rohbiogasertrag mit 52 % Methangehalt
- Wirkungsgrad des BHKW (Quelle: Fachverband Biogas):
 - 38 % elektrisch
 - 45 % thermisch
- Eigenbedarf bzw. Verluste der Aufbereitungstechnologie (gewichtet nach Anteilen der Aufbereitungstechnologien Druckwechseladsorption, Druckwasser-, Amin- und Selexolwäsche in Deutschland 2009, Quelle: IfEU, Fraunhofer UMSICHT, DENA):
 - 3,43 % Methanverlust
 - 0,25 kWh Strombedarf je Kubikmeter Rohbiogas
 - 0,14 kWh Wärmebedarf je Kubikmeter Rohbiogas
- Wirkungsgrad des Erdgaskessels (Durchschnitt, Quelle: BDH): 83 %

Nicht in den Vergleich einbezogen wurde aus methodischen Gründen die Nutzung von aufbereitetem Biogas als Kraftstoff im Verkehrssektor.

1. Strom- und Wärmeerträge der vier Nutzungspfade im Vergleich (Grafik 1)



Die Grafik 1 vergleicht die vier Nutzungspfade für Biogas hinsichtlich ihrer jeweiligen Strom- und Wärmeerträge, die den Endverbrauchern bereitgestellt werden.

Im ersten Nutzungspfad wird das Biogas in einem BHKW verbrannt. Die hierbei in Kraft-Wärme-Kopplung bereitgestellte Strom- und Wärmemenge beträgt 15.089 kWh Strom und 11.653 kWh Wärme. Die Wärmemenge könnte noch höher liegen, da hier angenommen wurde, dass vor Ort keine vollständige Wärmeabnahme durch Verbraucher möglich ist und nur 60 Prozent tatsächlich genutzt wurden. Eine Verteilung der Wärme z.B. als Prozesswärme an Industriebetriebe oder über Nahwärmenetze an Endverbraucher kann in der Praxis jedoch auch höhere Nutzungsgrade als 60 Prozent bzw. 11.653



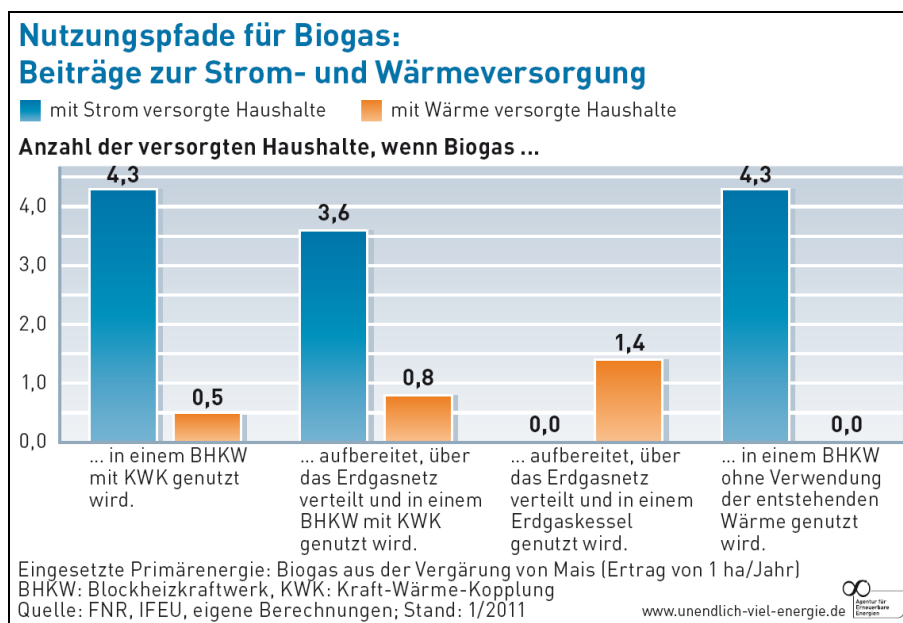
kWh ermöglichen. Insgesamt können in diesem Nutzungspfad 19.750 kWh Endenergie bereitgestellt werden, wobei Strom und Wärme hier gewichtet werden. Damit lässt sich berücksichtigen, dass elektrische Energie gegenüber Wärmeenergie einen höheren energetischen Wert besitzt, da sie am besten in andere Energieformen wandelbar ist. Strom wird daher in Ökobilanzierungssystemen wie GEMIS im Verhältnis zu Wärme mit dem Faktor 2,5 gewichtet.

Der Strom- und Wärmeertrag des zweiten Nutzungspfades liegt auf dem Niveau des ersten Pfades. Zwar wird hier die bereitgestellte Wärme besser, nämlich zu 100 Prozent genutzt, doch ist der Aufwand durch das zusätzliche energieintensive Aufbereitungsverfahren höher. Um das Biogas auf Erdgasqualität bringen zu können, gehen ca. 11 Prozent des Energiegehaltes des Biogases als Prozessenergie (Strom- und Wärmebedarf der Aufbereitungstechnologie) sowie durch Methanverluste verloren.

Im dritten Nutzungspfad wird mit 29.117 kWh zwar die höchste Wärmemenge bereitgestellt. Da im Gegensatz zu den ersten beiden Nutzungspfaden das Biogas nach der Aufbereitung auf Erdgasqualität und Abzug der damit verbundenen Verluste aber ausschließlich zur Wärmeerzeugung in einem Erdgaskessel zum Einsatz kommt, liegt der gewichtete Endenergieertrag mit 11.647 kWh hier am niedrigsten.

Im vierten Nutzungspfad wird das Biogas im BHKW verbrannt und zu Strom umgewandelt. Die entstehende Abwärme bleibt ungenutzt. Damit wird ein Großteil der potenziell nutzbaren Endenergie verschenkt. Der gewichtete Endenergieertrag liegt dennoch mit 15.089 kWh über dem Ertrag des dritten Nutzungspfades, der nur Wärme bereitstellt.

2. Anzahl versorgter Haushalte durch die vier Nutzungspfade im Vergleich (Grafik 2)



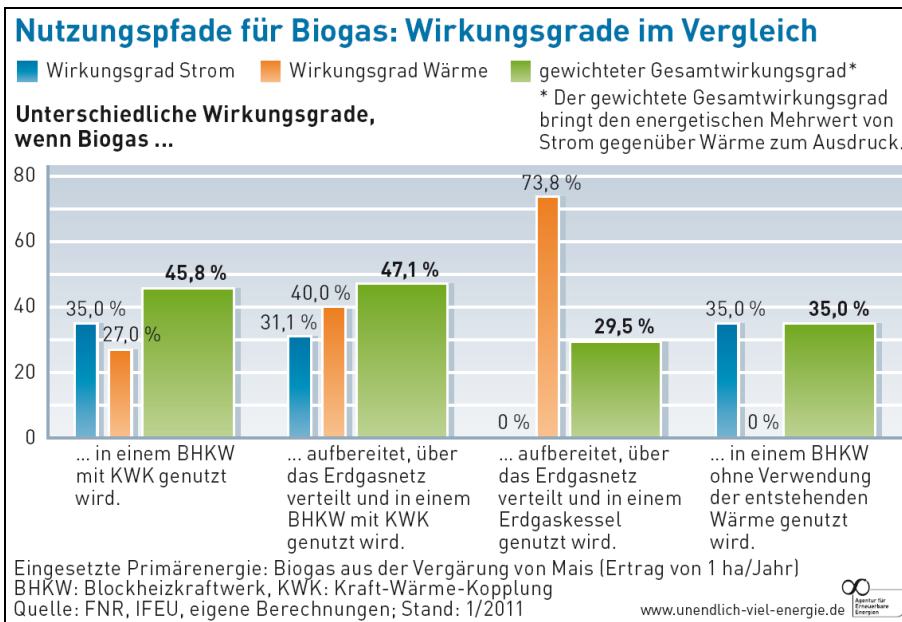
Die Grafik 2 vergleicht die vier Nutzungspfade für Biogas hinsichtlich ihres jeweiligen Beitrags zur Strom- und Wärmeversorgung durchschnittlicher Haushalte. Grundlage sind die in Grafik 1 angegebenen Strom- und Wärmeerträge, die den Endverbrauchern bereitgestellt werden. Den größten Versorgungsbeitrag können der erste und der zweite Nutzungspfad leisten. Durch die Kraft-Wärme-Kopplung können im ersten Pfad mehr als 4 Haushalte mit Strom und 0,5 Haushalte mit Wärme versorgt werden (zweiter Pfad: 3,6/0,8).



Am schlechtesten schneidet der dritte Nutzungspfad ab, bei dem nur 1,4 Haushalte mit Wärme versorgt werden können. Angenommen wurde ein jährlicher Stromverbrauch eines Durchschnittshaushaltes von 3.500 kWh sowie ein Wärmeverbrauch von 21.330 kWh.

3. Wirkungsgrade der vier Nutzungspfade im Vergleich (Grafik 3)

In Grafik 3 werden die Wirkungsgrade der unterschiedlichen Biogasnutzungspfade miteinander verglichen. Der Wirkungsgrad stellt das Verhältnis von eingesetzter Primärenergie zu der beim Verbraucher nutzbaren Endenergie dar. Damit wird deutlich, welcher Nutzungspfad das Biogas, das aus der Vergärung der Ernte eines Hektars Mais entsteht, am effizientesten in nutzbare Endenergie umwandelt.



In Grafik 3 wird neben den jeweiligen Wirkungsgraden der Strom- und Wärmeerzeugung der gewichtete Gesamtwirkungsgrad dargestellt. Dieser bringt wieder zum Ausdruck, dass elektrische Energie gegenüber Wärmeenergie einen höheren energetischen Wert besitzt.

An der Spitze liegt der zweite Nutzungspfad mit 47,1 Prozent gewichtetem Gesamtwirkungsgrad, gefolgt vom ersten Nutzungspfad mit 45,8 Prozent. Angenommen wurde beim ersten Pfad nur die Nutzung von 60 Prozent der Nutzwärme. Würde – wie im zweiten Pfad – die bereitgestellte Nutzwärme vollständig genutzt, könnte ein gewichteter Gesamtwirkungsgrad von maximal 53 Prozent erreicht werden. Verluste entstehen stets durch den Eigenbedarf der Biogasanlage an Strom und Wärme. So muss z.B. der Fermenter mit einem Teil der entstehenden Abwärme geheizt werden, um den Vergärungsprozess in Gang zu halten. Wird Biogas aufbereitet, kommt es zu zusätzlichen Verlusten durch den Eigenbedarf der verhältnismäßig energieintensiven Aufbereitungstechnologie.

Der dritte und vierte Nutzungspfad liegen hinsichtlich der Wirkungsgrade am Ende, da sie nur Wärme bzw. nur Strom bereitstellen. Wird Biogas aufbereitet, über das Erdgasnetz verteilt und in einem Erdgaskessel genutzt, kann ein moderner Erdgaskessel mit hohem Wirkungsgrad die zusätzlichen Verluste zwar in Grenzen halten. Der gewichtete Gesamtwirkungsgrad ist jedoch mit 29,5 Prozent am niedrigsten.



Wirkungsgrade von Nutzungspfaden vergleichbar machen

Moderne BHKW und KWK-Kraftwerke erreichen Wirkungsgrade von maximal rund 85 Prozent. Reine Heizwerke und geschlossene Scheitholzkamine kommen dagegen auf Wirkungsgrade von über 95 Prozent; Brennwertkessel sogar rechnerisch auf über 100 Prozent Wirkungsgrad. Warum gilt Kraft-Wärme-Kopplung dennoch als besonders effizient und warum sollte beim Vergleich von Nutzungspfaden ohne und mit Stromerzeugung ein gewichteter Gesamtwirkungsgrad angewandt werden?

Höhere energetische Wertigkeit von Strom

Durch einfache Addition von Strom und Wärme, jeweils gemessen in der Einheit Kilowattstunde, werden die Sekundärenergieträger Strom und Wärme gleichgesetzt. Tatsächlich jedoch ist Strom ein deutlich höherwertiger Energieträger, da er sehr vielseitig einsetzbar ist und über sehr weite Strecken transportiert werden kann, während Wärme im Prinzip „nur“ zum Heizen von Räumen, zum Kühlen und für industrielle Prozesse im Nahbereich eingesetzt werden kann. Heizungen könnten z.B. auch mit Strom betrieben werden, nicht jedoch umgekehrt Computer mit heißem Wasser.

Den physikalischen Hintergrund für diesen Sachverhalt liefert das Konzept von Exergie und Anergie nach Geller¹:

„Das Energieerhaltungsprinzip des 1. [thermodynamischen] Hauptsatzes besagt, dass Energie weder vernichtet noch produziert werden kann. Energie ist nur wandelbar in ihren Erscheinungsformen. Erscheinungsformen sind beispielsweise die

- *mechanischen Energien (kinetische Energie, potentielle Energie)*
- *die elektrische Energie,*
- *die thermischen Energien (Wärme, Enthalpie, innere Energie).*

Die mechanischen Energieformen und die elektrische Energie gehören zu den Energieformen, die sich unbeschränkt in jede andere Energieform umwandeln lassen, sofern nur der Prozess der Wandlung reversibel erfolgt. [...] Thermische Energien bestehen demnach aus zwei Anteilen, einem unbegrenzt in andere Formen wandelbaren Teil und einem nicht mehr verwertbaren Teil. Nach einem Vorschlag von Z. Rant werden sie Exergie und Anergie genannt und es gilt: Energie = Exergie + Anergie. Die mechanischen Energien und die elektrische Energie sind nach dieser Definition ausschließlich Exergien, weshalb man sie manchmal auch als ‚Edelenergien‘ bezeichnet.“

Vereinfacht wird abgefragt, ob Energie als Exergie nützliche Arbeit verrichten kann oder ob sie wertlose Anergie darstellt. Vorhandene Energie sollte mit möglichst hohem Wirkungsgrad - das heißt mit möglichst geringer Anergie - in Exergie verwandelt werden.

Der Exergie-Begriff ist nützlich und notwendig, um Energieformen mit Blick auf ihre praktischen Nutzungspfade bewerten zu können. Wenn man beispielsweise die elektrische Leistung und die Wärmeabgabe eines Heizkraftwerks - beides in Kilowattstunden - einfach zusammenrechnet, entsteht leicht der Eindruck, als ob Strom und Wärme dieselbe Energie-Qualität hätten. In Wirklichkeit wird aber der Exergie-Gehalt der Wärme vom thermodynamischen Wirkungsgrad begrenzt. Er ist also in der Praxis relativ gering. Dagegen besteht Strom vollständig aus Exergie.

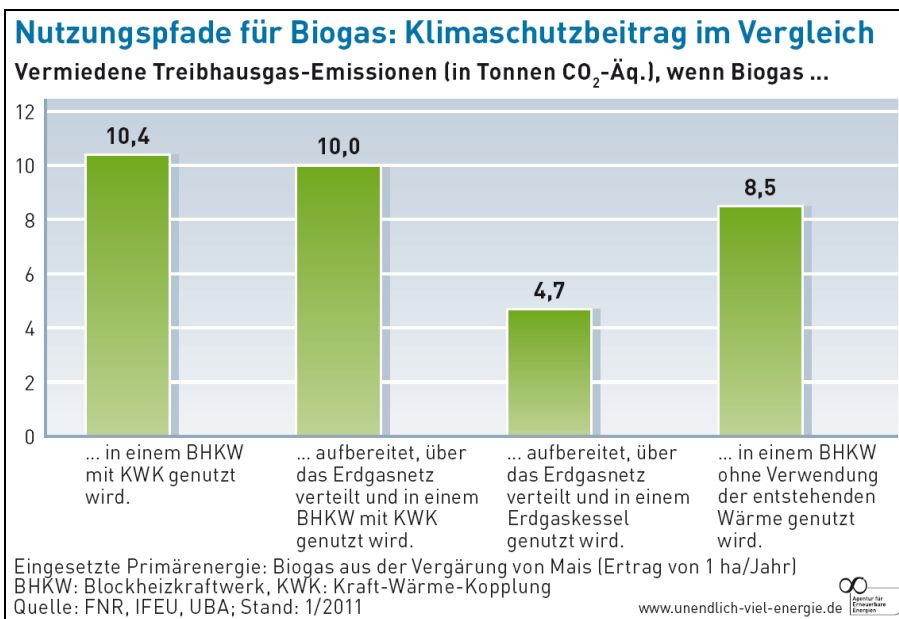
¹ Geller, Wolfgang: Thermodynamik für Maschinenbauer, 4., erweiterte Auflage, Heidelberg 2006.



Den Gewichtungsfaktor 2,5 für Strom gegenüber Wärme wenden u.a. an bzw. empfehlen in dieser Größenordnung die Energieeinsparverordnung (EnEV), das Öko-Bilanzierungssystem GEMIS, der Mindeststandard für Energieeffizienz der EU-Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) vom 19. November 2008 sowie das Deutsche Biomasse-Forschungszentrum.

4. Eingesparte Treibhausgas-Emissionen der vier Nutzungspfade im Vergleich (Grafik 4)

In Grafik 4 wird der Klimaschutzbeitrag der unterschiedlichen Nutzungspfade miteinander verglichen. Dabei wird davon ausgegangen, dass Strom und Wärme aus Biogas im deutschen Strom- und Wärmemix jeweils eine bestimmte Menge fossiler Energieträger vermeiden kann. Die ansonsten von den fossilen Energieträgern verursachten Treibhausgas-Emissionen können dem Biogas dann als vermiedene Emissionen gutgeschrieben werden.



Im besonders CO₂-intensiven deutschen Strommix wird je erzeugter Kilowattstunde Biogas-Strom durchschnittlich eine Menge von 0,563 kg CO₂-Äquivalent vermieden. Im Wärmemix vermeidet eine Kilowattstunde Biogas-Wärme durchschnittlich 0,161 kg CO₂-Äquivalent. Damit werden vereinfacht bundesweite Durchschnittswerte für das Jahr 2009 angenommen. In der Praxis werden Biogasanlagen häufig mit einer Vielzahl unterschiedlicher Einsatzstoffe (z.B. Gülle und andere Reststoffe, Gras- und Getreidesilage) betrieben, womit sich je nach Herkunft bzw. Anbaumethoden große Bandbreiten in der Klimabilanz ergeben können.

Der erste und zweite Nutzungspfad liegen aufgrund der Bereitstellung sowohl von Strom als auch von Wärme mit 10,4 bzw. 10 Tonnen vermiedenen Treibhausgas-Emissionen vorne. Würde im ersten Pfad die bereitgestellte Nutzwärme des BHKW nicht nur zu 60 Prozent, sondern vollständig genutzt, könnten bis zu 11,6 Tonnen Treibhausgase vermieden werden. Wird Biogas aufbereitet, über das Erdgasnetz verteilt und ausschließlich zur Wärmebereitstellung in einer Erdgastherme verbrannt, können nur etwa halb so viele Emissionen vermieden werden wie im Fall der optimalen Nutzung in Kraft-Wärme-Kopplung.



Fazit

Im Sinne einer effizienten Nutzung sollte das Multitalent Biogas möglichst in Kraft-Wärme-Kopplung mit möglichst umfassender Wärmenutzung eingesetzt werden. Sowohl hinsichtlich Versorgungsbeitrag, Wirkungsgrad und Klimabilanz sind die beiden Nutzungspfade, die auf KWK setzen, eindeutig im Vorteil. Auch wenn Biogas nicht durch den Anbau von Energiepflanzen wie Mais, sondern aus Reststoffen wie Gülle oder Bioabfall gewonnen würde, würde die Kraft-Wärme-Kopplung am besten abschneiden.

Aufgrund des Eigenbedarfs der Aufbereitungstechnologie als zusätzlichem Umwandlungsschritt kann die Bilanz dieses Nutzungspfades bei KWK je nach Nutzungsgrad der bereitgestellten Wärme etwas besser oder schlechter ausfallen als der erste Pfad ohne Aufbereitung. In der Praxis kann die Aufbereitungstechnologie durch die Einspeisung ins Erdgasnetz die Distanz zwischen Biogaserzeugung und Wärmeverbrauchern überbrücken helfen, so dass in vielen Fällen eine effiziente Nutzung ermöglicht wird. Aus Sicht der Energieeffizienz ist eine Verbrennung von aufbereitetem Biogas in Erdgas-thermen suboptimal.

Quellen

AEE/FNR: Der volle Durchblick in Sachen Energiepflanzen, Juli 2010.

ASUE: BHKW-Grundlagen, Juni 2010.

BDH: Jahrespressekonferenz Trends und Herausforderungen im Wärme-
markt, Januar 2010.

BDH: Potentiale der energetischen Modernisierung – Ausblick bis 2020, GET
Nord 2008.

BMU/AG EE-Stat: Erneuerbare Energien in Zahlen, Vermiedene Emissionen
durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Strom-/Wärmesektor 2009,
Juni 2010.

DENA: Biogaseinspeisung in Deutschland,
<http://www.biogaspartner.de/index.php?id=10074&L=qycnqolqeebk>, Oktober
2010.

DBFZ (Müller-Langer, Franziska; Perimimis, Anastasios; Brauer, Sebastian;
Thrän, Daniela; Kaltschmitt, Martin): Technische und ökonomische Bewer-
tung von Bioenergie-Konversionspfaden. Externe Expertise für das WBGU-
Hauptgutachten „Welt im Wandel. Zukunftsfähige Bioenergie und nachhalti-
ge Landnutzung“. Berlin/Leipzig, Oktober 2008.

FNR: Basisdaten Biogas, Oktober 2010.

Fraunhofer UMSICHT: Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und
Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008,
April 2008.

FVB: Multitalent Biogas, April 2008.

IFEU u.a.: Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeu-
gung und -nutzung in Deutschland, Mai 2008.

Öko-Institut: GEMIS 4.5

Paschotta, Rüdiger: Blockheizkraftwerke, in: [energielexikon.info](http://www.energielexikon.info)
<http://www.energielexikon.info/blockheizkraftwerke.html>, 02. Februar 2011.

UBA: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Durch Einsatz erneuer-
barer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2007. Climate Change
12/2009, Dezember 2009.

UBA: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Durch Einsatz erneuer-
barer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2009. Aktualisierte Anhänge
2 und 4 der Veröffentlichung „Climate Change 12/2009“, September 2010.

Formel zur Wirkungsgradberechnung des Mindeststandards für Energieeffi-
zienz, Anhang II der EU-Richtlinie 2008/98/EG vom 19. November 2008 (Ab-
fallrahmenrichtlinie).