

Exposé zukunftsweisender Einkommensoptionen für Biogasanlagenbetreiber

Nachverstromungsanlagen für Biogas-Blockheizkraftwerke



© M. Paterson, KTBL (links) | Dürr Systems AG (rechts)

Vanessa van der Sanden, Benedikt Hülsemann, Universität Hohenheim |
Mark Paterson, Kuratorium Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

Erstellt: November 2021

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Projektes „Biogas Progressiv: Zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas) finanziert mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) aus dem Sondervermögen Energie- und Klimafond (FKZ: 22405416; 22407617; 22408117)

Einleitung

Für zahlreiche Biogasanlagenbetreiber stellt sich mit Ablauf der 1. EEG-Förderperiode nach 20 Jahren die Frage, wie ihre Anlage weiterhin rentabel regenerative Energie produzieren kann. Die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2021) vorgesehene Verlängerung der Vergütung über die Ausschreibungen für Biomasseanlagen bietet grundsätzlich die Möglichkeit eines Weiterbetriebs, allerdings sind dafür technisch sowie ökonomisch optimierte Anlagenkonzepte notwendig.

Mit dem Projekt „Biogas Progressiv – zukunftsweisende Strategien für landwirtschaftliche Biogasanlagen“ (ProBiogas) verfolgen die Projektpartner das Ziel, praxistaugliche Verfahrensoptionen für den Weiterbetrieb von Biogasanlagen zu evaluieren. Alle potenziellen Nutzungsoptionen, die im Projekt nicht techno-ökonomisch detailliert dargestellt werden konnten, werden in Form einer Konzeptbeschreibung vorgestellt.

Bei den hier beschriebenen Verfahrensoptionen handelt es sich um Konzepte, die derzeit zum Beispiel nur über einen eingeschränkten Absatzmarkt verfügen, sich noch in der Entwicklung befinden, nicht die Marktreife erlangt haben oder nur unter sehr speziellen Bedingungen realisiert werden können. Sie alle eint jedoch, dass sie in Zukunft eine mögliche Einkommensquelle für landwirtschaftliche Biogasanlagen darstellen können.

Dieses Exposé soll als fundierte Entscheidungshilfe dienen, ob sich durch die Kopplung von Biogasanlage und einer Nachverstromungsanlage für den Biogasbetrieb eine zusätzliche Erlössituation realisieren lässt.

1. Allgemeine Beschreibung

Wärme entsteht bei der Verstromung von Biogas in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) als Nebenprodukt. Diese kann vielfältig genutzt werden. Neben der klassischen Nutzung der Wärme (z.B. als Wohn- und Prozesswärme, für die Trocknung von Gütern oder zur Beheizung der Fermenter) kann Wärme auch nachverstromt werden (FNR 2016).

Dies ist besonders reizvoll, wenn keine oder nur unzureichende Wärmenutzungskonzepte aufgrund von fehlender Wärmeabnehmern vorhanden sind. Ein Einsiedlerhof kann z.B. aufgrund der fehlenden Infrastruktur die Wärme nicht als Heizenergie nutzen und muss die Wärme im Notfall sogar mittels Notkühler ohne zusätzlichen Nutzen herunterkühlen. Dies verringert die Wirtschaftlichkeit und den Nutzungsgrad der Biogasanlage enorm. Dabei kann die Wärme des BHKW nach der innerbetrieblichen Nutzung der Biogasanlage als zusätzliche Wertschöpfung weiterhin in einer Nachverstromungsanlage verstromt werden (Stockmann et al. 2019). Die Nutzung von Wärmequellen zur Stromproduktion kann zu einer besseren Energieeffizienz und CO₂-Bilanz und somit zu einer besseren Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Gesamtprozesses führen (Weith et al. 2013).

Für die Wärmenachverstromung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Stockmann et al. (2019) nennt insbesondere folgende Techniken:



- Steam Rankine Cycle (SRC)
- Organic Rankine Cycle (ORC)
- Clausius Rankine Cycle (CRC)
- Mikrogasturbine
- Scroll- und Schraubenexpander (für kleinere Leistungsbereiche)

Bei der Nutzung der Abwärmegewinnung funktioniert der Rankine Cycle (SRC, ORC und CRC) nach dem Prinzip des thermodynamischen Kreisprozesses. Das heißt, in einem rechtsläufigen Kreisprozess wird Wärme einem Arbeitsmedium (Gas) zugeführt und in Arbeit umgewandelt. Es handelt sich hierbei um einen Prozess sehr ähnlich dem der Dampfmaschine (KTBL 2013). Diese mechanische Energie kann mithilfe eines Generators in elektrische Energie (Strom) umgewandelt werden.

Zwar kann bei der Nachverstromung auch die Nutzung der Bewegungsenergie des Abgasstroms genutzt werden (beispielsweise durch eine Abgasturbine), doch sind bei den jetzigen VDE-Anwendungsnormen die Vorgaben nur durch sehr großen Aufwand im Rahmen der Mittelspannungsrichtlinien erfüllbar und somit nicht rentabel (Stockmann et al. 2021).

2. Verfahrenstechnische Beschreibung

Nach der Gewinnung des Biogases in der Biogasanlage kann dieses im Blockheizkraftwerk (BHKW) verstromt werden. Die, bei der Verstromung im Motorblock (Öl, Kühlwasser) oder im Abgas, auftretende Wärme kann einer Nachverstromungsanlage (NV) zugeführt und dort genutzt werden (siehe Abbildung 1), wobei im Abgasstrom Temperaturen von über 450 °C und im Motorblock von 85 bis 95 °C vorliegen (Jendrischik 2012, Stockmann et al. 2019).

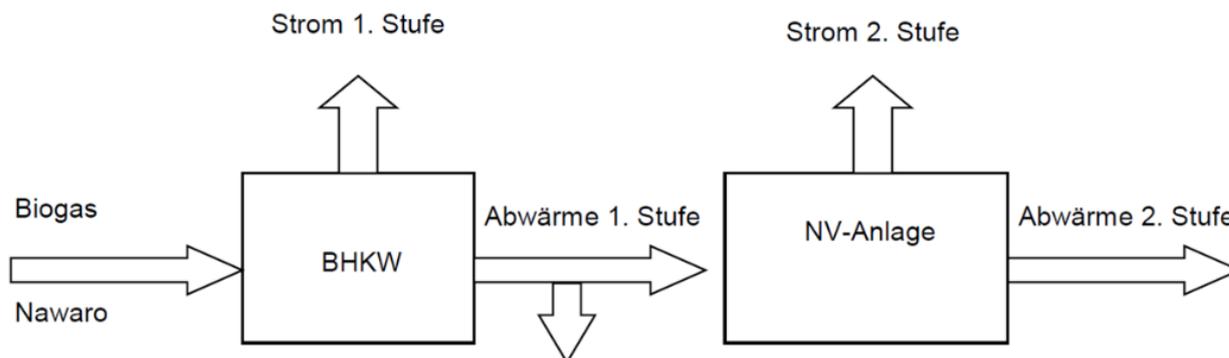


Abbildung 1: Zweistufige Verstromung mit Nachverstromung (NV) (Stockmann et al. 2019)

In der NV-Anlage findet zunächst eine Wärmeübertragung der Wärme vom Abgas/Motorblock auf ein Arbeitsmedium (organisches Arbeitsmittel/Fluid oder Wasser) statt. Die Wärmeübertragung auf das Arbeitsmedium geschieht direkt (über Direktverdampfung) oder indirekt über einen Heißwasser- oder Thermoölkreislauf (Zwischenkreis). Durch die Wärmeübertragung verdampft das Arbeitsmedium (gasförmig) und expandiert, dabei entsteht ein hoher Druck. Über einen Expander (Turbine oder Motor) wird das unter Druck stehende Arbeitsmedium entspannt, welche wiederum die Turbine oder den Generator antreibt, wodurch Strom erzeugt wird. Über einen Kondensator



verflüssigt sich das Arbeitsmittel durch Kühlung wieder und der Kreislauf kann wiederholt werden. Durch diesen Prozess wird der Prozessstrom abgekühlt. Die noch verbleibende Restwärme im Prozessstrom kann daraufhin für eine weitere Wärmenutzungstechnik genutzt werden (Stockmann et al. 2019). Die Vorlauftemperatur beträgt aufgrund der freiwerdenden Kondensationswärme ca. 95 °C, wobei diese je nach System variieren kann (KTBL 2013).

Innerhalb der Nachverstromungstechnologien existieren verschiedene Varianten: z.B. ORC, CRC, Stirlingmotor, Gasturbine, Heißluftturbine und Dampfmotor. Die bekanntesten Technologien sind der ORC und CRC, welche sich zudem untereinander kombinieren bzw. koppeln lassen (Stockmann et al. 2019). Im Folgenden soll auf die wichtigsten Nachverstromungstechnologien eingegangen werden.

Organic-Rankine-Cycle(ORC)-Prozess/Zweiphasenprozess

Beim ORC-Prozess handelt es sich um einen Prozess sehr ähnlich dem der Dampfmaschine. Dabei wird als Arbeitsmedium anstelle von Wasserdampf ein organisches Lösungsmittel verwendet, das bereits bei niedrigen Temperaturen verdampft (KTBL 2013).

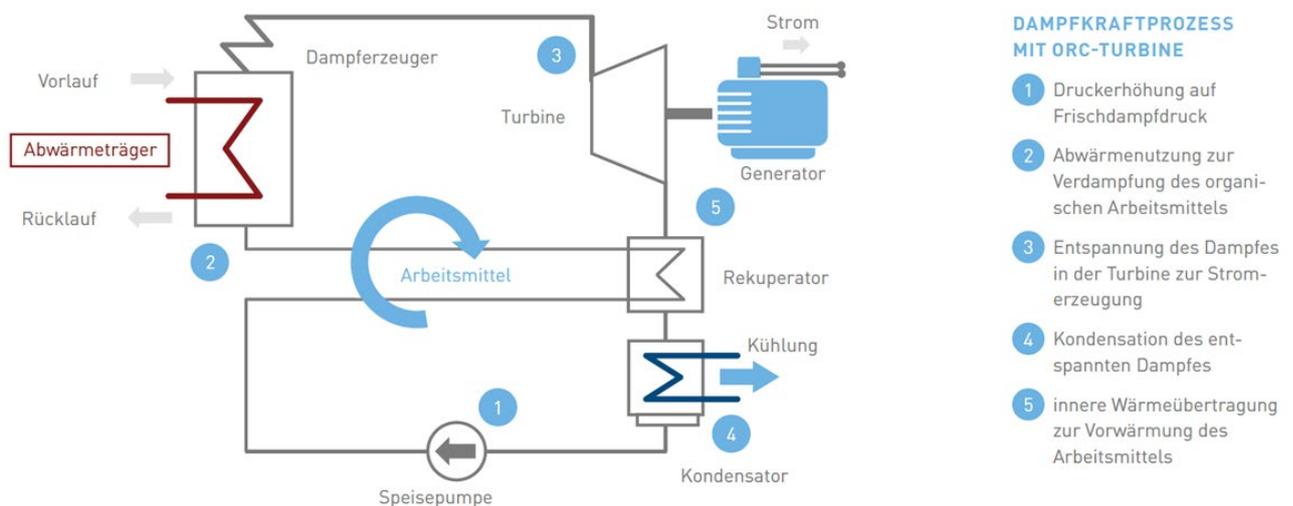


Abbildung 2: Schaltbild eines Organic-Rankine-Cycle (ORC)-Prozesses (SAENA 2016)

Als Lösungsmittel werden Kohlenwasserstoffe, wie Iso-Pentan, Iso-Oktan, Toluol oder Silikonöl verwendet (Hofbauer et al. 2016, Stockmann et al. 2021). Die ORC-Anlagen können sowohl auf Hochtemperatur (HT) als auch auf Niedertemperatur (NT) geschaltet werden (KTBL 2013). Je nach genutzter Technik und Hersteller sind die Grenzen zwischen HT und NT fließend. Es wird von einer HT-Nutzung gesprochen, wenn direkt über ein heißes Abgas (ca. 300 bis 500 °C) oder durch einen Heißwasserkreislauf/Zwischenkreis die Abwärme auf den ORC übertragen wird. Dabei muss aber darauf geachtet werden, dass das organische Arbeitsmittel nicht die zulässigen Arbeitsmitteltemperaturen überschreitet, um die Zersetzung des Arbeitsmittels zu verhindern. Durch den Zwischenkreis mit Thermoöl oder Heißwasser kann die Zersetzung verhindert und gleichzeitig die Einbindung von Speichertechnologien ermöglicht werden (siehe Abbildung 3).



Zum Beispiel wird das ORC-Medium „Octamethyltrisiloxan“ häufig verwendet. Dieses hat eine thermischen Zersetzungstemperaturen von 300 °C. Deshalb sollte der Prozess bei einem Temperaturniveau von etwa unter 285 °C betrieben werden, sodass die Zersetzungstemperatur nicht überschritten wird (KTBL 2013, Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2016, SAENA 2019). Dies wird mittels Verwendung eines Thermoöls in einem vorgeschalteten Wärmekreislauf und der Wärmeübertragung mittels Wärmetauscher realisiert. Thermoöl ist vor allem bei größeren Anlagen mit hohen Abgastemperaturen üblich. Für die typischen Abgastemperaturen ist das Arbeitsfluid „Hexamethyldisiloxan“ empfehlenswert, da es nach Preißinger et al. (2014) im Bereich von 400 bis 600 °C einsetzbar ist. Im niedrigen Leistungsbereich (beispielsweise für Anwendungen an Biogasanlagen) ist Thermoöl eher unüblich, da der benötigte Zwischenkreis zu höheren Anschaffungskosten führt. Zudem werden als ORC-Medium gezielt organische Arbeitsmittel verwendet, die auf das Temperaturniveau der Abwärmequellen angepasst sind (Stockmann et al. 2021).

Wird die Motorblockwärme verwendet, liegen die Temperaturen etwa bei 90 °C und somit im Niedertemperaturbereich. Der Vorteil von Niedertemperaturen ist, dass das organische Arbeitsmittel nur mit geringem Druck beaufschlagt werden muss und Umwandlungsverluste aufgrund der Nutzung des Direktdampfs (ohne Zwischenkreis) vermindert werden (Stockmann et al. 2019). Die Verwendung von organischen Arbeitsmitteln und somit des ORC ist bei niedrigen Siedetemperaturen (ab 70 °C) besonders sinnvoll, da der thermodynamische Wirkungsgrad des ORC in dem Temperaturbereich höher ist als der des CRC (Stockmann et al. 2021). Nutzen Niedertemperaturanlagen Restwärme der BHKW, kann der elektrische Wirkungsgrad des ORC/CRC absolut auf ca. 5 % erhöht werden. Bei Hochtemperaturanlagen kann eine Zunahme des elektrischer Wirkungsgrad der Gesamtanlage von bis zu 20 % erzielt werden.

Im Hochtemperaturbereich werden überwiegend Siloxane und langkettige Kohlenwasserstoffe eingesetzt. Für Niedertemperaturen werden meist natürliche oder teilfluorierte Kohlenwasserstoffe eingesetzt. Im Niedertemperaturbereich kommen ORC-Prozesse vor allem bei der Geothermie, BHKW-Restwärme und bei industrieller Abwärme zum Einsatz (Weith et al. 2013, Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2016, Stockmann et al. 2021).

Anhand des Schaltbilds der ORC-Anlage (Abbildung 3) sollen im folgenden alle Arbeitsschritte kurz erläutert werden:

- (1) Mittels Arbeitsmittelpumpe wird das flüssige Arbeitsmedium auf den gewünschten Druck verdichtet
 - a. Bei hohen Abgastemperaturen wird die Wärmeenergie über den Zwischenkreis auf eine optimale Arbeitsmedium-Temperatur gebracht
 - b. Freisetzung von Abwärme über Direktverdampfung
- (2) Die Wärmeenergie wird in einem entsprechenden Verdampfer mittels integrierten Wärmeübertrager auf das organische Arbeitsmittel des ORC-Prozesses übertragen



- und das org. Arbeitsmittel verdampft. Die dadurch entstehende Ausdehnung des Volumens führt zu einem erhöhten Druck
- (3) Das verdampfte Arbeitsmedium wird, wie beim Dampfkraftprozess, in einer Dampfturbine entspannt. Dies führt zu einer Verringerung des Drucks und zu einem größeren Volumen sowie zur Verrichtung von mechanischer Arbeit. Die mechanische Arbeit wird mittels Turbinenwelle auf den gekoppelten Generator übertragen und somit erfolgt wiederum eine Verstromung
 - (4) Bei niedrigem Druck und unter Wärmeabfuhr über einen weiteren Wärmeübertrager wird das Arbeitsmedium bei 50 bis 90 °C kondensiert. Die Wärme wird am Wärmetauscher mit einem weiteren Arbeitsmedium abgeführt und kann bei geringem Druck und Volumen in Nah- oder Fernwärmenetz genutzt werden. Anschließend beginnt der Kreislauf wieder von vorne.
 - (5) Rekuperator: Um bessere Wirkungsgrade zu erzielen, kann im Prozess zwischen Pumpe und Verdampfer ein Rekuperator eingebaut werden. Dieser wärmt das Arbeitsmedium bereits vor und nutzt die interne Wärmeenergie der Turbine, bevor diese im nachfolgenden Schritt im Kondensator wieder gekühlt wird.

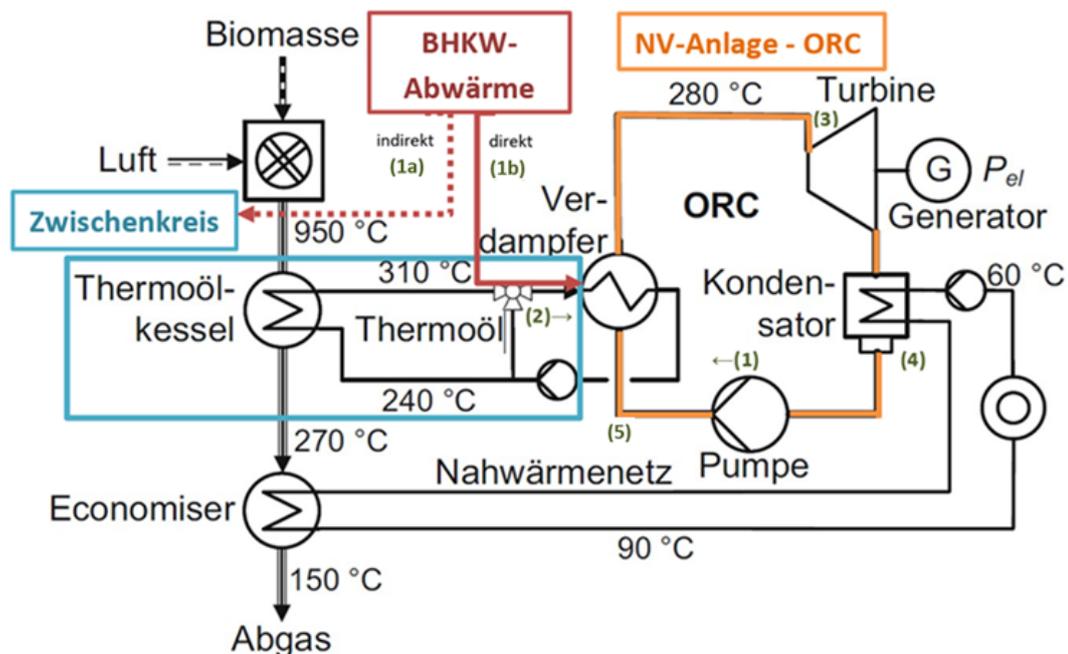


Abbildung 3: Schaltbild einer ORC-Anlage mit Zwischenkreis, P_{el} = elektrische Leistung (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2016)

Der Vorteil eines ORC-Prozesses liegt darin, dass bereits bei Niedertemperaturen ab 70 °C, die eingesetzten Arbeitsmedien verdampfen. Meistens werden natürliche und teilfluorierte Kohlenwasserstoffe für Niedertemperaturen verwendet. Aber auch im Hochtemperaturbereich kann mit einem ORC gearbeitet werden. Hier werden Siloxane und langkettige Kohlenwasserstoffe eingesetzt. Durch die hohe Anzahl organischer Fluide kann der ORC-Prozess optimal an unterschiedliche Temperaturniveaus der Abwärmequellen angepasst werden (Weith et al. 2013, Stockmann et al. 2019). Um durch diesen Sachverhalt



die größtmögliche Wärmemenge zu nutzen, kann die ORC-Technik mehrfach in einer Prozesskette nacheinander geschaltet werden. Bei Abwärme mit Hochtemperaturen können beispielsweise zuerst langkettige Kohlenwasserstoffe eingesetzt werden und nachfolgend noch eine zweite Nachverstromung erfolgen – mit natürlichen und oder teilfluorierten Kohlenwasserstoffen für Niedertemperaturen.

Je nach der verwendeten Technik der Nachverstromung kann die Nachverstromungswärme für eine weitere Wärmenutzung genutzt werden (Nutzungskaskade). Wenn nach der Verstromung noch Wärme mit einem Temperaturniveau von 70 bis 80 °C zur Verfügung steht, kann diese zur Fermenterheizung oder zur Getreidetrocknung genutzt werden. Auf diesem Wege kann die vorhandene Wärmeinfrastruktur aufrechterhalten bleiben und durch die Nachverstromung noch eine zusätzliche hochwertige Ausnutzung der Wärme garantiert werden, sodass das Kaskadenmodell die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit erhöht. Hierauf sollte bereits bei der Planung Rücksicht genommen werden. Deshalb sollten gute Planungskonzepte für die Abwärme erstellt werden, welche unzureichende Wärmenutzungskonzepte durch Kaskadenmodelle verbessern (Stockmann et al. 2019).

Clausius Rankine Cycle (CRC) (Dampfkraftprozess/Zweiphasenprozess)

Der CRC-Prozess basiert auf der Erzeugung von überhitztem Wasserdampf in einem Kreisprozess zur Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit bzw. elektrische Energie (KTBL 2013).

Dabei wird destilliertes Wasser unter konstantem, hohem Druck erwärmt und verdampft (Abbildung 4). Der Dampf wird danach überhitzt und zu einer Dampfturbine oder einem Dampfmotor transportiert. Durch Entspannung des Dampfes wird in der Turbine bzw. dem Motor mechanische Arbeit verrichtet. Im Anschluss wird der entspannte Dampf unter Wärmeabgabe im Kondensator verflüssigt. Das kondensierte Wasser wird wieder auf den Kesseldruck verdichtet und zurück zum Kessel (Dampferzeuger) gepumpt. Ab hier wird der Kreislauf wiederholt (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2016).

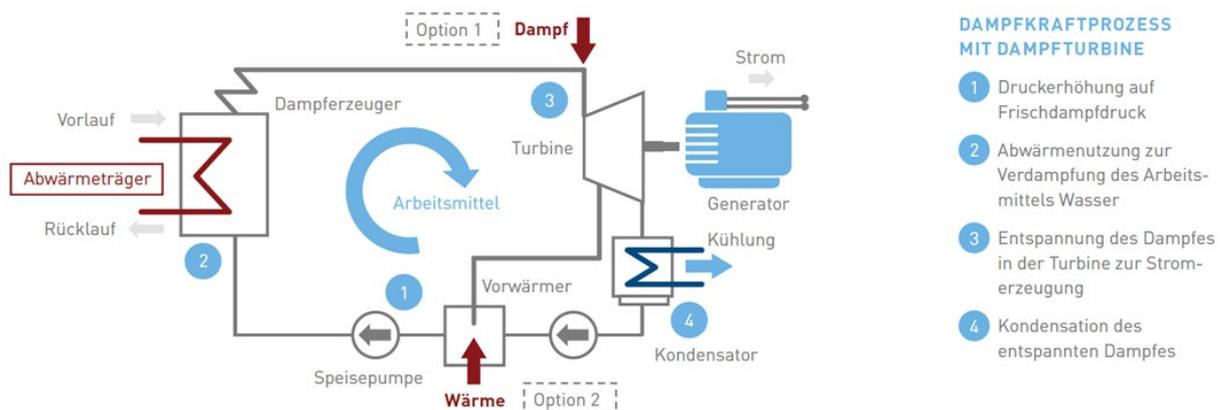


Abbildung 4: Schaltbild eines Clausius-Rankine-Cycle-Prozesses (SAENA 2016)

Der CRC-Prozess arbeitet im Hochtemperaturbereich bei Abgastemperaturen von 400 bis 600 °C und verwendet deshalb nur die Abgaswärme und nicht die Motorblockwärme. Der Vorteil der CRC-Technik gegenüber anderen Verfahren, wie z.B. dem Organic Rankine



Cycle, ist, dass Umwandlungsverluste durch Direktverdampfung vermieden werden können und im Falle einer Havarie keine Umweltschäden entstehen, da als Arbeitsmittel Wasser verwendet wird (Stockmann et al. 2021).

Stirlingmotor

Der Stirlingmotor (Abbildung 5) gehört zu den Heißgas- oder Expansionsmotoren und ist eine Kolbenmaschine. Durch Temperaturänderungen wird Volumenänderungsarbeit verrichtet. Innerhalb der Kolbenmaschine befindet sich ein zirkulierendes Arbeitsgas, welches diese betreibt. Das Arbeitsgas wird in einem kalten Zylindervolumen verdichtet. Anschließend wird das Arbeitsgas im heißen Zylindervolumen, welches durch eine externe Wärmequelle beheizt wird, entspannt. Der Stirlingmotor kann mit Wärme aus unterschiedlichen Energiequellen betrieben werden (z.B. Biogas, Solarenergie, Abwärme) (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2016).

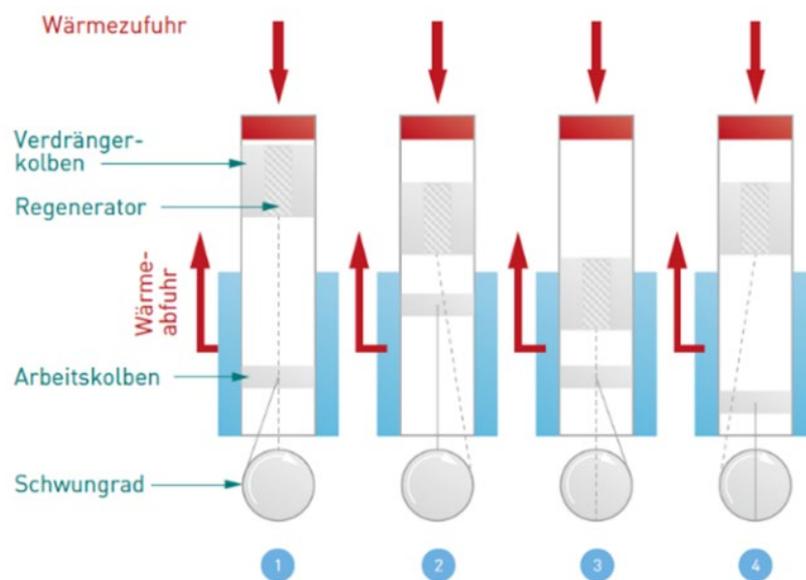


Abbildung 5: Prinzip (4 Arbeitsphasen) des Stirlingmotors (SAENA 2016)

In der Biogastechnologie spielt der Stirlingmotor zur Nachverstromung derzeit keine Rolle, da er nur einen geringen elektrischen Wirkungsgrad besitzt und den zusätzlichen Aufwand somit nicht rechtfertigt (Stockmann et al. 2021).

Gasturbine

Gasturbinen können in einem offenen oder geschlossenen Prozess stattfinden und sowohl eine interne als auch eine externe Brennkammer aufweisen. Neben den „klassischen“ Gasturbinen gibt es die Mikrogasturbine (Rekuperator-Gasturbine) für kleine elektrische Leistungen (< 300 kW). Diese kann sowohl direkt mit Methan und Biogas gefeuert werden als auch indirekt mit Wärme. Sie besitzen eine Leistung von 30 kW mit einem Wirkungsgrad von 20 bis 30% (KTBL 2013, Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2016).

Beim für die Nachverstromung interessanten indirekten gefeuerten Gasturbinenprozess erfolgt die Wärmezufuhr extern über einen HT-Wärmeübertrager. Der Betrieb kann



entweder offen mit Umgebungsluft als Arbeitsmedium in der Turbine betrieben werden (geschlossener Gasturbinenprozess, Abbildung 6) oder mit einem geschlossenen Arbeitsmedium-Kreislauf (Heißluftturbine). Letzteres wird mit einem zu den Anforderungen optimalen Arbeitsgas betrieben, wie z.B. Helium (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2016).

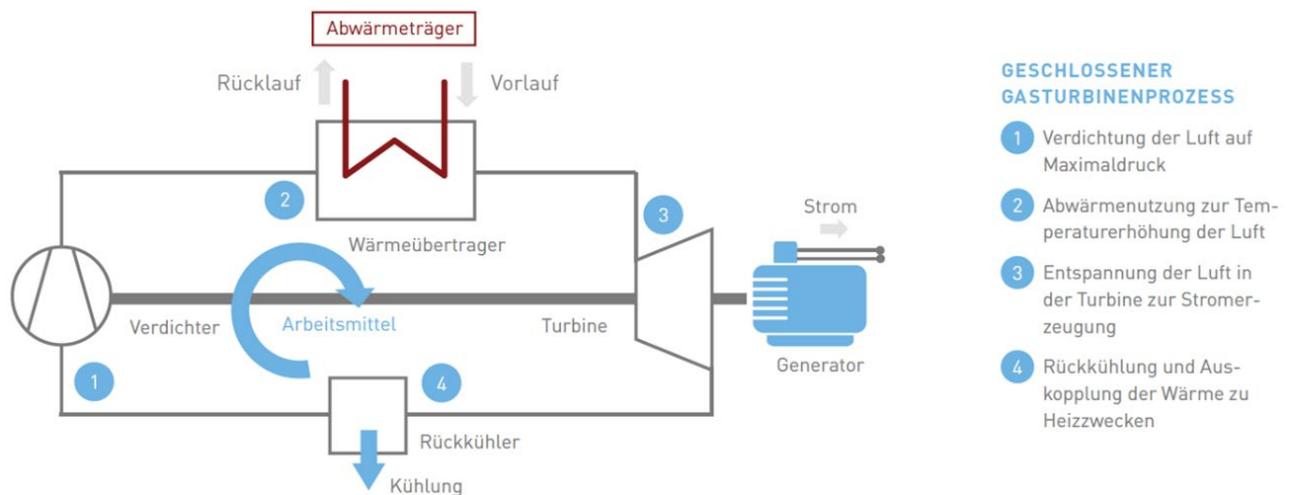


Abbildung 6: Schaltbild eines Gasturbinenprozess – geschlossen (SAENA 2016)

Heißluftturbine

Bei der Heißluftturbine (indirekt befeuerte Gasturbine, Abbildung 7) wird das Arbeitsmedium Luft durch einen Verdichter angesaugt und auf Prozessdruck verdichtet. Dieses wird mithilfe eines Wärmeübertragers und der Wärme des BHKW auf ca. 800 °C aufgewärmt und in der Turbine entspannt. Die dabei freigesetzte Energie wird mithilfe eines elektrischen Generators verstromt. Die Wärme aus der Turbine wird zur Vorwärmung der Verbrennungsluft mittels Wärmetauscher genutzt.

Ein Nachteil ist, dass der Heißluftwärmeübertrager sehr kostenintensiv ist und nur einen geringen Wirkungsgrad aufweist (Kaltschmitt, Hartmann und Hofbauer 2016).

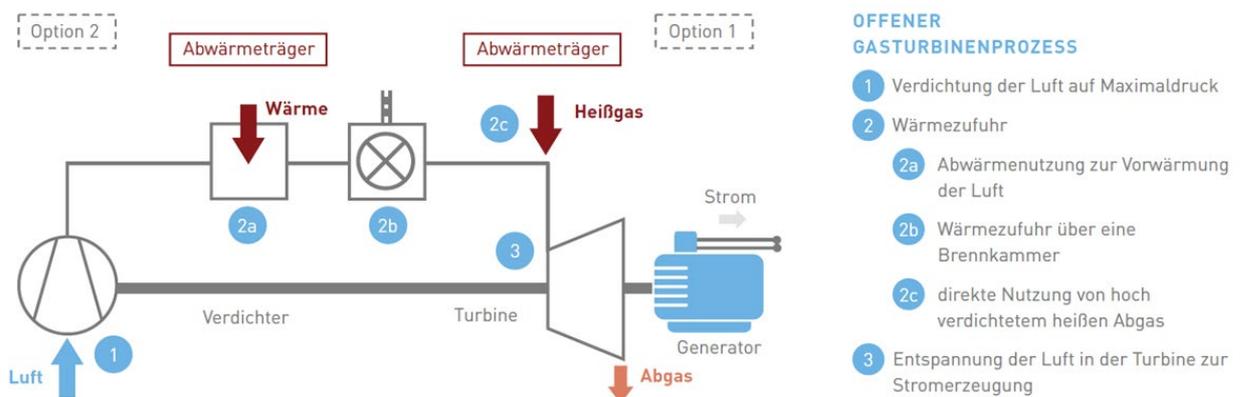


Abbildung 7: Schaltbild eines Gasturbinenprozesses – offen (SAENA 2016)



Dampfturbine/Wasserdampfturbine

In einem Dampfturbinenprozess wird Wasser, mittels einer Pumpe, auf ein hohes Druckniveau gebracht. Durch Wärmezufuhr, beispielsweise von einem BHKW, wird das Wasser erwärmt und verdampft. Der entstandene Hochdruckwasserdampf wird in einer Dampfturbine entspannt, dabei wird potenzielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Fortlaufend kann die mechanische Energie in einen Generator in Strom umgewandelt werden. Wenn der Niederdruckwasserdampf, welcher aus der Turbine ausströmt, vollständig durch einen Kühlkreislauf kondensiert wird, kann der Kreislauf von neuem beginnen. Auch die Wärme des Kühlkreislaufes kann zur Vorwärmung des Wassers oder zur Beheizung z.B. des Fermenters weiter genutzt werden (SAENA 2012).

Dampfmotor als SRC (Steam Rankine Cycle) oder CRC (Clausius Rankine Cycle)

Der CRC-Prozess basiert auf der Erzeugung von überhitztem Wasserdampf in einem Kreisprozess zur Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit bzw. elektrische Energie. Dies erfolgt in einem Expander mit angeschlossenen Generator. Der entspannte Dampf wird anschließend kondensiert und über eine Speisepumpe wieder dem Verdampfer zugeführt (KTBL 2013).

Dampfmotoren bieten sich für die Nachverstromung von Wärme aus Blockheizkraftwerke mit kleiner Leistung an. Dampfmotoren können zudem auch die Hochtemperaturabwärme industrieller Anlagen verstromen (Paschotta 2020).

3. Anknüpfungspunkte zur Biogasanlage

Die Einbindung von Nachverstromungsanlagen in die Verfahrenstechnik einer Biogasanlage ist einfach zu realisieren (siehe Abbildung 1). Die Wärme des Abgases und/oder Motorblock muss nur auf das jeweilige Arbeitsmedium übertragen und in die Nachverstromungsanlage transportiert werden.

Für Biogasanlagen sind Module in den Leistungsgrößen von 6 bis 1.000 kW elektrischer Leistung erhältlich (Bräsel 2017, Stockmann et al. 2019).

4. Ökonomische Angaben

Je nach Größe und Technik schwankt der Anschaffungswert einer Nachverstromungsanlage zwischen 3.500 bis 7.700 €/kW (siehe Tabelle 1), wobei der spezifische Preis mit steigender Leistung bis 500 kW deutlich abnimmt. Bei weiter steigender Leistung bis 1 MW hingegen flacht sich die Kostenreduktion pro kW deutlich ab.

Die Anlagen unterscheiden sich im Arbeitsmedium, in der Art der Wärmequelle, der thermischen Eingangsleistung und der Art des Expanders (KTBL 2013, Bräsel 2017, Stockmann et al. 2019).



Tabelle 1: Vergleich der Nachverstromungsprozesse anhand spezifischer Kenndaten (nach SAENA 2016, ergänzt um Kaltschmitt, Herrmann und Hofbauer 2016, Stockmann et al. 2021)

	Einheit	ORC	CRC	Gasturbine	Stirlingmotor
Leistungsbereich	kW _{el}	> 20	30–3.000	> 30	250
Spezifischer Investitionsbedarf	€/kW _{el}	bis 5.000	3.000–7.500	400–1.750	1.400–1.700
Abwärmeträger		Flüssigkeit, Dampf, Gas	Flüssigkeit, Dampf, Gas	Abgas	Abgas
Abwärmetemperaturniveau	°C	70–150	> 110	600–1.500	650–1.000
Elektrischer Wirkungsgrad	%	> 10	5–20	10–40	8–16

Durch ein Urteil des Bundesgerichtshof vom Oktober 2013 wurde bestätigt, dass Nachverstromungsanlagen mit dem BHKW eine Einheit darstellen und NV-Anlagen nicht als eigenständige Anlage zu werten sind (BGH 2013). Damit erreicht die NV-Anlage die gleiche Vergütung wie das BHKW gemäß EEG (Bräsel 2017, Stockmann et al. 2019).

Auf die Wirtschaftlichkeit von Nachverstromungsanlagen nehmen besonders die Feuerungswärmeleistung, der Nutzungsgrad, der Anschaffungswert, die Nutzungsdauer und mögliche Fördermittel (Bräsel 2017) Einfluss.

Für einen rentablen Betrieb der Nachverstromungsanlage ist eine Nutzungsdauer von 8 bis 10 Jahren und mindestens eine Auslastung von 7.000 Stunden pro Jahr anzustreben (Bräsel 2017). Aufgrund der hohen spezifischen Kosten reduziert sich die Rendite bei kleineren Anlagen deutlich.

Für Bestandsanlagen deren 1. EEG-Förderperiode innerhalb dieser Nutzungsdauer endet, ist ein wirtschaftlicher Betrieb der NV-Anlage schwer darstellbar. Biogasanlagen im EEG 2012 hingegen könnten einen wirtschaftlichen Betrieb noch in der 1. Förderperiode realisieren. Des Weiteren sind für Biogasanlagen mit einer Bemessungsleistung von mindestens 500 kW NV-Anlagen nach einer Nutzdauer von 5 Jahren ggf. bereits abgeschrieben und können danach Gewinn einfahren. In der 1. Förderperiode des EEG ist zu beachten, dass kein KWK-Bonus auf die eingespeiste BHKW-Wärme entfällt, wenn der im NV-Prozess erzeugte Strom zur Deckung des Eigenstrombedarf verwendet wird. Die Prozesswärme aus der NV-Anlage kann hingegen weiter genutzt werden und ist KWK förderungsfähig. Wenn die Biogasanlage vor dem 01.01.2012 in Betrieb genommen wurde, kann zusätzlich der Strom der NV-Anlage mit einem Technologiebonus von 2 Cent je Kilowattstunde vergütet werden (Stockmann et al. 2021).



Technisch ist zu beachten: Je höher die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf, also zwischen Verdampfer und Kondensator, ist, desto höher ist der elektrische Wirkungsgrad und somit die Gesamrentabilität (Bräsel 2017, Stockmann et al. 2019).

Die übrigen Kosten sind nach Weith et al. (2013) mit 2% der Investitionskosten abzuschätzen.

Der Zubau einer Nachverstromungsanlage steigert die Stromproduktion und somit kann es zur Überschreitung der Höchstbemessungsleistung kommen, was die Stromproduktion unrentabel macht, da nur der Börsenstrompreis berechnet wird (Stockmann et al. 2019).

5. Marktrelevanz und Absatzmärkte

Nachverstromungsanlagen rentieren sich wirtschaftlich unter bestimmten Voraussetzungen. So kann der Bau einer NV-Anlage für Bestandsanlagen, die im EEG 2009 oder 2012 gefördert werden, wirtschaftlich sinnvoll sein. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass vor Ablauf der 1. Förderperiode die Amortisationszeit der NV-Anlage ausgeglichen werden kann.

Ein Einsatzfeld ist vor allem bei Biogasanlagen zu sehen, die ihre Wärme, z.B. aufgrund der Lage, nicht vollständig genutzt bekommen. Generell kann durch die NV-Anlage die elektrische Effizienz des BHKW gesteigert werden, was das Anlagenkonzept wirtschaftlich und ökologisch reizvoll machen kann.

6. Rechtliche Belange und Förderungen

Rechtlich ist zu beachten, dass nach dem BGH-Urteil VIII ZR 262/12 (BGH 2013) die Nachverstromungsanlage mit dem BHKW eine Einheit bildet. Zudem berechtigt der Bau einer NV-Anlage den Erhalt des Technologiebonus im EEG 2009, während der KWK-Bonus auf die so genutzte Wärme entfällt.

Der nachträgliche Einbau einer Nachverstromungsanlagen ist für BImSchG genehmigte Biogasanlagen bei der Genehmigungsbehörde anzuzeigen (emissionsrelevante Änderung nach 44. BImSchV). Darüber hinaus ist zu prüfen, ob durch die Änderung der Abgastemperatur eine Anpassung der Abgasführung notwendig ist.

Nachverstromungsanlagen an Biogasanlagen sind über die Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft förderfähig, allerdings darf diese nicht nach dem EEG oder dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vergütet werden und muss vorwiegend für den Eigenverbrauch bestimmt werden.

Des Weiteren gab es in der Vergangenheit regionale Förderungen zum Bau von Nachverstromungsanlagen an Biogasanlagen. Zum Beispiel wurde eine solche Erweiterung an einer Biogasanlage in Alleshäusern 2012 über das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft in Baden-Württemberg gefördert.



7. Chancen und Hürden

In den bisherigen Fassungen des EEG kann je nach Verteilnetzbetreiber und unter bestimmten Voraussetzungen (integrierte Nachverstromungsanlage, Betrieb vor dem 01.01.2012) der Technologiebonus auf den Gesamtstrom (BHKW und NV-Anlage) verrechnet werden (Stockmann et al. 2021).

Weiter bieten auch die verschiedenen Technologien Vorteile und Nachteile. Turbinen erreichen hohe Expansionswirkungsgrade, bei jedoch bedingt hohen Kosten. Dagegen sind Hubkolbenmotoren, Scroll- und Schraubenexpander kostengünstiger, bieten meist aber nur geringere Wirkungsgrade, limitierende maximale Betriebstemperaturen und sind von Materialausdehnungen (Verschleiß) betroffen (Weith et al. 2013).

Eine schwankende Wärmezufuhr durch hohe Umgebungstemperaturen (zum Beispiel Sommerhitze, welche NV-Notkühler benötigt) oder die Teilauslastung aufgrund geringer produzierter Wärmemengen des BHKW können den Nutzungsgrad der Nachverstromung senken, da einerseits weniger Strom produziert wird, andererseits durch Notkühlung mehr Strom gebraucht wird. Auch Wartungs- oder Reparaturzeiten der Anlage können die Wirtschaftlichkeit negativ beeinflussen und die Auslastung und die Stromproduktion senken (Stockmann et al. 2019). Ein Lösungsansatz, um dies auszugleichen, sind ORC-Anlagen, die bei geringen Temperaturen und teilweise im nassen Bereich arbeiten sowie eine hohe Auslastung erreichen. „Nasser Bereich“ bedeutet, dass der ORC-Prozess bereits anläuft, obwohl nur ein Teil der Umlaufflüssigkeiten in den gasförmigen Zustand übergegangen ist (Stockmann et al. 2021).

Bei der Flexibilisierung der Stromproduktion von Biogasanlagen (gemäß EEG 2021) sollte darauf geachtet werden, dass die NV-Anlage in Teillast geschaltet werden kann. Da im Teillastbetrieb höhere (Abgas-)Temperaturen als bei Volllast erreicht werden, kann die Attraktivität der CRC-Anlagen durch eine hohe Auslastung gesteigert werden, da die Abgastemperatur einen großen Einfluss auf ihren Wirkungsgrad besitzt (Stockmann et al. 2019, Stockmann et al. 2021). Im Gegensatz dazu ist die ORC-Anlage bei Flex-BHKW weniger attraktiv aufgrund einer geringeren Stromproduktion unter diesen Bedingungen.

Eine große Hürde für Bestandsanlagen ist die Höchstbemessungsleistung (HBL). Der Zubau einer Nachverstromungsanlage steigert die Stromproduktion und somit kann es zur Überschreitung der HBL kommen, was die Stromproduktion unrentabel macht, da nur der Börsenstrompreis berechnet wird (Stockmann et al. 2019).

Je nach eingesetztem Fluid des ORC-Prozesses können sicherheitstechnische, toxikologische und klimarelevante Probleme bei einer Havarie entstehen (Weith et al. 2013).

Es sei angemerkt, dass es für jedes Projekt eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung bedarf, um eine Rentabilität zu bestätigen. Ebenfalls ist es wichtig, mit dem Netzbetreiber frühzeitig die Abnahme der zusätzlichen Strommengen zu besprechen (Bräsel 2017).



8. Weiterführende Informationen

Der Veröffentlichung „**Technik zur Nachverstromung von BHKW-Wärme**“ der ALB Bayern e.V. (2021) können verschiedenen Randbedingungen, Höchstbemessungsleistung, und technische Details entnommen werden: www.biogas-forum-bayern.de/De/Fachinformationen/AnlagenteileAnlagentechnik/orc-crc-nv_NachverstromungBHKW.html (Zugriff am 8.11.2021)

In „**Nachverstromung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen**“ der ALB Bayern e.V. (2019) finden sich weitere Informationen zur Wirtschaftlichkeit einer ORC-Anlage im EEG 2004 und 2009: www.biogas-forum-bayern.de/media/files/0005/nachverstromung-in-landwirtschaftlichen-biogasanlagen.pdf (Zugriff am 8.11.2021)

Die Broschüre „**Technologien der Abwärmenutzung**“ der Sächsische Energieagentur (SAENA 2016) liefert Grundlagen der Methodik der Abwärmenutzung sowie eine Vorstellung unterschiedlicher Technologien: www.saena.de/download/broschueren/BU_Technologien_der_Abwaermenutzung.pdf (Zugriff am 8.11.2021)

Die **Faustzahlen Biogas** des KTBL (2013) enthalten technische Details zu den unterschiedlichen Nachverstromungstechniken: www.ktbl.de/shop/produktkatalog/19506

In „**Technologien der Abwärmenutzung**“ der Sächsische Energieagentur (SAENA 2012) werden neben einer Vorstellung der zahlreichen Technologien auch beispielhaften Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Praxisbeispiele vorgestellt: www.energieeffizienz-handwerk.de/files/620/399845.pdf (Zugriff am 8.11.2021).

Die Studie des ZAE Bayern zur **Wärmenutzung bei kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen** (2007) zeigt in sechs Varianten die Abwärmenutzung bei Biogasanlagen mit einer Leistung von bis zu 500 kW_{el} auf: www.lfu.bayern.de/energie/biogas/doc/machbarkeitsstudie_abwaermenutzung.pdf (Zugriff am 11.11.2021).



Literatur

Bräsel, M. (2017): Nachverstromung: Nutzungsgrad ist entscheidend. Biogas Journal 5, S. 46–57

BGH (2013): Urteil vom Bundesgerichtshof. VIII ZR 262/12, Verkündet am 23 Oktober 2013, Karlsruhe, <http://juris.bundesgerichtshof.de/cgi-bin/rechtsprechung/document.py?Gericht=bgh&Art=en&Datum=Aktuell&nr=66109&anz=1&pos=0&Frame=4&.pdf>, Zugriff am 11.11.2021

EEG (2021): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2021) vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3138) geändert worden ist, www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2021.pdf, Zugriff am 08.11.2021

FNR (2016): Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung. 7. Auflage, Gülzow, www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Leitfaden_Biogas_web_V01.pdf, Zugriff am 09.05.2021

Jendrischik, M. (2012): Wirkungsgrad von Biogas-Anlagen durch CRC-Kleinkraftwerk steigern. In: Jendrischik PR, Cleantalking, Leipzig, 10.01.2012; <https://www.cleantalking.de/wirkungsgrad-von-biogas-anlagen-durch-crc-kleinkraftwerk-steigern/>, Zugriff am 01.11.2021

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 972–1021

KTBL (2013): Faustzahlen Biogas. 3. Ausgabe, 2013, Hg. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

Paschotta, R. (2020): Dampfmotor. RP Photonics Consulting GmbH, www.energielexikon.info/dampfmotor.html, Zugriff am 30.05.2021

Preißinger, M.; Heberle, F.; Brüggemann, D. (2014): Thermoökonomische Betrachtung der industriellen Abwärmenutzung durch ORC. 1. Schweizer ORC-Symposium. Universität Bayreuth. Luzern, <https://www.hslu.ch/-/media/campus/common/files/dokumente/ta/ta-forschung/fmhm/orc-symposium-2014/ta-thermokononische-betrachtung-der-industriellen-abwrmenutzung-durch-orc-m-preissinger.pdf?la=de-ch>, Zugriff am 01.11.2021

SAENA (2016): Technologien der Abwärmenutzung. 2. Aufl., 2016, Hg. Sächsische Energieagentur GmbH, Dresden, https://www.saena.de/download/broschueren/BU_Technologien_der_Abwaermenutzung.pdf, Zugriff am 30.05.2021

SAENA (2012): Technologien der Abwärmenutzung, 1. Auflage, Hg. Sächsische Energieagentur GmbH, Dresden, www.energieeffizienz-handwerk.de/files/620/399845.pdf, Zugriff am 8.11.2021



Stockmann, F.; Starflinger, D.; Niehoff, B.; Kissel, R.; Simon, J.; Müller, M.; Demmel, M. (2021): Technik zur Nachverstromung von BHKW-Wärme. 1. Aufl., Hg. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V., https://www.strom-aus-abgas.de/fileadmin/user_upload/Fachinformation_Nachverstromung/Fachinformation_Nachverstromung.pdf, Zugriff am 30.08.2021

Stockmann, F.; Wagner, R.; Kilburg, U.; Kern, C. (2019): Nachverstromung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen - EEG und Wirtschaftlichkeit. Hg. Biogas Forum Bayern, <https://docplayer.org/107384080-Nachverstromung-in-landwirtschaftlichen-biogasanlagen-eeeg-und-wirtschaftlichkeit.html>, Zugriff am 30.04.2021

Weith, T.; Heberle, F.; Preissinger, M.; Brüggemann, D. (2013): Abwärmenutzung von Biogas-BHKWs mittels Nachverstromung in ORC-Anlagen. In: Tagungband „Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven“. FNR/KTBL-Kongress vom 10. bis 11. September 2013 in Kassel, KTBL-Schrift, 501, Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, S. 245–255

