

Wirkungsgrade von Biogas-BHKW

Prof. Dr. Bernd Thomas, Hochschule Reutlingen, Reutlingen Research Institute (RRI)

Der elektrische Wirkungsgrad stellt eines der wichtigsten Bewertungskriterien für BHKW dar, da über diese Größe ausgedrückt wird, wie viel des Wertproduktes „elektrische Energie“ bezogen auf die eingesetzte oder aufzuwendende Brennstoffenergie produziert werden kann. Ein hoher elektrischer Wirkungsgrad ist somit gleichbedeutend mit hohen Erlösen aus dem Verkauf der erzeugten elektrischen Energie und damit eine grundlegende Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb eines BHKWs. Folglich sind die Hersteller von BHKW bestrebt, den elektrischen Wirkungsgrad ihrer Geräte kontinuierlich zu verbessern und nach oben zu treiben. Dieses Bemühen zeigt sich eindrucksvoll an der Entwicklung der mechanischen Effizienz von Gasmotoren der Firma GE Jenbacher. Während mit Motoren der Baureihe 6 im Leistungsbereich 1,8 – 4,4 MW_{el} im Jahr 1988 eine mechanische Effizienz von 34% erreichbar war, liegt dieser Wert mittlerweile bei etwa 47,5%. Diese enorme Steigerung konnte im Wesentlichen durch eine Erhöhung des mittleren effektiven Zylinderarbeitsdrucks von etwa 10 bar im Jahr 1988 auf derzeit 24 bar erzielt werden. Dabei hilft der Magerbetrieb, der gleichzeitig ein Zurückdrängen der NO_x-Emissionen bewirkt, die Klopfgrenze zu höheren Drücken hin zu verschieben. Eine sichere Zündung des Gas-Luft-Gemisches wird durch die Vorkammerzündung erreicht.

Dennoch bedeutet selbst eine derart hohe mechanische Effizienz wie zuvor beschrieben, dass über die Hälfte der eingesetzten Brenngasenergie nicht in mechanische Energie und damit letztendlich in elektrische Energie umgesetzt, sondern überwiegend in Form von Wärme sowohl über das Motorkühlwasser als auch über das Abgas an die Umgebung abgegeben wird. Aus diesem Grund gibt es verschiedene Überlegungen und Konzepte, um diese Wärme nachträglich ebenfalls in elektrische Energie zu wandeln. Da die Abgaswärme dabei gegenüber der Kühlwasserwärme ein deutlich höheres Temperaturniveau aufweist, ist das Potenzial für eine wirkungsvolle Energieumwandlung hier am größten – man spricht deshalb auch von Abgasnachverstromung. Prinzipiell werden drei Varianten verfolgt und am Markt angeboten: ORC-Anlagen, Dampfmotoren und Abgasturbinen.

In einer ORC-Anlage ist ein Dampfkraftprozess verwirklicht, der mit einem organischen Arbeitsmedium an Stelle von Wasser betrieben wird. Dieser Prozess stellt sich bei niedrigen Temperaturen vorteilhaft gegenüber dem klassischen Dampfkraftprozess dar, da die thermodynamischen Eigenschaften von Wasserdampf keine wirkungsvolle Entspannung bei geringen Temperatur- und Druckverhältnissen unterhalb von ca. 300 °C zulassen. Als organische Arbeitsmedien kommen beispielsweise Silikonöle oder zum Teil fluorierte Kohlenwasserstoffe in Frage, und an Stelle einer Turbine werden häufig Flügelzellen-, Schrauben-, Hubkolben- oder Scrollexpander eingesetzt. Man unterscheidet Hochtemperatur(HT)-ORC-Anlagen, die Abwärmen bis zu einer Temperatur von etwa 300 °C verwerten können, und

Niedertemperatur(NT)-ORC-Anlagen, die selbst Wärme bei einem Temperaturniveau von etwa 100 °C nutzen können. Somit ist es mit Hilfe von ORC-Anlagen möglich, sowohl die Abwärme im Abgas als auch die Abwärme im Kühlwasser eines Motor-BHKWs zur nachträglichen Stromerzeugung zu nutzen. Dabei darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass der elektrische Wirkungsgrad mit abnehmender Temperatur der Wärmeeinkopplung nach dem Carnot-Gesetz kleiner wird. Somit erreichen NT-ORC-Anlagen einen elektrischen Wirkungsgrad von nur etwa 5-7%. Für kombinierte HT/NT-ORC-Anlagen in praktischer Ausführung kann dagegen ein elektrischer Nettowirkungsgrad von etwa 10% angesetzt werden, was bei effizienten BHKW einer Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades von ca. 4 Prozentpunkten entspricht. Nachteilig wirkt sich bei ORC-Anlagen der hohe Anlagenaufwand aus, der sich u.a. daraus ergibt, dass der Prozess aufgrund der teilweisen Brennbarkeit des organischen Arbeitsmediums häufig über einen Thermoölkreislauf an den Abgaswärmetauscher des BHKWs angeschlossen werden muss. Dennoch ist das Verfahren am Markt verfügbar, und es wird von einer Vielzahl Hersteller¹ angeboten.

Zur besseren Ausnutzung des thermischen Potenzials der Abgaswärme, die bei Temperaturen von über 500 °C nutzbar ist, existiert nach wie vor die Variante des klassischen Dampfkraftprozesses mit dem Arbeitsmedium Wasser. Da bei kleineren Leistungen eine Turbine als Entspannungsmaschine wenig effektiv ist, wird der Prozess in Dampfmaschinen umgesetzt. Diese arbeiten bei Temperaturen von knapp 400 °C, und auf diese Weise sind elektrische Wirkungsgrade von bis zu 15% erreichbar. Allerdings bedingt dieses einen Systemdruck von maximal 60 bar, was erheblich höhere Anforderungen an die Festigkeit der verwendeten Bauteile sowie die Vorkehrungen für einen sicheren Betrieb der Anlage im Vergleich zu ORC-Anlagen nach sich zieht. Der Dampfmaschine wird von einigen Firmen² angeboten, und er befindet sich noch im Stadium des Serienanlaufs.

Als drittes Verfahren zur Abgasnachverstromung war die Abgasturbine genannt. Hier wird die Entspannung des Druck- und Temperaturniveaus der Abgase in einer Turbine direkt zur Stromerzeugung genutzt. Aufgrund des erforderlichen Abgasdrucks ist dieses Verfahren zuerst für Zündstrahlmotoren entwickelt worden. Mittlerweile ist es aber auch für hoch aufgeladene Gas-Ottomotoren einsetzbar. Vorteilhaft ist der vergleichsweise geringe Anlagenaufwand, wobei zu bedenken ist, dass die Turbine bei hohen Drehzahlen arbeitet, was eine aufwändigere Transformation des erzeugten elektrischen Stroms auf Netzfrequenz erfordert. Mit Blick auf den erreichbaren Wirkungsgrad ist das Verfahren mit dem Einsatz einer ORC-Anlage vergleichbar; es ist ebenfalls eine Steigerung des elektrischen BHKW-Wirkungsgrades um ca. 4 Prozentpunkte möglich. Die Abgasturbine ist am Markt verfügbar, sie wird aber nur von wenigen Herstellern angeboten³.

In jüngster Vergangenheit werden verstärkt Überlegungen angestellt, Biogas-BHKW in eine bedarfsgerechte Stromerzeugung zu integrieren. Hintergrund dieser Aktivitäten ist die Notwendigkeit zum Ausgleich zunehmender Mengen an fluktuierender Stromerzeugung in PV- und Windkraftanlagen. Dieses Szenario bedingt, dass Biogas-BHKW zum Teil deutlich größer ausgelegt werden müssen, als dieses bisher der Fall ist, um zu Zeiten geringen PV- und Windstromaufkommens elektrische Leistung in größerem Umfang zur Verfügung stellen zu können. Als Folge davon würden die BHKW in den übrigen Zeiten im Teillastbereich arbeiten,

¹ www.orc-fachverband.de

² www.voith.com, www.crcenergy.de, www.conpower.de

³ www.schnellmotor.de, www.burkhardt-gmbh.de

was aufgrund der unvermeidlichen Drosselverluste geringere elektrische Wirkungsgrade nach sich zieht. Herstellerdaten belegen diesen Effekt, in dem der elektrische Wirkungsgrad von Volllast auf 50%-Teillast um ca. 5 Prozentpunkte abnimmt. Eigene Messungen am Prüfstand der Hochschule Reutlingen an kleineren Erdgas-BHKW zeigen ein etwa gleiches Verhalten. Um derartig verminderte Teillastwirkungsgrade zu vermeiden, werden verstärkt Mehrmodulanlagen geplant. Auf diese Weise lassen sich sowohl die Flexibilität bei einem größeren Modulationsbereich als auch die Verfügbarkeit erhöhen, während sich die Wirkungsgradeinbußen im Teillastbetrieb in Grenzen halten. Somit ist ein Übergang von größeren Einmodulanlagen mit hoher jährlicher Laufzeit auf Mehrmodulanlagen mit insgesamt höherer Leistung aber geringerer Jahreslaufzeit zu erwarten. Zwingend erforderlich in diesem System sind allerdings entsprechend vergrößerte Biogas- und Wärmespeicher.

Abschließend ist die Abhängigkeit zwischen den Wirkungsgraden und den Abgasemissionen zu beleuchten. Von konkretem Interesse ist dabei die Gegenläufigkeit des elektrischen Wirkungsgrades und der NO_x-Emissionen bei Gas-Ottomotoren im Magerbetrieb. Aus Messwerten zeigt sich, dass sich der elektrische Wirkungsgrad im Lastbereich von 50 bis 100% um etwa einen Prozentpunkt verringert, wenn die NO_x-Emissionen von 1500 mg/Nm³ durch Erhöhung des Luftverhältnisses auf den zulässigen Wert von 500 mg/Nm³ reduziert werden. Eine weitere Reduktion der NO_x-Emissionen auf 250 mg/Nm³ führt zum Verlust eines weiteren Prozentpunktes beim elektrischen Wirkungsgrad. Zudem ist die Abhängigkeit vom Luftverhältnis sehr stark ausgeprägt, so dass sich kleinere Änderungen oder Abweichungen vom vorgegebenen Luftverhältnis bereits drastisch auf die NO_x-Emissionen auswirken. Daraus resultieren hohe Anforderungen sowohl an die Ausregelung des Luftverhältnisses als auch an die Überwachung und Wartung von Biogasmotoren im Magerbetrieb, denn nur so kann sichergestellt werden, dass die Stickoxid-Emissionen den vorgegebenen Grenzwert von 500 mg/Nm³ dauerhaft und sicher unterschreiten.

Andere Varianten zur Senkung der NO_x-Emissionen wären durch einen stöchiometrischen Betrieb ($\lambda=1$) mit geregelter 3-Wege-Katalysator oder einen nachgeschalteten Katalysator mit selektiver katalytischer Reduktion (SCR) gegeben. Die erste Variante ist jedoch insbesondere bei Biogasmotoren mit verschiedenen Nachteilen verbunden. Zum einen enthält das Biogas verschiedene weitere Schadstoffe wie Cl, F, Si und H₂S, die Katalysatorgifte darstellen und damit die Aktivität des Katalysators in kurzer Zeit erheblich vermindern. Eine vorherige Reinigung des Biogases von den genannten Stoffen ist beispielsweise mit Wäschern möglich, aber mit erheblichem Zusatzaufwand verbunden. Außerdem ist es insbesondere im Biogasbetrieb nicht einfach, das stöchiometrische Luftverhältnis, das in einem engen Fenster gehalten werden muss, auszuregulieren. Zum anderen lässt der stöchiometrische Betrieb aufgrund der Klopfneigung keine größere Aufladung zu, so dass der Wirkungsgrad des Motors selbst mit Abgasrückführung um 3-6 Prozentpunkte geringer ausfällt als bei hochaufgeladenen Motoren im Magerbetrieb.

Der Einsatz eines nachgeschalteten SCR-Katalysators ist dagegen technisch ohne gravierend nachteilige Auswirkungen auf den Motor möglich. Hier wirken sich allein der höhere Anlagenaufwand und die damit verbundenen Kosten hemmend auf den Einsatz dieser Technologie bei Biogas-BHKW aus.

Kontakt: Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas, Reutlingen Research Institute (RRI), Hochschule Reutlingen, Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen, Tel.: 07121/271-7041, email: bernd.thomas@reutlingen-university.de