

Biogasmotoren Technik

Wirkungsgradmessung am Biogasmotor

Immer dann, wenn der Biogasverbrauch vom Betreiber als zu hoch empfunden wird oder die elektrische Leistung am Generator nicht wie zugesagt erbracht wird, möchte der Betreiber es ganz genau wissen und den (mechanischen, elektrischen) Wirkungsgrad seines Biogasmotors messen lassen. Der Motorenhersteller und der Anlagenbauer (Packager) haben mit entsprechend hohen Wirkungsgraden für den Biogasmotor geworben und das Biogas-BHKW mit dieser zugesicherten Eigenschaft verkauft. Darauf wurde auch die Wirtschaftlichkeitsrechnung für die Investition in ein Biogas-BHKW abgestimmt.

Bevor wir auf die Tücken der Wirkungsgradmessung eingehen, erfolgt hier kurz eine Definition des Wirkungsgrades:

Der Wirkungsgrad η errechnet sich aus dem Verhältnis der zugeführten Energie des Biogases zur erbrachten mechanischen Energie an der Kurbelwelle des Biogasmotors:

$\eta_{\text{(mech)}}$ = mechanische Energie / zugeführter Energie des Biogases

Biogasmotoren bringen hier Wirkungsgrade zwischen 37% und 42%.

Wird die Abwärme des Motors aus dem Kühlkreislauf und dem Abgas noch als nutzbare Wärme über Wärmetauscher ausgekoppelt, erhöht sich der Gesamtwirkungsgrad aus der Nutzung mechanischer und thermischer Energie noch einmal beträchtlich: ca. 45% der Energie des Biogases lassen sich als verwertbare Wärmeenergie gewinnen.

$\eta_{\text{(mechanisch und thermisch)}}$ = (mechanische Energie + thermische Energie) / zugeführte Energie des Biogases

Gesamtwirkungsgrade in Höhe von 82% - 87% sind realisierbar, in Einzelfällen auch bis an 90%. Die verbleibenden ca. 10% - 15% sind Verluste aus der Wärmeabstahlung des Biogasmotors und nicht nutzbarer Abwärme aus Wärmetauscherverlusten.

Einflussfaktoren auf den (mechanischen) Wirkungsgrad des Biogasmotors

Ziel der Motorenbauer ist natürlich eine hohe Umsetzung der im Kraftstoff gebundenen chemischen Energie in mechanische Energie an der Kurbelwelle, die z.B. über eine Kupplung den Generator zur Stromerzeugung antreibt.

Wie sehen die idealen Verhältnisse für optimale Biogasmotoren-Leistung nun aus?

Biogasmotoren Technik

Die erste Anforderung ist eine optimale Füllung der Verbrennungsräume mit zündfähigem Gemisch aus Luft und Biogas. Für die Leistung entscheidend ist die Masse an Methan aus dem Biogas und Sauerstoff aus der Ansaugluft im Brennraum.

Die optimale Füllung mit zündfähigem Gemisch wird durch Abgasturboaufladung, einer Kühlung des Gemisches und dem richtigen Verhältnis zwischen Methan und Sauerstoff hergestellt (Verbrennungsluftverhältnis λ). Die Motoren werden aus Gründen der geforderten Abgasqualität mit ca. 30-40% Luftüberschuss gefahren, weil damit die Bildung von giftigen Stickoxiden reduziert wird (Lambda $\lambda = 1,3-1,4$).

Die Drosselklappe ist bei Volllastbetrieb vollständig geöffnet, was für hohe Wirkungsgrade notwendig ist. Die im Teillastbereich auftretenden Füllungsverluste und damit „schlechtere“ Verbrennung mit geringeren Wirkungsgraden entfallen hier.

Jetzt muss nur noch ein starker Zündfunke zum richtigen Zündzeitpunkt das Biogas-Luft-Gemisch vollständig entzünden, was bei mageren Gemischen viel Zündenergie erfordert.

Diese Faktoren beeinflussen die mechanische Leistung des Biogasmotors besonders:

- das Verbrennungsluftverhältnis zwischen Biogas und Ansaugluft, (Gemischregler: mit „fettem“ Gemisch ist gut zu starten, aber hoher Verbrauch, zu „mageres“ Gemisch führt zu schlechtem Startverhalten, Zündaussetzern und Leistungsverlust)
- die Temperatur des Gemisches, mit der es in den Brennraum eintritt, (Gemischkühler)
- Methangehalt des Biogases
- Zündzeitpunkt (wird oft mit Methangehalt von der Motorsteuerung verstellt)
- Ladedruck des Abgasturboladers
- Kompression im Brennraum (Ventilsitze dicht, geringer Blow-By zwischen Laufbuchse und Kolben)
- Brennraumtemperaturen nicht zu hoch (Motorkühlkreislauf und Wärmetauscher i.O.)

Nicht vergessen werden soll eine gute Schmierung aller Bauteile, die sich drehen oder Reibpaarungen darstellen, wie z.B. Kolbenringe und Laufbuchse oder Haupt- und Pleuellager. Die Leistung, die ein Motor zur Überwindung der inneren Reibungswiderstände aufbringen muss, fehlt natürlich als Nutzleistung an der Kurbelwelle.

Für den praktischen Betrieb mit gutem Wirkungsgrad ist ein einwandfreier Zustand der Wärmetauscher (nicht verschlammte) für eine gute Wärmeübertragung genauso wichtig wie ablagenfreie Ansaugluft- und Abgaskanäle. Problematisch sind hier Verbrennungsrückstände

Biogasmotoren Technik

insbesondere aus verbranntem Schmieröl, das z.B. wegen verschlissener Laubbuchsen oder Ventileführungen in zu großen Mengen mit angesaugt und verbrannt wird.

Praktische Wirkungsgradmessung am Biogasmotor

Eine genaue Messung des (mechanischen oder elektrischen) Wirkungsgrades erfolgt über die Messung der zugeführten Energie im Brennstoff Biogas und der abgenommenen elektrischen Leistung am Generator. Der Wirkungsgrad des Generators selbst (erzeugte elektrische Leistung / mechanische Antriebsleistung) ist genau bestimmt und im Generatordatenblatt dokumentiert, sodass sich mit der Messung der elektrischen Leistung in guter Genauigkeit auf die mechanische Leistung des Biogasmotors schließen lässt.

Hinweis: Die Gasfackel sollte für die Dauer der Messung von der Biogasversorgung abgesperrt werden, um eine Verfälschung des Gasverbrauches zu vermeiden.

Erheblich größer ist der Aufwand der Messung der mit dem Biogas zugeführten Energie, weil folgende Größen ermittelt werden müssen:

- der Volumenstrom des zugeführten Biogases
- Druck und Temperatur, damit der gemessene Volumenstrom auf den Normzustand umgerechnet werden kann
- Methangehalt des Biogases und sein (unterer) Heizwert
- (Rest-) Wassergehalt des Biogases
- Temperatur der Ansaugluft
- Temperatur des Gemisches
- Kühlwassertemperatur
- Verbrennungsluftverhältnis

Der Einfluss der Biogas- und Gemischtemperatur auf den Wirkungsgrad ist hoch, ebenso eine hohe relative Feuchte des Biogases, da dann sein Heizwert sinkt.

Zahlenbeispiele verdeutlichen den Einfluss von Druck, Temperatur und Feuchtgehalt des Biogases auf das Normvolumen:

Gemessenes Volumen in m ³	Gemessene Temperatur in Grad C	Gemessener absoluter Druck in mbar	Gemessene relative Feuchte in %	Ergebnis Normvolumen in m ³
1000	0	1013,25	0	1000
1000	25	1013,25	0	919,424
1000	25	1013,25	5	914,718
1000	31	1063,00	2,0	941,375

Biogasmotoren Technik

Zahlenbeispiel für die Wirkungsgradmessung

Berechnung: $\eta_{\text{elektrisch}} = \text{produzierte Energie (kW}_{\text{produziert}}) / \text{zugeführte Energie (kW}_{\text{zugeführt}})$

Was wird zur Berechnung benötigt:

- Methangehalt im Biogas vor dem BHKW in Prozent
- (Heizwert für Methan CH_4 : $9,97 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$)
- Normiertes Gasvolumen: Betriebsvolumen V_1 , Temperatur T_1 , Druck p_1 ,
 $(p_0 = 1013,25 \text{ hPa}; T_0 = 273,15 \text{ K}) \quad V_0 = p_1 \cdot V_1 \cdot T_0 \cdot (T_1 \cdot p_0)^{-1}$
- vom Generator abgegebene elektrische Leistung (kW), die Leistungsaufnahme in kW der wichtigen abhängigen oder unabhängigen Hilfsaggregate (wie z.B. Pumpen)

Beispieldaten:

- Methangehalt: 52,8%
- Normgasverbrauch V_0 : $267,1 \text{ m}^3 / \text{h}$ ($V_1 = 274,65 \text{ m}^3 / \text{h}$ $T_1 = 288,15 \text{ K}$ $p_1 = 1040 \text{ mbar}$, rel. Feuchte 2,5 %)
- Energieoutput: 524,5 kW
- Nebenaggregate: 3 kW

$$\begin{aligned} \eta_{\text{elektrisch}} &= (P_{\text{el}} - P_{\text{Hilfsaggr.}}) / (\text{Methangehalt} \times V_0 \times h_u) \\ &= (524,5 \text{ kW} - 3 \text{ kW}) / (0,528 \times 267,1 \text{ m}^3/\text{h} \times 9,97 \text{ kWh/m}^3) \\ &= 0,3709 = 37,1\% \end{aligned}$$

Für den Leistungsnachweis nach DIN ISO 3046-1 gelten die Normbezugsbedingungen 25° Celsius bei 1000 mbar und 30% rel. Feuchte des Biogases, sodass das oben angegebene Norm-Gasvolumen noch einen Korrekturfaktor erhält:

Dieser Korrekturfaktor (Tabellenwert der DIN) beträgt für das Beispiel 1,009, um den der Gasverbrauch reduziert wird, damit erhöht sich der Wirkungsgrad nach DIN ISO 3046-1 von 37,1 auf 37,4%.

Gemäß DIN ISO 3046-1 darf der Gasverbrauch bei Nennleistung um bis zu 5% nach oben abweichen. Der Motorenhersteller darf den Wirkungsgrad statt mit dem aus dem gemessenen Verbrauch abgeleiteten Normverbrauch ($267,1 \text{ m}^3/\text{h}$) mit dem um 5% reduzierten Verbrauch berechnen ($253,7 \text{ m}^3/\text{h}$). Dies führt dann zu einem Wirkungsgrad von $\eta_{\text{elektrisch}} = 39,1\%$.

Biogasmotoren Technik

Es ist also für die Wirkungsgradmessung nicht damit getan, nur den Gasverbrauch (Volumenstrom) unter den gerade herrschenden Umgebungsbedingungen für Druck, Temperatur und relativer Feuchte sowie den Methangehalt zu messen.

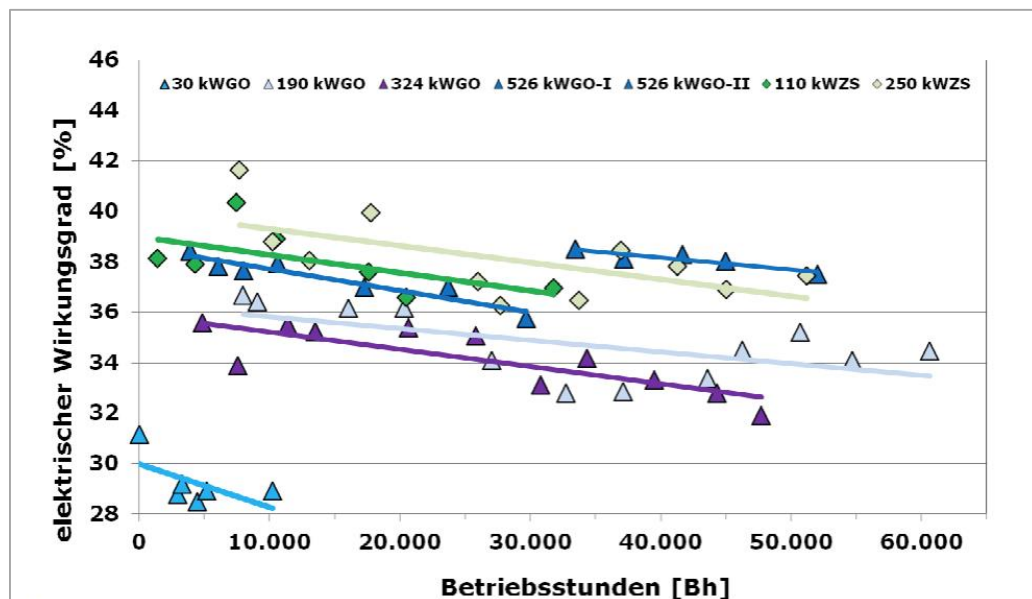
Um mit Herstellerangaben vergleichen zu können, ist eine Umrechnung auf die Normbedingungen notwendig. Die Toleranz von 5% für den Verbrauch nach oben (für den neuen Motor!) ist schon sehr großzügig – zu Lasten der Biogasmotoren-Betreiber.

1% weniger Wirkungsgrad (elektrisch) macht bei einem Biogas-Motor im Jahr bei einer Leistung von 526 kW_{el} und 8500 Betriebsstunden im Jahr einen Mehrverbrauch von ca. 30.000 m³ Methan jährlich aus. 1 ha Mais bringt ca. 5000 m³ Methan p.a., es werden also rund 6 ha Mais im Jahr mehr benötigt.

Bei einem 500 kW Biogas-BHKW mit 8000 Betriebsstunde und 20 Cent/KWh Vergütung kostet ein Absacken des Wirkungsgrades von 39% (487,5 kW_{el}) auf 37% (462,5 kW_{el}) rund 40.000 € jährlich weniger Umsatz.

Veränderung des Wirkungsgrades über die Betriebszeit, Einfluß von Wartung

Dipl.-Ing.(FH) Volker Aschmann vom Institut für Landtechnik und Tierhaltung hat in einer Untersuchung nachgewiesen, dass über die Betriebszeit des Biogasmotors ein (verschleißbedingter) Abfall des Wirkungsgrades festzustellen ist.



Quelle Aschmann ILT2c 131 AV 021

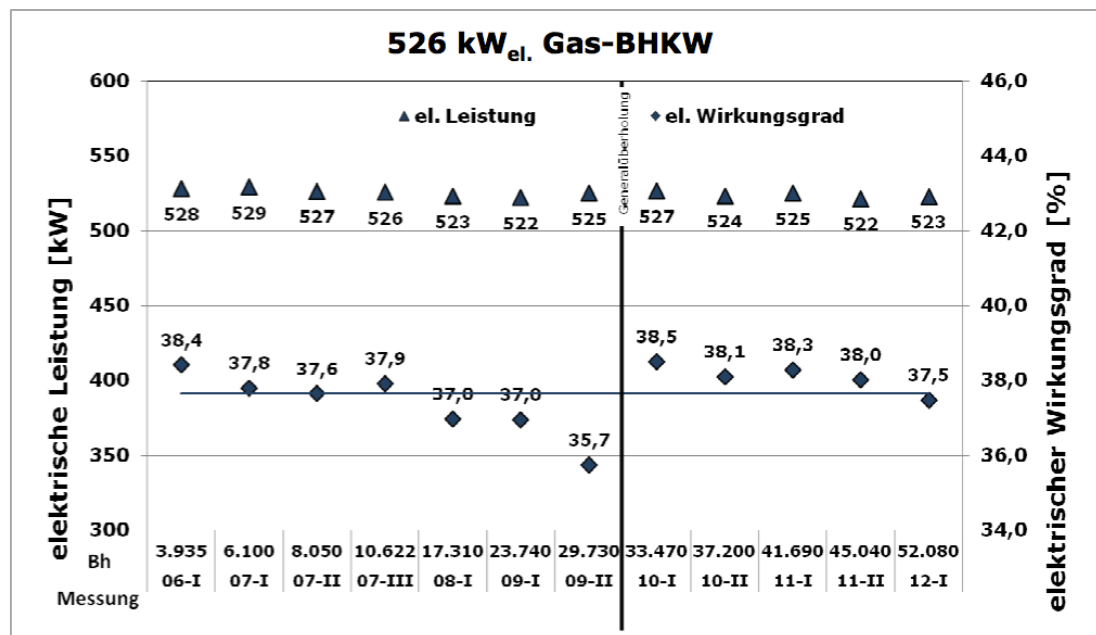
Biogasmotoren Technik

Die nachfolgende Übersicht zeigt die Unterschiede der Wirkungsgradangaben von Biogasmotoren-Herstellern (**Gas-Otto** und **Zündstrahlern**) und gemessenen Werten auf. Hier zeigt sich, dass Herstellerwerte sich auf den Zustand bei Inbetriebnahme beziehen.

BHKW	Betriebsstundenanzahl [Bh]	Durchschnittlicher el. Wirkungsgrad [%]	Herstellerangabe [%]	Differenz
30 kW GO ¹	10.250	29,2	k.A.	k.A.
100 kW GO	57.350	35,1	38,0	2,9
190 kW GO	54.700	34,6	38,4	3,8
324 kW GO	47.750	34,2	37,7	3,5
526 kW GO	45.050	37,4	40,4	3,0
40 kW ZS ²	30.500	34,9	37,0	2,1
75 kW ZS	12.700	37,0	40,0	3,0
110kW ZS	33.000	37,8	39,7	1,9
250 kW ZS	45.050	38,0	43,0	5,0

Quelle : Aschmann ILT2c 121 AV 013

Den Einfluss von regelmäßig durchgeführter Wartung auf den Wirkungsgrad beschreibt das nächste Diagramm, ebenfalls von Herrn Aschmann untersucht.



Quelle Aschmann ILT2c 121 AV021

Biogasmotoren Technik

Die Entwicklung des Wirkungsgrades über die Betriebsstunden ist deutlich zu erkennen, auch der Effekt einer Generalüberholung zeigt sich ganz klar.

Neben der Generalüberholung kommt den regelmäßigen Wartungsmaßnahmen eine große Bedeutung zu, den Wirkungsgrad beständig auf hohem Niveau zu halten. Zugesetzte Filter leuchten als Verbrauchstreiber sofort ein, aber es gibt noch eine ganze Reihe weiterer Einflussfaktoren auf den Verbrauch, die regelmäßige Aufmerksamkeit erfordern.

Was kann der Betreiber für einen hohen Wirkungsgrad im Betrieb unterstützend tun?

Steigt der Gasverbrauch ohne Erhöhung der gemessenen elektrischen Energie im betrachteten Zeitintervall an, sind folgende Überprüfungen vorzunehmen:

1. Messung Methangehalt und Feuchte Biogas Überprüfung Gemischregler, Kühlung und Entfeuchtung des Biogases
2. Prüfung Ansaugluft-Temperierung und -Regelung (Sommer-/Wintereinstellung?) sowie Filterzustand
3. Überprüfung Gemischkühler Temperaturniveau und ggfls. Reinigung
4. Messung Kompression und Spektroskopierung der Brennräume auf Ölablagerungen, Zustand Laufbuchsen (Riefen, z.B. wegen Silikateinträge durch Biogas,..)
5. Zylinderköpfe : Ventilsitze und Ventilschaftabdichtungen /-Führungen
6. Zündkerzenzustand: verschlissen
7. Abgastemperaturen (zu hoch: z.B. wegen unverbrannter Gemischanteile, Gemisch zu mager, Zündenergie zu gering, ..)
8. Abgastegendruck zu hoch (Oxidationskatalysator baut zu hohen Druck auf)

Die Biogasmotoren werden heute stark aufgeladen und mit sehr magerem Gemisch betrieben. Damit werden sie mechanisch und thermisch jeweils an die Grenze ihrer Belastbarkeit herangeführt. Um Schäden zu vermeiden, müssen diese Motoren in einem engen Temperaturfenster für Ansaugluft, Biogas, Brennraumtemperatur gefahren werden, deren Über- oder auch Unterschreitung zu übermäßigem Verschleiß des Biogasmotors mit hohem Schadenspotenzial führen.

Dipl.-Ing. Michael Wentzke

Quellen: Umrechnung Gasvolumen auf Normvolumen <http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049691/index.php>

DIN ISO 3046-1 Hubkolben-Verbrennungsmotoren – Anforderungen Teil 1

Vortrag Dipl.-Ing (FH) Volker Aschmann Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayrischen Landesanstalt für Landwirtschaft
„Herausforderungen an die BHKW-Technik in der Direktvermarktung“