

Marina Bekker und Hans Oechsner

# Betrieb einer Mikrogasturbine mit Biogas – praktische Erfahrungen

Die mit Biogas betriebene Mikrogasturbine Capstone CR 65 wurde im Jahr 2008 in einer Biogasanlage in Kupferzell getestet. Dabei erwies sich ihr Betrieb als störungsunempfindlich und wartungsarm. Die besten elektrischen bzw. thermischen Wirkungsgrade wurden im Vollastbetrieb erreicht und betragen 25,8 bzw. 60,8 %. Die Abgasgaskonzentrationen waren insgesamt sehr niedrig. Die  $\text{NO}_x$ -Konzentration lag in allen Leistungsstufen unter  $6 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ . Die CO-Konzentration erreichte ihren Minimalwert von  $21 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  im Vollastbetrieb. Es ist für einen energieeffizienten und emissionsarmen Betrieb zu empfehlen, die Mikrogasturbine im Vollastbetrieb mit einem schlüssigen Wärmenutzungskonzept zu betreiben.

## Schlüsselwörter

Biogas, Mikrogasturbine, Energieeffizienz

## Keywords

Biogas, micro gas turbine, energy efficiency

## Abstract

Bekker, Marina and Oechsner, Hans

Practical experience of using a biogas-powered micro gas turbine

Landtechnik 65 (2010), no. 2, pp. 136-138, 3 figures, 1 table, 1 reference

In an evaluation study of 2008 the operation of the Capstone micro gas turbine CR 65 in a biogas plant in Kupferzell proved to be low-maintenance and low-interference. The best electrical and thermal efficiency were achieved in full-load operation and amounted to 25.8 % and 60.8 % respectively. The gas concentrations measured in the exhaust gas were very low. The  $\text{NO}_x$  concentration was in all load levels below  $6 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ . The concentration of CO reached its minimum value of  $21 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  in full-load operation. The operation of micro gas turbine in the most efficient and low emission full-load mode with coherent heat utilization is recommend.

KWK-Anlagen zum Einsatz, wie z. B. Mikrogasturbinen für die thermische Verwertung des Biogases in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Sie haben einige Vorteile gegenüber den bisher überwiegend genutzten Kolbenverbrennungsmaschinen. Zum Beispiel kann ihre Abwärme aufgrund der erhöhten Abgastemperatur effizienter für Heizung, in Absorptionskältemaschinen oder als Prozesswärme verwendet werden.

Laut dem novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) aus dem Jahr 2009 wird bei der thermischen Verwertung des Biogases in Mikrogasturbinen ein Technologie-, ein Emissionsvermeidungs- und, bei einem vorhandenen Wärmekonzept, ein KWK-Bonus gewährt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer praxisorientierten Untersuchung aus dem Jahr 2008 präsentiert. Die Betriebsparameter der Mikrogasturbine Capstone CR 65 wurden ausgewertet, um ihre Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz beurteilen zu können. Mithilfe dieser Daten wurde ermittelt, welches Betriebsregime aus wirtschaftlicher und technischer Sicht sinnvoll sind. Die CR 65 ist auf dem Markt inzwischen von einer Mikrogasturbine mit einer elektrischen Leistung von 200 kW abgelöst worden. Dieses Gerät erreicht nach Angabe des Herstellers Capstone einen deutlich höheren elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 34 %. Diese sogenannten CR 200-Turbinen sind seit Ende 2008 im Praxiseinsatz. An diesem Gerät konnten im Rahmen der vorliegenden Studie jedoch keine Messungen durchgeführt werden.

## Material und Methoden

An der Biogasanlage Karle in Kupferzell wurden zwei Mikrogasturbinen Capstone CR 65 von Juni 2007 bis Juni 2009 im Rahmen eines Pilotprojektes der Firma Greenenvironment GmbH mit Biogas betrieben. Von Januar bis Ende November 2008 begleitete die Landesanstalt für Landtechnik und Bioenergie (Universität Hohenheim) den Betrieb einer dieser beiden Mikrogas-

Die Energieeffizienz der Biogasverwertung lässt sich durch die Nutzung der bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) verfügbaren Wärme steigern. Deswegen kommen immer mehr

turbinen messtechnisch. Die hier dargestellten Ergebnisse sind Auswertungen dieser kontinuierlichen Messreihen.

Der Versuchsanordnung vorgeschaltet war eine speziell entwickelte Gasaufbereitungsanlage. Die eingesetzte Mikrogasturbine war vom Hersteller für den Betrieb mit Biogas ausgelegt worden. Sie unterscheidet sich von einer konventionellen 65-kW-Turbine durch ein angepasstes Steuerungsventil, Zuführrohre mit einem größeren Durchmesser und eine spezielle Geometrie des Brenners. Laut Herstellerangaben ist die Mikrogasturbine für den Betrieb in unterschiedlichen Lastbereichen geeignet. Ihre elektrische Leistung beträgt im Volllastbetrieb 65 kW. Für die Ermittlung der optimalen Betriebsregime und ihre Teillastfähigkeit wurden mehrere Teillastbereiche von 30–65 kW getestet.

Zur Ermittlung der Energieströme wurden betriebsrelevante Messparameter wie Biogasvolumenstrom, -temperatur, -druck sowie -zusammensetzung messtechnisch erfasst. Diese Werte wurden zur Bestimmung der elektrischen und thermischen Leistung sowie des elektrischen und thermischen Wirkungsgrades in verschiedenen Teillast- und Volllastbetrieben herangezogen. Dabei wurde der elektrische Wirkungsgrad aus den abgegebenen Strommengen und den mit dem Biogas zugeführten Energiemengen berechnet. Zur Bewertung der Verbrennung wurden unter anderem Emissionswerte wie der Ge-

halt des Abgases an Stickstoffoxiden und Kohlenstoffmonoxid sowie seine Temperatur gemessen. Anhand der erfassten Werte kann der Einfluss des Teillastbetriebes auf die Emissionen bestimmt werden. Zudem können die Abgaswerte aus der Mikrogasturbine mit den Emissionen aus den biogasbetriebenen Zündstrahl- und Gas-Blockheizkraftwerken verglichen werden (**Tabelle 1**).

### Ergebnisse

Während der Untersuchungszeit war die Turbine insgesamt 3 55 Stunden in Betrieb. In **Abbildung 1** ist die untersuchte Mikrogasturbine dargestellt. Ihr Betrieb erwies sich als störungsunempfindlich und wartungsarm. Es wurden lediglich nach eineinhalb Jahren Betrieb Luftfilter und Brennkammerzylinder erneuert. Die Stillstandzeiten der Turbinen wurden hauptsächlich durch äußere Faktoren verursacht, z.B. dadurch, dass es Störungen in der Peripherie, hauptsächlich in der Biogasverdichtung, gab oder dass die Turbine nicht genutzt wurde, da keine Wärme in der Trocknungshalle für die Gärreste benötigt wurde. Bei der Biogasverdichtung aufgetretene Störungen waren auf die schlechte Regelbarkeit des Biogasverdichters zurückzuführen. So lag der minimale gemessene Druck während der gesamten Messung bei ca. 4 bar und der maximale Druck bei ca. 10 bar. Da die Turbine einen konstanten Druck von ca. 5 bar braucht, wirkten sich diese Schwankungen auf den Betrieb und anschließend auf den elektrischen Wirkungsgrad negativ aus.

Einen Überblick über den berechneten elektrischen und thermischen Wirkungsgrad in den verschiedenen Leistungsstufen gibt **Abbildung 2**. Im Volllastbetrieb war der elektrische Wirkungsgrad am höchsten und betrug 25,8 %. Der thermische Wirkungsgrad betrug dabei 68,6 %.

Der elektrische Wirkungsgrad stieg mit zunehmender Leistungsabfrage an und lag ab 55 kW im Bereich von 24,7 bis 25,8 %. Genau entgegengesetzt verhielt sich der thermische Wirkungsgrad. Er war bei geringer Leistungsabfrage mit 70,7 % hoch und fiel um 2,1 auf 68,6 % im Volllastbetrieb ab.

Durch die direkte Nutzung der Abwärme in der Gärresttrocknung fiel der Wärmeübertrag aus dem Abgas auf ein Trä-

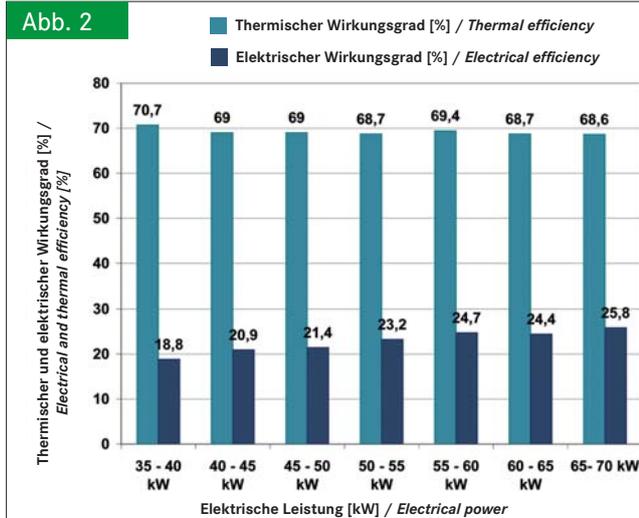
Tab. 1

Messparameter und eingesetzte Messtechnik  
Table 1: Measured parameters and measuring equipment

Messparameter <i>Measured parameters</i>	Messgeräte <i>Measuring Instruments</i>	Einheiten <i>Units</i>
Biogaszusammensetzung <i>Biogas composition</i>	Brenngas-Analysegerät SSM 6000 (pronova) <i>Analytical apparatus SSM 6000 (pronova)</i>	[%], [ppm]
Biogasvolumenstrom <i>Volumetric flow rate</i>	Messblende (McCrometer; Typ V-Cone) <i>Orifice flow meter (McCrometer; Typ V-Cone)</i>	[m <sup>3</sup> /h]
Biogastemperatur <i>Biogas temperature</i>	Thermoelement Typ K (Testo 350 XL) <i>Thermal element type K (Testo 350 XL)</i>	[°C]
Biogasdruck <i>Biogas pressure</i>	Absolutdrucktransmitter <i>Pressure transmitter</i>	[mbar]
Wärmestrom <i>Heat flow</i>	Rechnerisch über die Abgaszusammensetzung und Abgastemperatur <i>Calculated on the basis of the exhaust gas composition and gas temperature</i>	[kW]
Elektrische Leistung <i>Electric power</i>	Zangenampermeter (Voltcraft, Typ AC-200) <i>Clamp-on ammeter (Voltcraft, Typ AC-200)</i>	[kW]
Abgaszusammensetzung <i>Exhaust gas composition</i>	Testo 350 XL <i>Testo 350 XL</i>	[%], [ppm]
Abgastemperatur <i>Exhaust gas temperature</i>	Testo 350 XL <i>Testo 350 XL</i>	[°C]



Mikrogasturbine Capstone CR 65. Foto: Bekker  
Fig. 1: Mikrogasturbine Capstone CR 65



Elektrischer und thermischer Wirkungsgrad der Mikrogasturbine in Abhängigkeit der Teillaststufe ohne Berücksichtigung des Energieverbrauchs der Gasaufbereitung

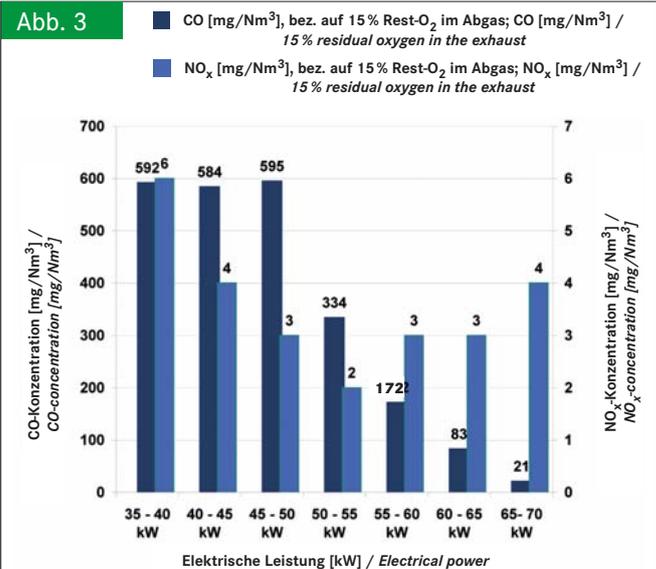
Fig. 2: Electrical and thermal efficiency of the microgas turbine depending on the load level without tacking into account energy consumption of the gas processing

germedium weg. Es waren keine zusätzlichen Verluste durch einen Wärmetauscher zu verzeichnen. Deswegen waren die thermischen Wirkungsgrade bei der direkten Nutzung der Abwärme sehr hoch. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Anlagenmodellen zu erhalten, wurde die Nutzung der thermischen Energie exemplarisch für einen Wärmetauscher mit 70 °C Rücklauftemperatur berechnet. Durch die geringere Temperaturdifferenz zwischen Abgas und sekundärem Wärmeträger verringerte sich die übertragene Wärmemenge und der thermische Wirkungsgrad sank auf Werte zwischen 50 und 55 %.

Im Vergleich zu den konventionellen Blockheizkraftwerken (BHKW) waren die gemessenen Abgasgaskonzentrationen sehr niedrig. Einen Überblick über die gemessenen CO- und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen in den untersuchten Leistungsstufen gibt **Abbildung 3**. Eine ausführliche Darstellung der gemessenen Abgaskonzentrationen während der Untersuchung wurde im Abschlussbericht zum BWPLUS-Forschungsprojekt veröffentlicht [1].

Insgesamt lag die NO<sub>x</sub>-Konzentration sowohl im Teillast- als auch im Volllastbetrieb bei einem niedrigen Wert unter 6 mg/Nm<sup>3</sup>. Die CO-Konzentration verringerte sich mit der Erhöhung des produzierten elektrischen Stroms und erreichte beim Volllastbetrieb einen sehr niedrigen Wert von 21 mg/Nm<sup>3</sup>. Im niedrigen Teillastbereich zwischen 35 und 50 kW elektrischer Leistung wurden wesentlich höhere Werte an Kohlenmonoxid in Höhe von 334 bis 592 mg/Nm<sup>3</sup> gemessen.

Die SO<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas lag relativ hoch bei etwa 50-130 mg/Nm<sup>3</sup>. Dies ist auf höhere H<sub>2</sub>S-Gehalte im Biogas zurückzuführen, da in der Biogasanlage größere Mengen schwefelhaltiger Substrate wie beispielsweise Salatreste vergoren wurden. Die erhöhten SO<sub>2</sub>-Werte beeinflussten die Turbinenleistung nicht negativ. Ein wichtiger Vorteil bei dem Betrieb der Mikrogasturbine ist es, dass sie aufgrund des fehlenden Schmieröls unempfindlich gegen hohe Schwefelwasserstoffge-



CO- und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen im Abgas der untersuchten Teillaststufen

Fig. 3: CO- and NO<sub>x</sub>-Concentrations in the exhaust gas of the investigated load levels

halte im Brenngas ist. Bei herkömmlichen Gas-Otto-BHKW soll das Motorenöl in der Regel alle 600 Stunden gewechselt werden. Da Mikrogasturbinen im Gegensatz zu konventionellen Verbrennungsmotoren keinen Kühlkreislauf haben, wird die produzierte Wärmemenge komplett über das Abgas der Turbine abgeleitet. Dadurch entstehen hohe Abgastemperaturen. So hatte das Abgas im Versuch ein Temperaturniveau von 238-293 °C. Mit dem schadstoffarmen und heißen Abgas können unter anderem Hochtemperaturprozesse betrieben werden.

### Schlussfolgerungen

Die vorliegende Untersuchung hat die Praxistauglichkeit der Mikrogasturbine Capstone CR 65 beim Einsatz von Biogas erwiesen. Es ist wichtig, den Energiebedarf der Biogasaufbereitung, wie z. B. für die Gaskomprimierung und -entwässerung, bei der Ausarbeitung des kompletten Anlagenkonzeptes zu berücksichtigen und gegebenenfalls zu optimieren. Da inzwischen eine Mikrogasturbine mit einer Leistung von 200 kW am Markt verfügbar ist, die laut Herstellerangaben zudem über einen höheren elektrischen Wirkungsgrad verfügt, bieten sich zukünftig völlig neue Perspektiven für den Einsatz von Mikrogasturbinen in Biogasanlagen.

### Literatur

- [1] Thomas, B.; A. Wyndorps, M. Bekker, H. Oechsner und T. Kelm: Gekoppelte Produktion von Kraft und Wärme aus Bio-, Klär- und Deponiegas in kleinen, dezentralen Stirling-Motor-Blockheizkraftwerken. Abschlussbericht zum BWPLUS-Forschungsprojekt, Förderkennzeichen BWK 25008-25010, 2009

### Autoren

**Dr. Marina Bekker** ist angestellt beim Clean Energy Department der MVV decon GmbH, Augustaanlage 62-64, 68165 Mannheim, E-Mail: m.bekker@mvv-decon.com

**Dr. Hans Oechsner** ist Leiter der Landesanstalt für Landtechnik und Bioenergie, Universität Hohenheim (740), Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart, E-Mail: oechsner@uni-hohenheim.de