

Effiziente Verwertung von Bio- und Deponiegasen in Mikrogasturbinen

Dr.-Ing. habil. Ahmad Al-Halbouni; Dr.-Ing. Anne Giese;
Dipl.-Ing. Hendrik Rahms, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner

Veröffentlichung in
GASWÄRME International
Heft 1-2/2008

Am Gaswärme-Institut e. V. Essen (GWI) werden seit mehreren Jahren intensive Forschungsaktivitäten durchgeführt, um Bio- und Deponiegase energetisch sinnvoll zu verwerten. Hierfür hat das GWI in einem bereits abgeschlossenen AiF-Forschungsvorhaben die Feuerungskonzepte der flammenlosen Oxidation (FLOX®) und der kontinuierlichen Luftstufung (COSTAIR) für den Einsatz unter Mikrogasturbinenbedingungen mit unterschiedlichen Gasqualitäten weiterentwickelt. Die Betriebseignung dieser Brennersysteme wurde anhand der Gasgemische CH_4/N_2 , CH_4/CO_2 , $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{CO}/\text{H}_2$ mit einem Methananteil unter 30 Vol.-% bzw. einem Heizwert (Hu) unter $3 \text{ kWh}/\text{Nm}_3$ überprüft. Die experimentellen Untersuchungen wurden unter atmosphärischen und Druckbedingungen durchgeführt. Die Luftzahl variierte von 1,1 bis 8,5 und die Luft- und Gastemperaturen zwischen 20 bzw. 550 °C . Die Messwerte der NO_x - und CO-Emissionen lagen unter 10 ppm. Die Verbrennung war stabil und nahezu pulsationsfrei bis zu einem CH_4 -Anteil von 15 Vol.-% im Gasgemisch bzw. einem Heizwert von ca. $1,1 \text{ kWh}/\text{Nm}_3$.

Copyright

Dieser Beitrag ist geistiges Eigentum der Autoren und des Gaswärme-Instituts.

Er darf nur in der umseitigen Form zitiert werden.

Die Verwendung von Bildern, Tabellen und Ergebnissen bedarf der Zustimmung der Autoren oder des Instituts.

Gaswärme-Institut e. V. Essen (GWI)

Hafenstraße 101

45356 Essen

Tel.: +49 (0)201 3618-0

Fax: +49 (0)201 3618-238

www.gwi-essen.de

Wissenschaftlicher Vorstand: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner

Kaufmännischer Vorstand: Dipl.-Betriebswirt Michael Radzuweit

Effiziente Verwertung von Bio- und Deponiegasen in Mikrogasturbinen

Efficient use of bio- and landfill gases in microgasturbines

Von Ahmad Al-Halbouni, Anne Giese, Hendrik Rahms, Klaus Görner

Am Gaswärme-Institut e. V. Essen (GWI) werden seit mehreren Jahren intensive Forschungsaktivitäten durchgeführt, um Bio- und Deponiegase energetisch sinnvoll zu verwerten. Hierfür hat das GWI in einem bereits abgeschlossenen AiF-Forschungsvorhaben die Feuerungskonzepte der flammenlosen Oxidation (FLOX®) und der kontinuierlichen Luftstufung (COSTAIR) für den Einsatz unter Mikrogasturbinenbedingungen mit unterschiedlichen Gasqualitäten weiterentwickelt. Die Betriebseignung dieser Brennersysteme wurde anhand der Gasgemische CH_4/N_2 , CH_4/CO_2 , $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{CO}/\text{H}_2$ mit einem Methananteil unter 30 Vol.-% bzw. einem Heizwert (Hu) unter $3 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ überprüft. Die experimentellen Untersuchungen wurden unter atmosphärischen und Druckbedingungen durchgeführt. Die Luftzahl variierte von 1,1 bis 8,5 und die Luft- und Gastemperaturen zwischen 20 bzw. 550°C . Die Messwerte der NO_x - und CO-Emissionen lagen unter 10 ppm. Die Verbrennung war stabil und nahezu pulsationsfrei bis zu einem CH_4 -Anteil von 15 Vol.-% im Gasgemisch bzw. einem Heizwert von ca. $1,1 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$.

Extensive research activities into the rational energy-valorization of bio- and landfill gases have been under way for a number of years now at the Gaswärme-Institut e.V. Essen (GWI). In an already completed AiF research project, GWI further developed and refined the combustion concepts of flameless oxidation (FLOX®) and of continuous air-staging (COSTAIR) for use under conditions and with various gas qualities. The suitability for use of these burner systems has been verified using CH_4/N_2 , CH_4/CO_2 , $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{CO}/\text{H}_2$ gas mixtures with a methane content of below 30 vol.% and with a lower heating value (Hi) of less than $3 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$, respectively. The experimental investigations have been performed under atmospheric and pressurized conditions. Airtofuel ratio was varied from 1.1 to 8.5, and air and gas temperatures between 20 and 550°C . The NO_x and CO emission data measured were less than 10 ppm. Combustion remains stable and practically pulsation free up to a CH_4 content of 15 vol.% in the gas mixture and/or a heating value of around $1.1 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

In Deutschland und den benachbarten europäischen Ländern gibt es große Vorkommen an schwachkalorischen Gasen, wie Bio-, Klär-, Gruben-, Holz-, Produkt- und Deponiegas. Eine nutzbringende Verwendung dieser bisher zum größten Teil ungenutzten Energiequelle schont die Brennstoffressourcen und die Umwelt. Hierfür existiert keine effiziente, stabile und schadstoffarme Feuerungstechnologie. Nach [1 bis 3] stellt die Stabilität der Verbrennung das wichtigste Problem bei der Verbrennung solcher Schwachgase dar. Grund hierfür ist

u. a. die Brenngasverdünnung und der vergleichsweise niedrige Heizwert (3–20-mal kleiner als Erdgas). Die Obergrenze für NO_x - und CO-Emissionen in Turbinenabgasen bei der Verbrennung von regenerativen Gasen ist in der novellierten TA-Luft vom 1.1.2002 festgelegt. Dies sind für CO $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ und für NO_x $150 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ bei 15 Vol.-% O_2 im trockenen Abgas.

In dem bereits abgeschlossenen AiF-Gemeinschaftsprojektes [4] entwickelten das Gaswärme-Institut e. V. Essen (GWI)

und der Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik der Ruhr-Universität Bochum (LEAT) die Feuerungskonzepte der flammenlosen Oxidation (FLOX®) und der kontinuierlichen Luftstufung (COSTAIR) für die Verwertung von schwachkalorischen Gasen mit einem Heizwert unter $3 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ in Mikrogasturbinen. Beide Brennersysteme wurden erfolgreich unter Druckbedingungen getestet. Im Rahmen des laufenden AiF-Nachfolgevorhabens [AiF-Nr.14472N] führen zurzeit fünf Forschungseinrichtungen Untersuchungen durch, um die Funktionstüchtigkeit der bereits entwickelten Feuerungssysteme unter realen Mikrogasturbinenbedingungen nachzuweisen und deren ökonomische und ökologische Vorteile darzustellen. Die Brennkammer der Turbec-Mikrogasturbine T100 stand für die atmosphärischen Tests zur Verfügung. Nach Anpassung und Optimierung der Brenner für diese Brennkammer sollen sie an der MGT T100 beim Projektpartner Fraunhofer-Institut UMSICHT adaptiert und unter realen Betriebsbedingungen getestet und validiert werden.

Einsatz von Bio- und Deponiegasen in Mikrogasturbinen

In Deutschland haben sich inzwischen erdgasbetriebene Mikrogasturbinen für die KWK-Anwendung im Leistungsbebereich 28 bis 200 kW etabliert; die Erste davon ist vom Typ T100 der Firma Turbec AB und wurde im April 2001 von der Thyssengas GmbH in Duisburg in Betrieb genommen [5]. **Bild 1** zeigt eine schematische Darstellung dieser Turbine.

Obwohl bis Ende 2001 ca. 180 erdgasbefeuerte Mikrogasturbinenanlagen in Europa installiert waren, war der Einsatz von schwachkalorischen Gasen noch die Ausnahme. Erste Anlagen zur Bio- und Deponiegasnutzung wurden 2001 und

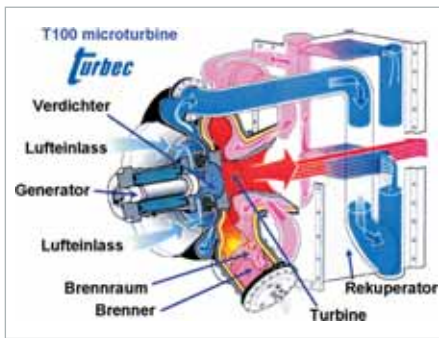


Bild 1: Erste KWK-Mikrogasturbine in Deutschland T100 der Firma Turbec

Fig. 1: Turbec's T100, the first cogeneration plant micro-gas-turbine in Germany

2002 erfolgreich realisiert. Die Firma Pro2 hat im Rahmen ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten eine Mikrogasturbine für den Grubengaseinsatz, eine für den Deponiegaseinsatz und eine für den Biogaseinsatz vorbereitet. Die erste mit Biogas betriebene Mikrogasturbine wurde von Pro2 im Vogtland im Jahr 2002 in Betrieb genommen [6]. Im März 2004 hat Pro2 die Demonstrationsanlagen dieser Arbeiten im Rahmen einer Veranstaltung der „Landesinitiative Zukunftsenergien NRW“ vorgestellt [7]. Eine Mikrogasturbine in Containerbauweise wurde im November 2003 am Standort Dorsten-Lembeck in eine bestehende Anlage (95 kW elektrisch und 141 kW thermisch) integriert. Allerdings soll hier bemerkt werden, dass das dort eingesetzte Biogas einen deutlich höheren CH_4 -Gehalt (> 40 Vol.-%) hat.

Ausführlich über den Einsatz der Mikrogasturbine für verschiedene gasförmige und flüssige Brennstoffe wird vom Institut NOWUM-Energy der Fachhochschule Aachen in [8] berichtet. Dabei werden drei Turbinentypen für den Vergleich herangezogen (Capstone, Bowman und Turbec).

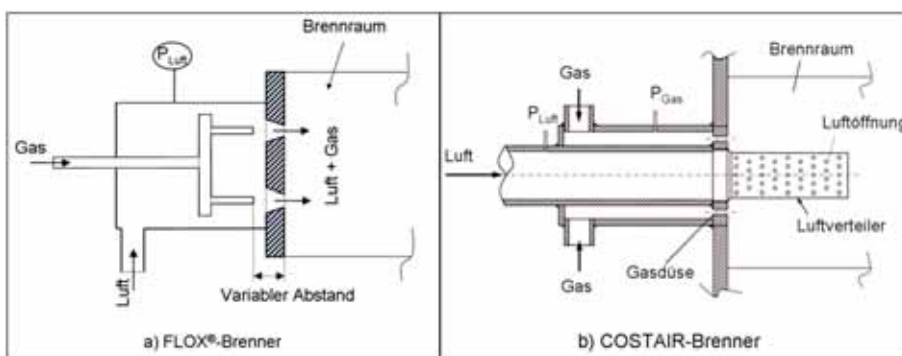


Bild 2: Schematische Darstellung der Brennerkonzepte

Fig. 2: Schematic view of the burner concepts

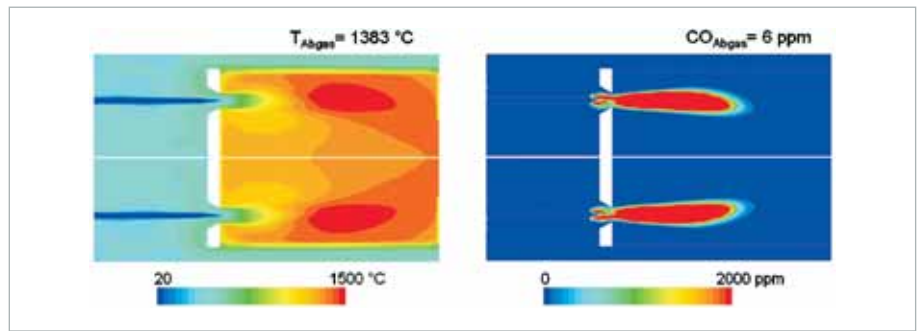


Bild 3: Berechnete Temperatur- und CO-Verteilung des FLOX®-Brenners

Fig. 3: Calculated temperature and CO distribution for the FLOX® burner

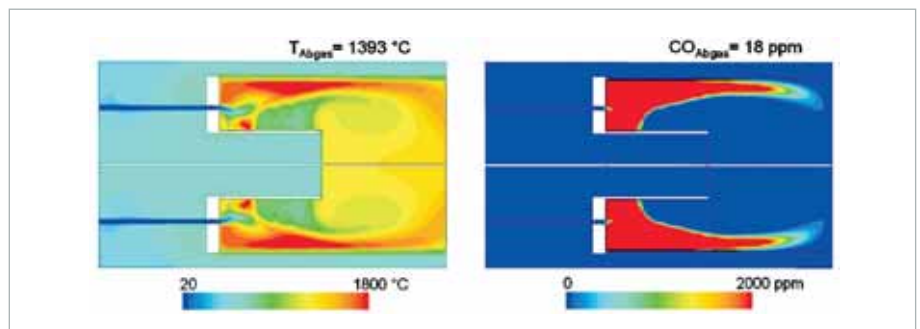


Bild 4: Berechnete Temperatur- und CO-Verteilung des COSTAIR-Brenners

Fig. 4: Calculated temperature and CO distribution for the COSTAIR burner

Brennerauslegung für die Mikrogasturbine T100

Die für Erdgas optimierten und erprobten Verbrennungstechniken FLOX® und COSTAIR wurden für den Einsatz mit Schwachgasen weiterentwickelt. Im ersten Schritt wurden die für die Brennerskalierung bekannten scale-up-Kriterien der konstanten Eintrittsgeschwindigkeiten und der konstanten Eintrittsimpulsstromverhältnisse [9 und 10] eingesetzt. Dadurch konnten zunächst die wichtigsten Brennerdimensionen, wie Luft- und Gasdüsen, Lochkreisdurchmesser, Luftverteilergeometrie etc. ermittelt werden. Im darauf folgenden Schritt wurden die

Brennerkonfigurationen mittels CFD-Simulationen im Hinblick auf minimale NO_x - und CO-Emissionen optimiert [11].

Die aufgestellten Brennerkonzepte sind im **Bild 2** schematisch dargestellt.

Die Betriebsparameter der numerischen Simulationen wurden für die Brenner-Basisvarianten wie folgt festgelegt: $Q_{\text{Brenner}} = 78 \text{ kW/bar}$ ($\approx 350 \text{ kW}_{\text{th}}$ unter Druckbedingungen der T100), Luftzahl $\lambda = 2$, Lufttemperatur $T_{\text{Luft}} = 550 \text{ °C}$, atmosphärischer Druck $p = 1 \text{ bar}$. Für die Wände wurde Wärmeleitung und -übergang definiert. Das Gasgemisch bestand aus den Komponenten $\text{CH}_4 = 15\text{--}40 \text{ Vol.-%}$, $\text{N}_2 = 85\text{--}60 \text{ Vol.-%}$. Da die Brennkammer der MGT T100 sehr kompakt ist, wurden die Brenner zunächst auf ihr Ausbrandverhalten hin ohne Sekundärluftzugabe untersucht und optimiert. Wie die Ergebnisse in den **Bildern 3** und **4** zeigen, liefern beide Brenner ausgeglichene Temperaturprofile mit einem nahezu vollständigen Ausbrand am Brennkammeraustritt.

In der darauf folgenden Optimierungsstufe wurde die Sekundärluftzugabe mitbetrachtet. Dadurch erhöhte sich die gesamte Luftzahl auf $\lambda = 6,5$. **Bild 5** veranschaulicht den Einfluss der Sekundärluftzugabe hinsichtlich Lage und Größe des Rezirkulationsgebietes. Während die

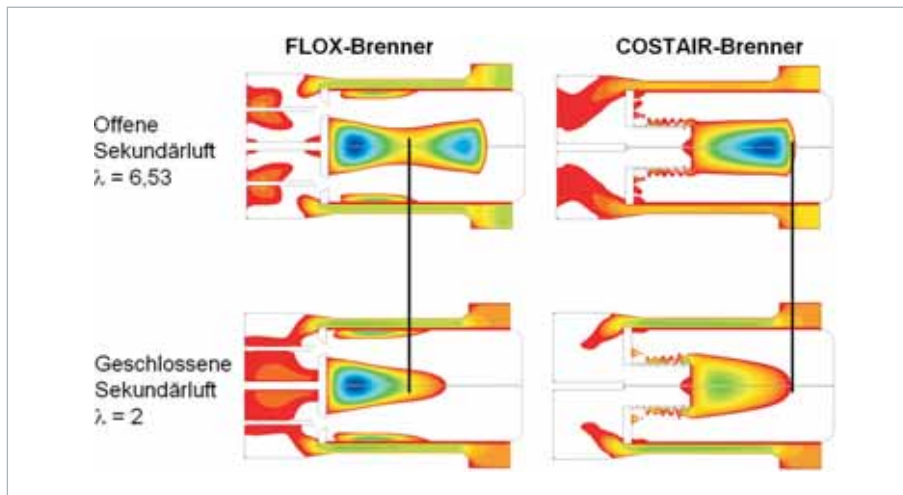


Bild 5: Berechnete Rückstromzone für FLOX® und COSTAIR ohne und mit Sekundärluft
Fig. 5: Calculated backflow zone for FLOX® and COSTAIR with and without secondary air

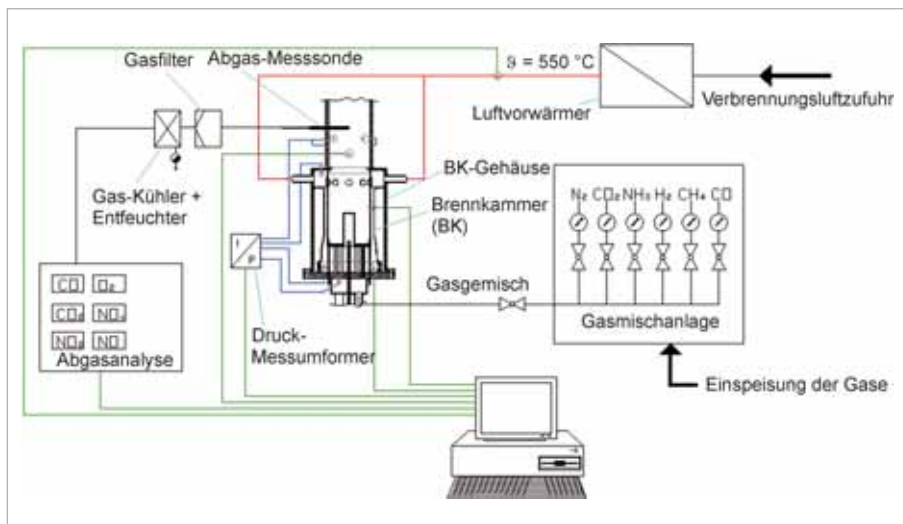


Bild 6: Schematische Darstellung des GWI-Versuchsstandes
Fig. 6: Schematic view of the GWI test facility

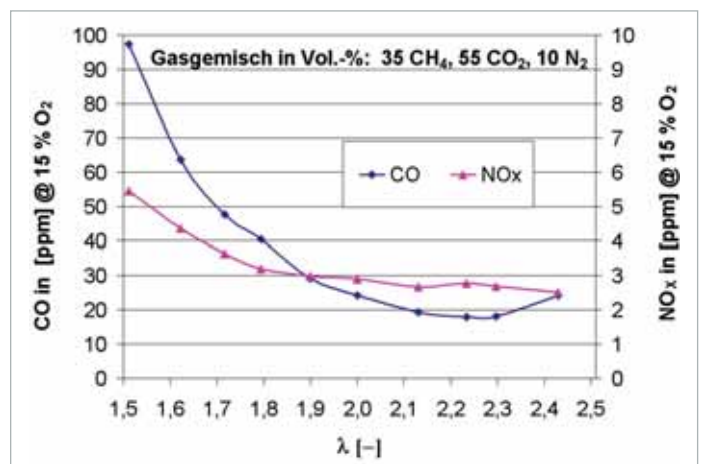
Sekundärluft beim FLOX®-Brenner fast eine Verdopplung der Länge der Rezirkulationszone hervorruft, bleibt die Größe dieser Zone beim COSTAIR-Brenner nahezu unverändert, lediglich die Rückströmgeschwindigkeit wird intensiver. Da die Abgasrezirkulation für beide Feuerungssysteme eine entscheidende Rolle für die Verbrennungsstabilität und das Schadstoffverhalten spielt, wird erwartet, dass die eingetretene Veränderung der Rückströmzone beim FLOX®-Brenner deutliche Einflüsse auf den Brennerbetrieb ausübt.

Ergebnisse der atmosphärischen Untersuchungen

Die ermittelten optimalen Konfigurationen des FLOX® und COSTAIR-Brenners für den Betrieb mit Bio- und Deponiegas

wurden am GWI gebaut und durch intensive experimentelle Untersuchungen modifiziert. Für die Tests wurden Gasgemische in Anlehnung an die realen Bio- und Deponiegase hergestellt. Die Haupt-

Bild 7: NO_x- und CO-Emissionsmesswerte des FLOX®-Brenners ohne Sekundärluft
Fig. 7: Measured NO_x and CO emission data for the FLOX® burner without secondary air



bestandteile dabei waren CH₄ und N₂ bzw. CH₄ und CO₂. Diese Gasgemische wurden mit einer Gasmischanlage durch die Mischung der Einzelkomponenten bereitgestellt. Der CH₄-Anteil variierte bei allen Gemischen zwischen 10 und 40 %. Die Heizwerte lagen je nach Gemischzusammensetzung zwischen 1 und 3,5 kWh/Nm³. Die Verbrennungsluft wurde mittels eines elektrischen Luftvorwärmers vor dem Eintritt in die Brenner auf MGT-Betriebstemperatur gebracht. Für die Experimente wurde der im **Bild 6** dargestellte GWI-Versuchsstand realisiert. Die Tests fanden an einer realen Brennkammer der Turbec-MGT T100 unter atmosphärischem Druck statt. Dabei wurden folgende Betriebsparameter eingestellt: T_{Luft} = 500–600 °C, T_{Gas} = 20 °C, λ_{Brenner} = 1,5 bis 3,6 ohne Sekundärluft bzw. 3,5 bis 8 mit Sekundärluft, Q_{Brenner} = 80 kW/bar (Spez. Brennraumbelastung ≈ 20 MW/(m³bar). Die Brennkammerwandtemperatur wurde auf 800–900 °C gehalten.

Die ersten experimentellen Tests mit den anhand der numerischen Simulation optimierten Brennerdesigns wurden ohne Sekundärluftzugabe durchgeführt. Beide Brenner funktionierten einwandfrei. Die Verbrennung war stabil und nahezu pulsationsfrei. Die gemessenen NO_x- und CO-Emissionswerte lagen zum Teil deutlich unter 10 ppm (bei 15 Vol.-% O₂ im trockenen Abgas), wie **Bild 7** exemplarisch für den FLOX®-Brenner mit dem Gasgemisch CH₄ = 35 Vol.-%, CO₂ = 55 Vol.-% und N₂ = 10 Vol.-% verdeutlicht.

Die weiteren Tests wurden bei geöffneten Sekundärluftdüsen wie beim realen Betrieb der MGT durchgeführt. Dadurch erhöhte sich die Luftzahl deutlich und erreichte Werte zwischen 3,5 bis 8,5. Der COSTAIR-Brenner funktionierte problemlos, die Verbrennung war bei allen Gas-

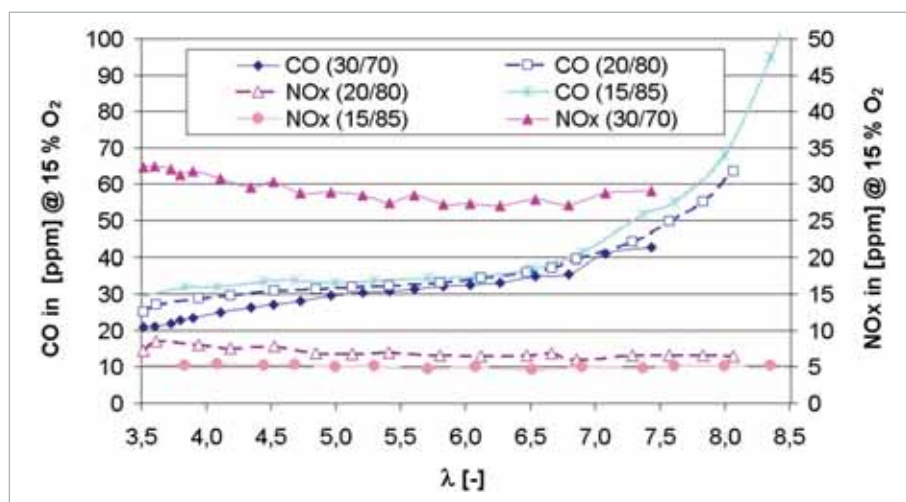


Bild 8: NO_x- und CO-Emissionsmesswerte des COSTAIR-Brenners mit Sekundärluft

Fig. 8: Measured NO_x and CO emission data for the COSTAIR burner with secondary air

gemischen stabil. Die NO_x-Emissionswerte lagen für Gasgemische mit einem CH₄-Anteil unter 20 Vol.-% bis unter 10 ppm, wie die Messwerte in **Bild 8** belegen. Weitere Ergebnisse der Tests sind in [12] enthalten. Wie anhand der numerischen Simulationen nachgewiesen wurde, führt die Zugabe von Sekundärluft beim FLOX®-Brenner an der Turbec-MGT-Brennkammer zu Problemen mit der Verbrennungsstabilität. Hier sind weiterführende Untersuchungen zur Anpassung des Brenners notwendig.

Fazit

Das angepasste Brennerkonzept COSTAIR führt unter Betriebsbedingungen von Mikro-Gasturbinen bei der Untersuchung unter atmosphärischem Druck zu folgenden Eigenschaften:

- sichere Zündung und stabile Verbrennung von Bio- und Deponiegasen unterschiedlichster Gasqualitäten über einen weiten Luftzahlbereich,
- weitgehende Unterdrückung der Schadstoffemissionen, insbesondere im Teillastbetrieb der Mikro-Gasturbine,
- Verbesserung der Betriebssicherheit, insbesondere durch Vermeidung von akustischen Pulsationen und Flammrückschlägen.

Weiteres Vorgehen

Der COSTAIR-Brenner wird in der nächsten Testphase an die Brennkammer der Turbec-MGT T100 beim Projektpartner Fraunhofer-Institut UMSICHT in Oberhausen adaptiert und unter realen Betriebsbedingungen getestet. Die Ergeb-

nisse sollen der Aufstellung einer feuerungstechnischen und betriebswirtschaftlichen Bewertung dienen.

Im Rahmen eines AiF-Nachfolgevorhabens werden beide Brennersysteme zurzeit weiter untersucht, um deren Funktionstüchtigkeit und Vorteile unter realen Einsatzbedingungen der Turbec-Mikrogasturbine T100 nachzuweisen.

Danksagung

Die vorgestellten Forschungsergebnisse wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen – AiF – gefördert (Fördernummer: 13216N und 14472N). Dafür danken die Autoren.

Literatur

- [1] Dobski, T.; Kruszewski, W.; Szewczyk, D. and Świdorska, A.: Combustion of Low Caloric Natural Gases at Industrial Boilers, 6th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers. Estoril-Lisbon-Portugal 02–05 April 2002
- [2] Klingemann, J; Moricet, M.: Einsatz von niederkalorischen Brenngasen in GUD-Kraftwerken. BWK Bd. 49 (1997), Nr. 3 – März
- [3] Lepers, J.: Numerische Untersuchungen des Betriebsverhaltens und der Schadstoffemissionen von Gasturbinen bei Feuerung niederkalorischer Gase. Diss. RWTH Aachen 2002
- [4] Al-Halbouni, A.; Giese, A.; Scherer, V.; Rosendahl, B.; Leicher, J.: Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben: Neue Brennersysteme zur dezentralen Nutzung von schwachkalorigen Gasen in Mikro-Gasturbinen, AiF-Fördernummer: 13216N, Gaswärme-Institut e.V. Essen, 2004
- [5] Dietze, U.: Erste Betriebserfahrungen mit der Mikrogasturbine T100 in Deutschland. Gaswärme International (51) Nr. 1/2002, S. 23–26

[6] Waerdt, S.; Willenbrink, B.: Neue Wege und Varianten bei der Nutzung regenerativer Gase. VDI-Berichte Nr. 1746, 2003. S. 559–573

[7] Waerdt, S.: Vorstellung Mikro-Gasturbine für Biogas. Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, Arbeitsgruppe Biomasse, 10. März 2004, Biogasanlage Loick, Dorsten. <http://www.pro2.de/pro2/de/Download/Deutsch/LandesniMGT.pdf>

[8] Dielmann, K.; Bernhard, P.: Micro Turbine Using Different Gases and Liquid Fuels. Tarragona, Micro Turbine Workshop, 21st Oct. 2002

[9] Giese, R.: Weiterentwicklung und scale-up eines luftgestuften Gasbrenners. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; Der Andere Verlag 2003

[10] Renner, D.: Ein Beitrag zum Scale-Up kohlenstaubgefeuerter Stufenmischbrenner, Fortschritt-Berichte Nr. 302, Reihe 6, Energietechnik, VDI Verlag Düsseldorf 1998

[11] Al-Halbouni, A.; Giese, A.; Flamme, M.; Görner, K.: Applied Modelling for Bio- and Lean Gas Fired Micro Gas Turbines. Progress in Computational Fluid Dynamics, Vol. 6. Nov. 4/5, p 235–240, 2006

[12] Al-Halbouni, A.; Giese, A.; Rahms, H.; Görner, K.; Schmitz, I.; Scherer, V.; Schulzke, T.: Entwicklung flexibler Feuerungssysteme zur Verbrennung von Schwachgasen in Mikrogasturbinen-Brennkammern. VDI Berichte 1988, S. 237–244, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2007

Dr.-Ing. habil. Ahmad Al-Halbouni
Gaswärme Institut e. V., Essen

Tel. 02 01/36 18-239
E-Mail: al-halbouni@gwi-essen.de



Dr.-Ing. Anne Giese
Gaswärme Institut e. V., Essen

Tel. 02 01/36 18-257
E-Mail: a.giese@gwi-essen.de



Dipl.-Ing. Hendrik Rahms, M. Sc.
Gaswärme Institut e. V., Essen

Tel. 02 01/36 18-258
E-Mail: rahms@gwi-essen.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner
Gaswärme Institut e. V., Essen

Tel. 02 01/36 18-101
E-Mail: klaus.goerner@gwi-essen.de

