

Entwicklung flexibler Feuerungs- systeme zur Verbrennung von Schwachgasen in Mikrogasturbinen-Brennkammern

Dr.-Ing. habil. A. Al-Halbouni
Dr.-Ing. A. Giese
Dipl.-Ing. H. Rahms
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner
Dipl.-Ing. I. Schmitz*
Prof. Dr.-Ing. V. Scherer*
Dipl.-Ing. T. Schulzke**

* Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik,
Ruhr-Universität Bochum

** Fraunhofer-Institut UMSICHT, Oberhausen

23. Deutscher Flammentag

12./13.09.2007

Berlin

VDI-Berichte Nr. 1988, 2007

S. 237-244

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 3618-102

www.gwi-essen.de

Geschäftsführender Vorstand: Dr.-Ing. Heiner Hüppelshäuser

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

Kaufmännischer Vorstand: Dipl.-Betriebswirt Michael Radzuweit

Entwicklung flexibler Feuerungssysteme zur Verbrennung von Schwachgasen in Mikrogasturbinen-Brennkammern

Dr.-Ing. habil. **A. Al-Halbouni**, Dr.-Ing. **A. Giese**, Dipl.-Ing. **H. Rahms**, M.Sc. Prof. Dr.-Ing. habil. **K. Görner**, Gaswärme-Institut e. V. Essen; Dipl.-Ing. **I. Schmitz**, Prof. Dr.-Ing. **V. Scherer**, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik; Dipl.-Ing. **T. Schulzke**, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen

Kurzfassung

In einem bereits abgeschlossenen AiF-Forschungsvorhaben wurden die Feuerungskonzepte der flammenlosen Oxidation (FLOX[®]) und kontinuierlichen Luftstufung (COSTAIR) für die effektive Verwertung schwachkaloriger Gase in Mikrogasturbinen unter Laborbedingungen entwickelt. Im Rahmen eines AiF-Nachfolgevorhabens werden beide Brennersysteme zurzeit weiter untersucht, um deren Funktionstüchtigkeit und Vorteile unter realen Einsatzbedingungen der Turbec-Mikrogasturbine T100 nachzuweisen. Durch Anwendung von scale-up-Kriterien konnten zunächst die passenden Brennerkonfiguration für die Brennkammer der T100 bei einer thermischen Leistung von 78 kW/bar ermittelt und anschließend mittels numerischer Simulationen das Verbrennungs- und Schadstoffverhalten bei Schwachgasbetrieb überprüft und optimiert werden. Die Brennerkonfigurationen mit den niedrigsten NO_x- und CO-Emissionswerten wurden am GWI gebaut und experimentell an der realen Brennkammer der MGT T100 unter atmosphärischen Bedingungen getestet. Als Brennstoff kamen Schwachgasgemische unterschiedlicher Qualitäten zum Einsatz. In diesem Beitrag werden die bisher erreichten Forschungsergebnisse dieses AiF-Gemeinschaftsprojektes und die zukünftigen Aktivitäten vorgestellt.

1. Einführung

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. Das war auch das Ziel des bereits abgeschlossenen AiF-Gemeinschaftsprojektes [1], in dem 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 kontinuierlichen Luftstufung (COSTAIR) für die Verwertung von schwachkalorischen Gasen mit einem Heizwert unter 3 kWh/Nm³ in Mikrogasturbinen entwickelt und unter Druckbedingungen erfolgreich getestet haben. Im Rahmen des AiF-Nachfolgevorhabens

[AiF-Nr.14472N] führen zurzeit fünf Forschungseinrichtungen Untersuchungen durch, um die Funktionstüchtigkeit der bereits entwickelten Feuerungssysteme unter realen Mikrogasturbinenbedingungen nachzuweisen und deren ökonomischen und ökologischen 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 Brennkammer der MGT T100 beim Projektpartner Fraunhofer UMSICHT adaptiert und unter realen Betriebsbedingungen getestet werden. Die Ergebnisse dieser Tests dienen der Aufstellung einer feuerungstechnischen und betriebswirtschaftlichen Bewertung der Brennersysteme für die Verwertung von schwachkalorischen Gasen für die Wärme- und Stromerzeugung mittels Mikrogasturbinen.

2. Vorgehensweise

Für die Erreichung des angestrebten Ziels wurde folgende Vorgehensweise definiert:

- a) Numerische Simulation der Grundauslegung für Brenner und Brennkammer,
- b) Experimentelle Untersuchungen unter atmosphärischem Druck,
- c) Brennerauslegung mittels scale-up-Kriterien und numerischer Simulation,
- d) Experimentelle Optimierung und Modifikation der Brenner für die Turbec-MGT T100,
- e) Validierungstests auf einer Deponie,
- f) Validierungstests an der MGT T100 und
- g) Feuerungstechnische und betriebswirtschaftliche Bewertung und Analyse.

Über die Arbeitsschritte a und b wurde ausführlich in [1 bis 4] berichtet. Nachfolgend werden die bisherigen Ergebnisse der Arbeitsschritte c bis e vorgestellt. Die übrigen Arbeitsschritte befinden sich noch in der Bearbeitung.

3. Brennerauslegung

Die Auslegung der Brennersysteme FLOX[®] und COSTAIR für den Einsatz an der Brennkammer der Mikrogasturbine T100 wurde am Gaswärme-Institut e. V. Essen (GWI) vorgenommen. Anhand der für die Brennerskalierung bekannten scale-up-Kriterien [5 bis 7] der konstanten Eintrittsgeschwindigkeiten und der konstanten Eintrittsimpulsstromverhältnisse wurden zunächst die wichtigsten Brennerdimensionen, wie Luft- und Gasdüsen, Lochkreisdurchmesser, Luftverteilergeometrie etc. für eine thermische Leistung von 78 kW/bar ermittelt ($\approx 350 \text{ kW}_{\text{th}}$ unter Druckbedingungen der T100) ermittelt. Somit stand die Grundauslegung der Brenner für den Betrieb mit Schwachgasen an der Brennkammer der Turbec-Mikrogasturbine T100 zur Verfügung. Danach wurde die gesamte Brennerkonfiguration mittels numerischer Simulationen überprüft und wo nötig optimiert. Die Betriebsparameter der Simulationen wurden für die Brenner-Basisvarianten wie folgt festgelegt: $Q_{\text{Brenner}} = 78 \text{ kW/bar}$, $\lambda = 2$, $T_{\text{Luft}} = 550 \text{ °C}$, $p = 1 \text{ bar}$ (atmosphärisch). Für die

Wände wurde Wärmeleitung und -übergang definiert. Das Schwachgas bestand aus den Komponenten $\text{CH}_4 = 15 - 40 \text{ Vol. -\%}$, $\text{N}_2 = 85 - 60 \text{ Vol. -\%}$. Da die Brennkammer der MGT T100 sehr kompakt ist, wurden die Brenner zunächst auf ihrem Ausbrandverhalten hin ohne Sekundärluftzugabe untersucht und optimiert. Ergebnisse darüber sind in [8] enthalten. In der darauf folgenden Optimierungsstufe wurde die Sekundärluftzugabe hinzugezogen. Dadurch erhöhte sich die gesamte Luftzahl auf $\lambda = 6,5$. Bild 1 veranschaulicht den Einfluss der Sekundärluftzugabe hinsichtlich Lage und Größe des Rezirkulationsgebietes. Während die 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 Verbrennungsstabilität und Schadstoffverhalten spielt, wird erwartet, dass die eingetretene Veränderung der Rückströmzone beim FLOX[®]-Brenner deutliche Einflüsse auf den Brennerbetrieb ausübt.

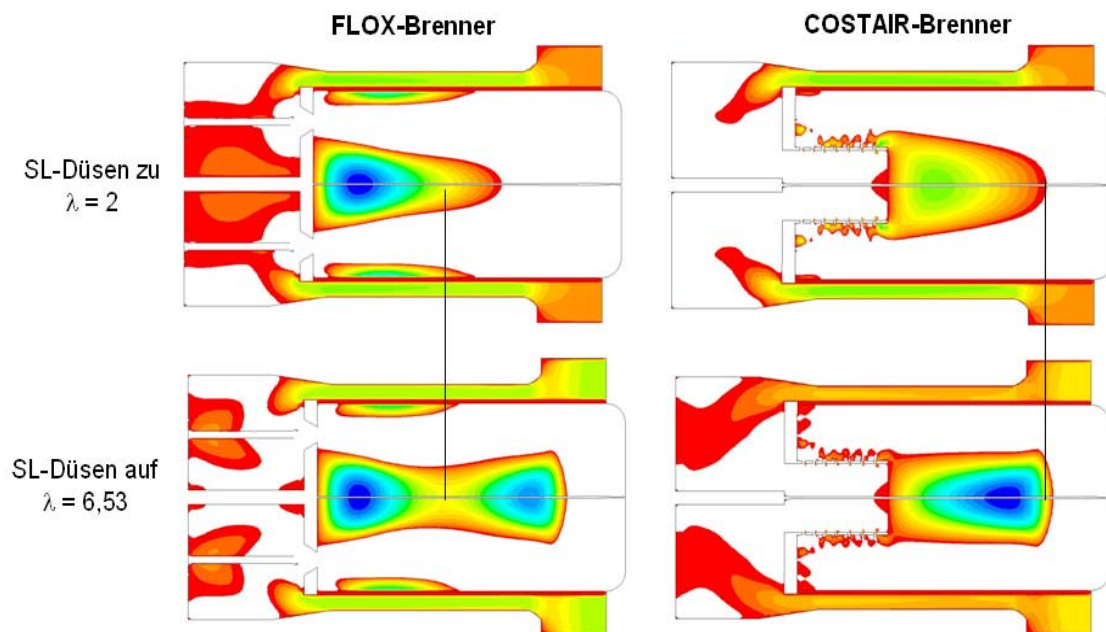


Bild 1: Berechnete Rückstromzone für FLOX und COSTAIR ohne und mit Sekundärluft

4. Experimentelle Untersuchungen

Die durch die numerische Simulation ermittelten besten Konfigurationen für den FLOX[®]- und COSTAIR-Brenner wurden am GWI gebaut und intensiv experimentell getestet. Als Brennstoff wurden Schwachgasgemische bestehend aus den Komponenten CH_4 , CO , H_2 , CO_2 , NH_3 und N_2 eingesetzt. Die Zusammensetzung der einzelnen Gemische entsprach denen der Deponie-, Gruben-, Biomassevergasungs-, Holz- und Klärgase. Die einzelnen Gaskomponenten wurden aus Flaschenbündeln und Tanks entnommen und einer Gasmischanlage zugeführt. Dort wurde jeweils das entsprechende Gasgemisch

zusammengestellt und zum Brenner weitergeleitet. Die Heizwerte lagen je nach Gemischzusammensetzung zwischen 1 und 3,5 kWh/Nm³.

Die Verbrennungsluft wurde vor dem Eintritt in den Brenner auf MGT-Betriebstemperatur mittels eines elektrischen Luftvorwärmers gebracht. Für die Experimente wurde der im Bild 2 dargestellte GWI-Versuchsstand realisiert. Die Tests fanden an einer realen Brennkammer der Turbec-MGT T100 unter atmosphärischem Druck statt. Dabei wurden folgende Betriebsparameter eingestellt: $T_{\text{Luft}} = 500 - 600 \text{ °C}$, $T_{\text{Gas}} = 20 \text{ °C}$, $\lambda_{\text{Brenner}} = 1,5$ bis 3,6 ohne Sekundärluft bzw. 3,5 bis 8 mit Sekundärluft, $Q_{\text{Brenner}} = 80 \text{ kW/bar}$ (Spez. Brennraumbelastung $\approx 20 \text{ MW/(m}^3 \text{ bar)}$). Die Brennkammer-Wandtemperatur wurde auf 800 - 900 °C gehalten.

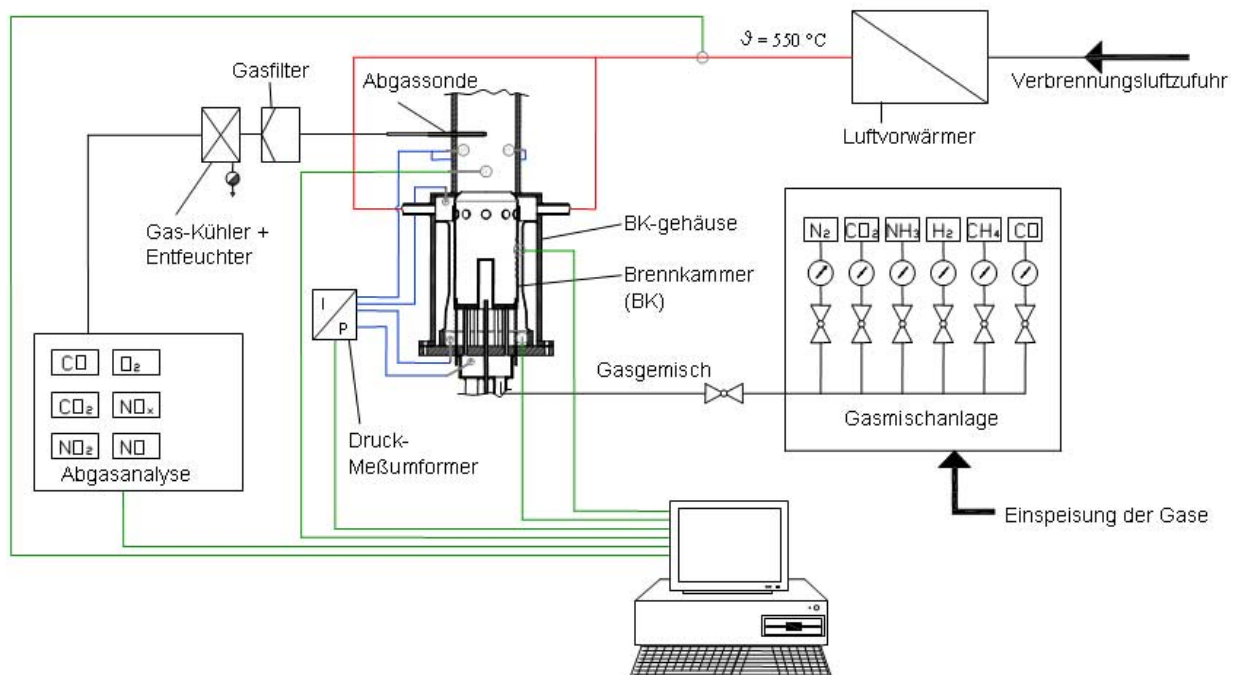


Bild 2: Schematische Darstellung des GWI-Versuchsstandes

Die ersten Tests 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 3 exemplarisch für den FLOX[®]-Brenner 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 Gasgemischen stabil. Die NO_x-Emissionswerte lagen für Gasgemische mit einem CH₄-Anteil unter 20 Vol.-% unter 10 ppm, wie die Messwerte im Bild 4 belegen. Beim FLOX[®]-Brenner bestätigten die Tests, dass eine weitere Anpassung der Brenner-/Brennraumgeometrie an

die veränderten Strömungsverhältnisse der Rückstromzone, wie aus Bild 2 hervorgeht, erforderlich ist, um Zündung und Stabilität zu gewährleisten.

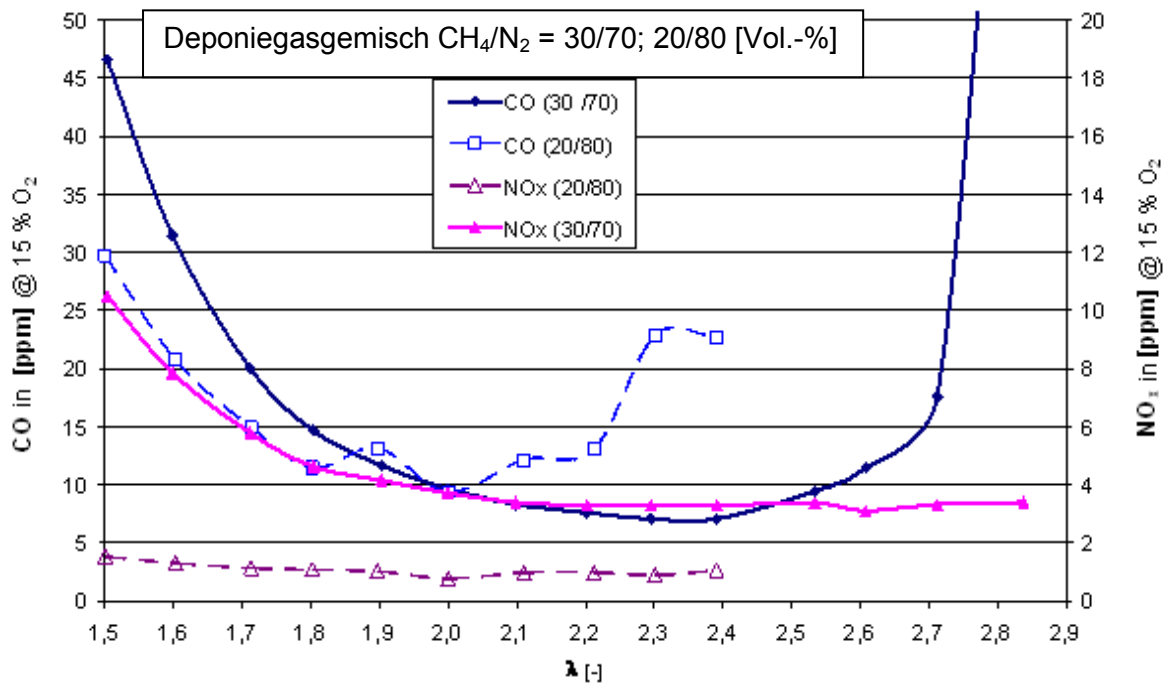


Bild 3: NO_x - und CO-Emissionsmesswerte des FLOX[®]-Brenners für Deponiegas ohne SL

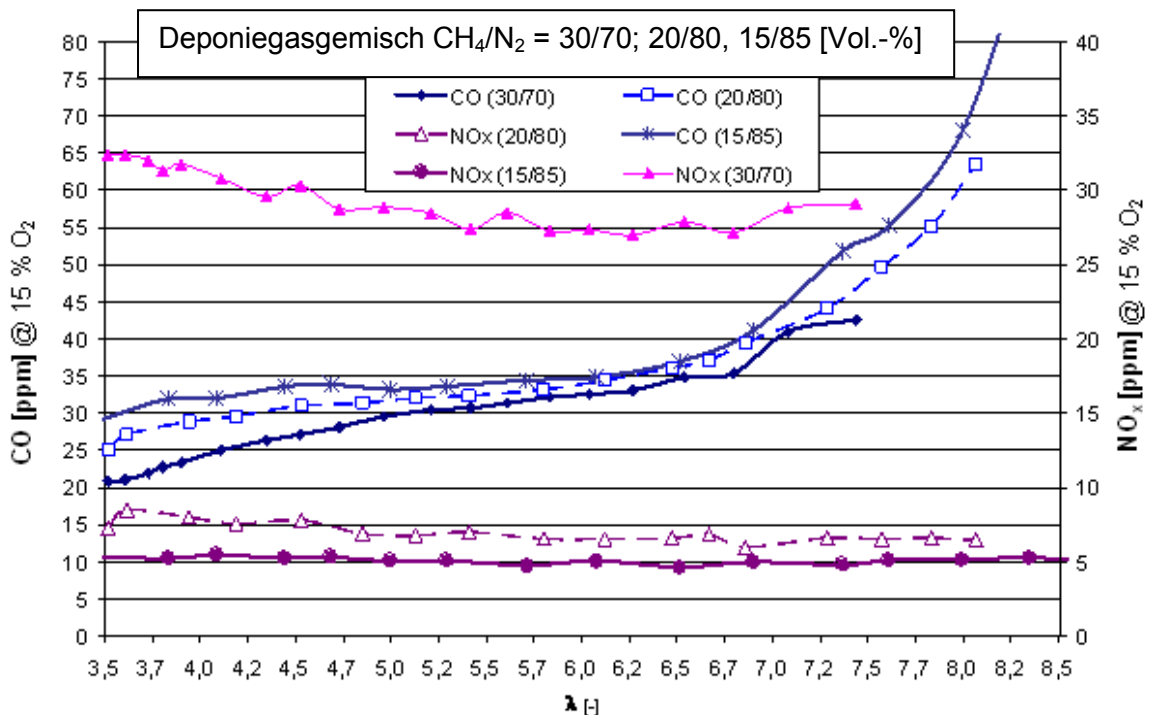


Bild 4: NO_x - und CO-Emissionsmesswerte des COSTAIR-Brenners für Deponiegas mit SL

5. Validierungstests auf einer Deponie

Um einerseits das Verbrennungs- und Schadstoffverhalten der Brenner mit realem Deponiegas zu validieren und andererseits den Einfluss der im Deponiegas enthaltenen

aggressiven Spurenelemente auf das Material von Leitungen, Brenner und Brennkammer zu untersuchen, wurden Dauertests auf der Deponie Dreieich-Buchschlag mit dem COSTAIR-Brenner durchgeführt. Für diesen Zweck wurde der in Bild 5 schematisch dargestellte Versuchsstand am GWI realisiert und auf dem Deponie-Standort aufgestellt. Er besteht aus einem mobilen Container, in dem alle für die Tests erforderlichen Sicherheitseinrichtungen und Messgeräten untergebracht sind.

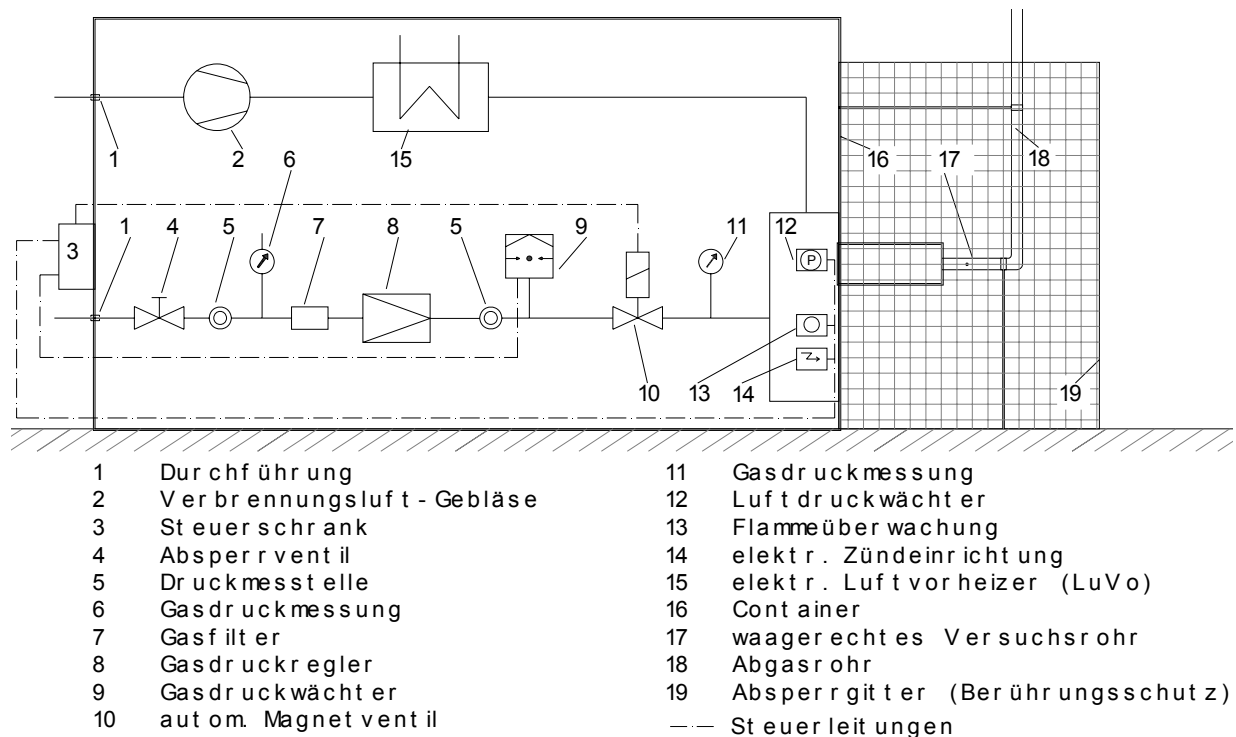


Bild 5: Schematische Darstellung des GWI-Containerversuchsstandes

Das zum Brenner geführte Deponiegas bestand aus folgenden Hauptkomponenten: (Werte gemittelt in [Vol.-%]): $\text{CH}_4 = 30$, $\text{CO}_2 = 25$, $\text{N}_2 = 42$, $\text{Ar} = 0,5$, $\text{O}_2 = 0,4$ und $\text{H}_2\text{S} = 9,3$ [mg/m³] sowie Restanteile an leichtflüchtigen und aromatischen Kohlenwasserstoffen, BTEX und Siliziumverbindungen. Der Heizwert des Gemisches lag bei ca. 3 kWh/Nm³ und der Wassergehalt bei ca. 5,5 g/m³. Die Tests wurden über drei Wochen durchgeführt. Der Brenner lief im Dauerbetrieb und funktionierte problemlos. Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Messprotokoll.

Tabelle 1: Ausschnitt aus dem Messprotokoll auf der Deponie Dreieich-Buchschlag												
Q_{Brenner}	λ	O_2	CO_2	$\text{CO}_{\text{gem.}}$	$\text{CO}_{\text{@15\%O}_2}$	$\text{NO}_{\text{z, gem.}}$	$\text{NO}_{\text{z, @15\%O}_2}$	T_{Abgas}	T_{Luft}	$T_{\text{gas, MK}}$	P_{Luft}	P_{Gas}
kW	-	Vol.-%		ppm				°C			mbar	
21,1	1,6	7,6	9,9	22,0	9,9	33	14,8	710	542	145	ca. 20	ca. 30
24,5	1,4	5,6	11,4	25,0	9,7	40	15,6	741	545	130		
19,6	1,7	8,3	9,5	0,9	1,8	35	16,3	698	545	130		

Die NO_x- und CO-Emissionswerte in dieser Tabelle bestätigen die am GWI mit synthetischen Gasgemischen unter gleichen Betriebsbedingungen gemessenen Werte. Auch der stabile Brennerbetrieb konnte durch die Tests auf der Deponie nachgewiesen werden. Die Wirkung des feuchten Deponiegases und der enthaltenen Begleitstoffe auf die Materialien des Brenners und der Brennkammer und Armaturen befindet sich noch in der Auswertung.

6. Weiteres Vorgehen

Die Brenner werden in der nächsten Testphase an die Brennkammer der Turbec-MGT T100 beim Projektpartner Fraunhofer UMSICHT in Oberhausen adaptiert und unter realen Betriebsbedingungen getestet. Diese Arbeiten werden mit der Firma Turbec abgestimmt. Die Ergebnisse dieser Tests dienen der Aufstellung einer feuerungstechnischen und betriebswirtschaftlichen Bewertung für den Einsatz der untersuchten Brennersysteme an Mikrogasturbinen-Brennkammern zur Verwertung von schwachkalorigen Gasen.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen - AiF unter dem Förderkennzeichen 14472 N gefördert. Dafür danken die Autoren.

Literatur

- [1] 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 (MGT)“, AiF-Fördernummer: 13216N, Gaswärme-Institut e. V. Essen, 2004
- [2] Giese, A.; Al-Halbouni, A.; Flamme, M.: Neue Brennersysteme mit hoher Brennstoffflexibilität für Gasturbinen, 22. Deutscher Flammentag, Braunschweig, 21.-22. September 2005, VDI-Berichte 1888, S. 153-158
- [3] Al-Halbouni, A.; Rahms, H.; Scherello, A.: Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Gaswärme-Institutes zur industriellen Nutzung schwachkalorischer Gase. GWF Gas . Erdgas, 148 (2007), Nr. 1. Seite 2-34
- [4] 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. Nos. 4/5, p 235 - 240, 2006
- [5] Giese, R.: Weiterentwicklung und scale-up eines luftgestuften Gasbrenners. Dissertation, Universität Magdeburg; Der Andere Verlag 2003
- [6] Moog, W.: Ähnlichkeits- und Analogielehre; VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1985

- [7] Renner, D.: Ein Beitrag zum Scale-Up kohlenstaubgefeuerter Stufenmischbrenner, Fortschritt-Berichte Nr. 302, Reihe 6, Energietechnik, VDI Verlag Düsseldorf 1998
- [8] Al-Halbouni; A.; Giese, A. Rahms, H.; Görner, K.: Development of progressive Combustion Systems for Low Calorific Landfill Gas. 2nd BOKU Waste Conference, April 16th-19th, 2007, Vienna, Austria. ISBN: 978-3-7089-0060-5, P. 165-174.
<http://waste-conference.boku.ac.at/start.php?nav=download&lang=en>