

# Neue Brennersysteme für Bio-Raffinerien

## New burner systems for bio-refineries

Das Konzept der Bio-Raffinerie setzt der simplen Holzverbrennung eine integrierte stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse-ressourcen entgegen. Ähnlich wie bei dem Konzept der Verbundstandorte in der Großchemie erfordert dies die effektive Nutzung von Nebenprodukten und Abfällen. Für diese Zwecke entwickeln die Firma WS-Wärmeprozess-technik GmbH und die Universität Stuttgart neue Brennersysteme auf Basis des bewährten Prinzips der Flammenlosen Oxidation (FLOX®). Diese Entwicklung hat inzwischen zur Gründung der Firma e-flox GmbH geführt, die sich der Vermarktung dieser neuen Technologien widmet. In diesem Beitrag werden Schwachgasbrenner beschrieben, die direkt mit Vorvergasern gekoppelt werden, um feste Reststoffe zu nutzen. Die 800–900 °C heißen Gase werden in einem FLOX-Brenner umgesetzt. Mit CO-Emissionen von < 30 mg/m<sup>3</sup> bei O<sub>2</sub>-Gehalten von 4 % gelang es damit die CO-Emissionen gegenüber dem Stand der Technik um den Faktor 4 und die Abgasverluste um rund 25 % zu senken. Der getestete Brenner arbeitet stabil bei Sauerstoffgehalten von 3 bis 9 % im Abgas. Es gelingt zwar, die für FLOX-Brenner übliche thermische Stickstoffoxidbildung zu vermeiden, aber die auf Brennstoff-Stickstoff basierenden NO<sub>x</sub>-Emissionen können in diesem Betriebsbereich nicht reduziert werden. Aus diesem Grund wurde das Brennerkonzept zu einem gestuften FLOX-Brenner weiterentwickelt. Dieser soll im Herbst an einer industriellen Vorvergasanlage getestet werden.

Biorefineries are supposed to replace simple wood combustion systems by an integrated material and energy utilisation concept for biofuels. This requires the effective use of by-products and wastes, similar to the integrated site concept in the chemical industry. WS-Wärmeprozess-technik GmbH and the University of Stuttgart developed for his purpose new burner systems which are based on the well proven flameless oxidation (FLOX®) concept. This resulted meanwhile in the start-up of the new company e-flox GmbH which is supposed to commercialize this technology. This paper describes special burners which are directly coupled with pre-gasifiers to utilise solid residues. The 800–900 °C hot fuel gases from the pre-gasifiers are directly burned in the FLOX burner without any pre-treatment. The emissions of CO were reduced to < 30 mg/m<sup>3</sup> which corresponds to about 25 % of the state of the art concentration. Flue gas losses were reduced by 25 % simply by reducing excess oxygen to 4 %. The tested burner showed a stable operation range of 3 to 9 % excess oxygen. Thermal NO<sub>x</sub>-formation was suppressed successfully as known from natural gas burners. However, NO<sub>x</sub>-formation from fuel nitrogen was not reduced. Thus, the further development focuses on a staged FLOX-burner. A first prototype will be tested at an industrial pre-gasifier in autumn.

Die Nutzung von Biomasse ist inzwischen weit verbreitet und geht über die einfache Holzverbrennung hinaus. Das Konzept der Bio-Raffinerie macht in Europa und den USA Furore. Die Bio-Raffinerie soll Produkte wie Treibstoffe und Chemie-Grundstoffe für unsere moderne Industriegesellschaft aus landwirtschaftlichen Rohstoffen produzieren, ganz so wie das heute die Erdöl-Raffinerie auf Basis fossilen Erdöls tut. Auch wenn dieses Konzept noch Zukunftsmusik ist, so ist es doch Tatsache, dass gerade die Treibstoffproduktion immer mehr im Fokus steht und die Biomasse-Nutzung mehr und mehr diversifiziert wird.

Zwei Probleme sind jedoch allen in Frage kommenden Prozessen gemein:

– Bei der Umwandlung der Biomasse treten Reststoffe auf, die nicht direkt genutzt werden können;

– die Umwandlungsprozesse und Aufreinigungsschritte benötigen thermische Energie, wegen der heterogenen Struktur des Rohstoffes meist mehr als die Erdölverarbeitung.

Da ist es natürlich nahe liegend, wenn auch nicht technisch trivial, die Reststoffe zur Deckung des Energiebedarfs zu verwenden. Im Rahmen eines EU-Projekts [1] werden deshalb neue Brennersysteme für gasförmige, flüssige und feste Brennstoffe entwickelt. Stellvertretend soll hier die Entwicklung des Brenners für feste Brennstoffe beschrieben werden, der auf einem Vorvergassungsprozess beruht. Hierbei soll das Brennersystem heiße Schwachgase, die direkt aus einem Vorvergaser kommen, nutzen.

Die Entwicklung erfolgte im Rahmen einer Zusammenarbeit der Firma WS-Wärmeprozess-technik GmbH und der Universität

Stuttgart und führte inzwischen zur Gründung eines neuen Unternehmens, der e-flox GmbH, die sich der Vermarktung dieser neuen Technologien und deren Weiterentwicklung widmen soll.

Die Vorteile des FLOX-Prinzips für solche Anwendungen wurden bereits früher beschrieben [2]. Dieser Beitrag soll nun den aktuellen erreichten Stand der Entwicklung aufzeigen und über das weitere Vorgehen informieren.

### Vorvergassungssystem zur Brenngaserzeugung

Das im Technikum des Instituts für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart eingesetzte Vorvergassungssystem basiert auf zwei räumlich getrennten Apparaten, einem Entgasungs-Vorschubrost und einem Brennkammer-Kesselsystem. Die beiden Einheiten



**Dr.-Ing. Roland Berger**  
e-flox GmbH, Renningen

Tel. 0 71 59/93 08 95  
E-Mail:  
roland.berger@e-flox.de



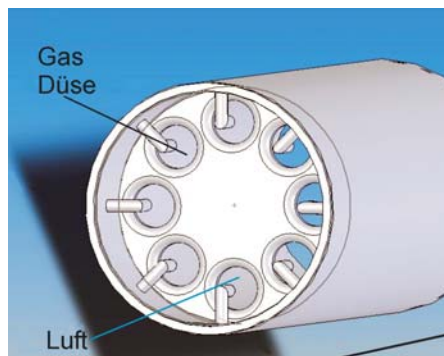
**Dipl.-Ing. Anja Schuster**  
Institut für Verfahrenstechnik  
und Dampfkesselwesen,  
Universität Stuttgart

Tel. 07 11/6 85 34 92  
E-Mail:  
schuster@ivd.uni-stuttgart.de



**Dr.-Ing. Joachim G. Wüning**  
WS Wärmeprozess-technik  
GmbH, Renningen

Tel. 0 71 59/16 32-0  
E-Mail:  
j.g.wuenning@flox.com



**Bild 1:** 3-D-Darstellung FLOX-Brenner

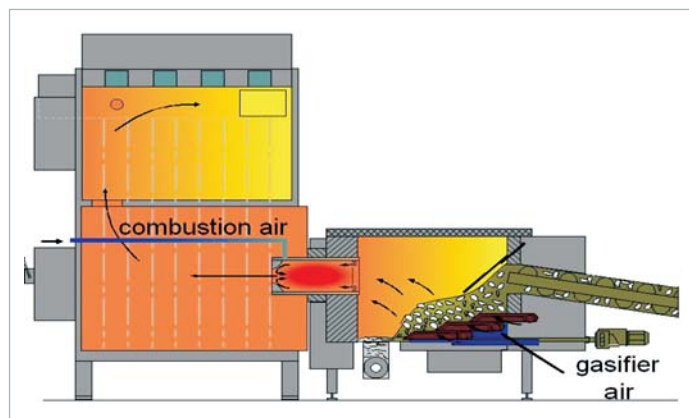
**Fig. 1:** 3D view of a FLOX burner

sind über ein keramisch ausgekleidetes Flammrohr mit quadratischem Querschnitt, in dem in der Standardausführung die Sekundärluft zugegeben wird, verbunden. Die Verbrennung der Gase erfolgt in einem großen zylindrischen Brennraum unterhalb des eigentlichen Kesselsystems. Die Gase aus diesem Vorvergaser sind extrem schwachkalorisch, allerdings auch noch sehr heiß. Der Heizwert liegt nach Messungen vor dem Flammrohr bei rund 2 MJ/Nm<sup>3</sup>, die Temperatur bei etwa 900 °C. Die niedrigen Heizwerte sind zum einen durch generelle Restriktionen des Rost-Systems bedingt, zum anderen aber auch durch die kleine Anlagengröße. Bei der hier untersuchten 120 kW Anlage erfordern die hohen Abstrahlverluste einen hohen Primärluftanteil im Vergleich zu größeren Anlagen, bei denen Heizwerte von 3 bis 4 MJ möglich sind.

Dies ist ein wichtiger Unterschied zu anderen Vergasungssystemen, bei denen der Vergaser und die Gasverbrennung oftmals nicht so direkt kombiniert sind. Kommen z. B. Wirbelschicht- oder Festbettvergaser zum Einsatz, so können Heizwerte von rund 5 MJ/Nm<sup>3</sup> erreicht werden, die Gas-temperaturen liegen dann meist im Bereich von 300 bis 500 °C.

**Bild 2:** Schematische Darstellung des Vorvergaser-Kesselsystems mit integriertem FLOX-Brenner

**Fig. 2:** Schematic view of gasifier+boiler system with integrated FLOX burner



### Eingesetztes FLOX-Brenner-system

**Bild 1** zeigt die 3-D-Ansicht des eingesetzten FLOX-Brenners. Der Brenner ist für die Versuchsanlage aus hochwarmfestem Stahl gefertigt. Dieses Material ist für einen Dauerbetrieb ob der heißen reduzierenden Gasatmosphäre nicht geeignet, für den Versuchsbetrieb aber besser zu handhaben als eine Ausführung in SiSiC-Keramik wie sie für einen kommerziellen Brenner geplant ist. Änderungen sind bei metallischen Brennern wesentlich leichter zu realisieren.

Wie aus Bild 1 ersichtlich handelt es sich um einen Mehrdüsenbrenner. Das heiße Produktgas aus dem Vorvergaser strömt durch die großen Ringdüsen, die Zugabe der Sekundärluft erfolgt durch die kleinen Düsen im Zentrum der Ringdüsen. Die Sekundärluft wird durch die Zuleitung im Brennraum unter dem Kessel auf rund 250 °C vorgewärmt, im doppelwandig ausgeführten FLOX-Brenner erfolgt eine weitere Temperaturerhöhung auf rund 600 °C. Dort erfolgt allerdings die Erwärmung durch Wärmezufuhr aus dem Brenner, d. h. sie trägt in den Bilanzgrenzen des eigentlichen Brenners nicht zu einer Erhöhung der Verbrennungstemperatur bei. **Bild 2** zeigt

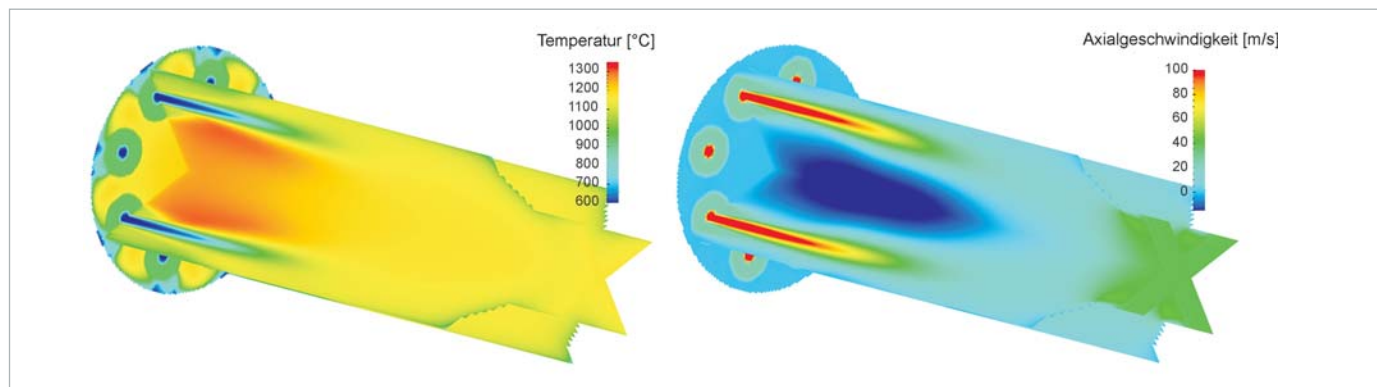
das Kesselsystem mit dem integrierten FLOX-Brenner.

Der Brenner wurde als Mehrdüsen-system konzipiert, da hier eine wesentlich kompaktere Reaktionszone zu erreichen ist als bei Eindüsenbrennern. An jeder Düse findet eine schnelle Vermischung von Brenngas, Luft und rezirkulierendem Abgas statt. Dieses Brennerdesign ermöglicht es, die gesamte Brenn-kammer auf die Größe des bisherigen Flammrohres zu reduzieren. Damit wird ein wesentlich kompakteres Kesseldesign möglich.

**Bild 3** zeigt die mit Hilfe einer CFD-Rechnung ermittelte Temperaturverteilung und die sich ergebenden axialen Gasgeschwindigkeiten. Man kann erkennen, dass die Abgasrückströmung im Zentrum des Brenners erfolgt und dass hier auch die maximalen Reaktionstemperaturen auftreten.

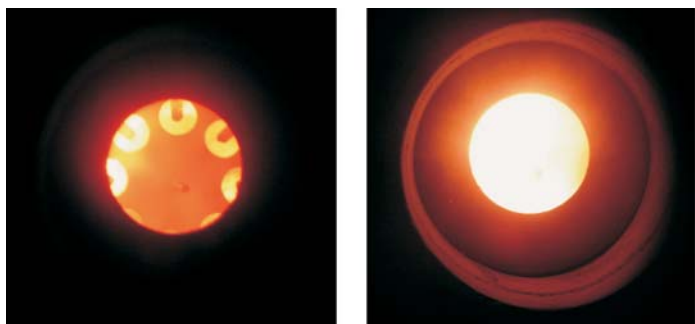
### Betriebserfahrungen mit dem Prototyp Schwachgas-FLOX-Brenner

Wie bisher auch erfolgt der Anlagenstart nur mit Primärluft, d. h. die gesamte zur Verbrennung erforderliche Luftmenge wird über den Rost im Vorvergaser zugegeben.



**Bild 3:** Durch CFD-Rechnung ermittelte Temperatur- und (axiale) Geschwindigkeitsverteilung im Brenner

**Fig. 3:** Temperature and (axial) velocity distribution in the burner, calculated using computational fluid dynamics (CFD)



**Bild 4:** FLOX-Brenner im Flammen- (rechts) und im FLOX-Modus

**Fig. 4:** FLOX burner in flame (right) and FLOX mode

Lediglich eine kleine Luftmenge wird über die Sekundärluftdüsen zugegeben, um diese zu kühlen. Zunächst findet die komplette Verbrennung im Vorvergaser statt. Dann wird schrittweise die Leistung erhöht und im Brenner beginnt sich eine Flamme auszubilden. Nachdem im Brenner eine Temperatur  $>800\text{ }^\circ\text{C}$  erreicht wurde, wird die Sekundärluftzugabe erhöht, wodurch der Brenner in den FLOX-Modus geschaltet wird. **Bild 4** zeigt die beiden Betriebszustände im Vergleich. Im Flammenmodus ist der gesamte Brenner durch eine hell leuchtende Flamme ausgefüllt, im FLOX-Modus ist der Brenner selbst flammenlos, man kann lediglich im Bereich vor dem Brenner, also oberhalb des Entgasungsrostes, Flammen erkennen. Dies deutet auf die schlechte Vermischung im Vorvergaser hin. Um hier wenigstens teilweise Abhilfe zu schaffen, wurde ein Mischblech vor dem Brenner eingebaut, damit die Beaufschlagung der einzelnen Brennerdüsen gleichmäßiger erfolgt.

Mit diesem System wurden für unterschiedliche Brennstoffe hervorragende Verbrennungsergebnisse erzielt. Während bei dem herkömmlichen Flammrohrprinzip bei niedrigem Primär- $\lambda$  teilweise sehr hohe CO-Emissionen durch Flammenquenchung an der Kesselrückwand zu beobachten waren, konnte mit dem FLOX-Brenner bei jedem primär einstellbaren  $\lambda$  ein vollständiger Ausbrand der Brenngase mit CO-Werten  $<30\text{ mg/m}^3$  erreicht werden. Der Brenner arbeitete bei verschiedenen Gesamt- $\lambda$ -Einstellungen stabil ( $\text{O}_2$  im Abgas 3 bis 9 %).

### Auswirkungen des FLOX Brenners auf die $\text{NO}_x$ -Emissionen

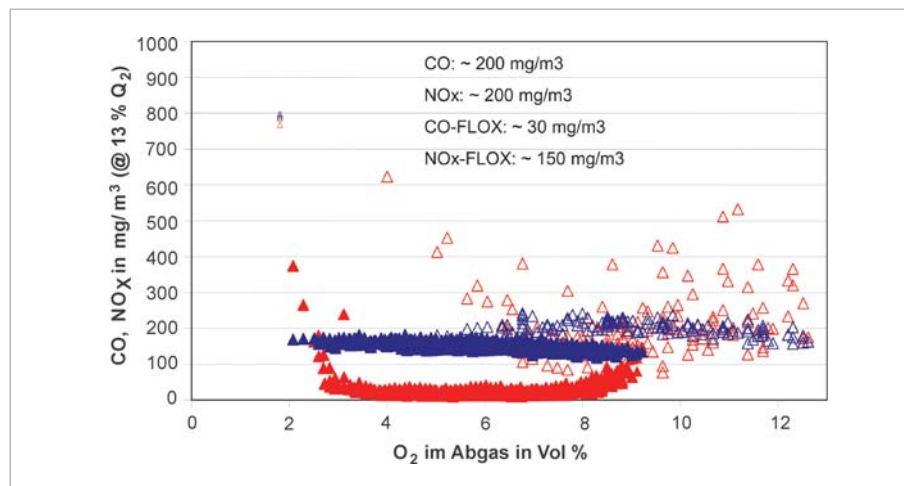
FLOX-Brenner sind für die extrem geringen  $\text{NO}_x$ -Emissionen beim Brennstoff Erdgas bekannt. Die weitgehende Unterdrückung thermischer Stickstoffoxide ist der Grund für  $\text{NO}_x$ -Emissionen bis in den einstelligen Bereich. Beim Einsatz von Biomassen ist jedoch auch mit Brennstoff-Stickstoffoxiden zu rechnen. Deshalb wurden Brennstoffe mit sehr unterschiedlichen Brennstoff-Stickstoff-Gehalten untersucht.

**Bild 5** zeigt den Vergleich von Emissionsmessungen mit Holzhackschnitzeln im her-

kömmlichen Verbrennungsmodus und mit dem FLOX-Brenner. Man erkennt zum einen die oben beschriebenen wesentlich verbesserten CO-Emissionen aber auch eine geringfügige Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen (20–25 %).

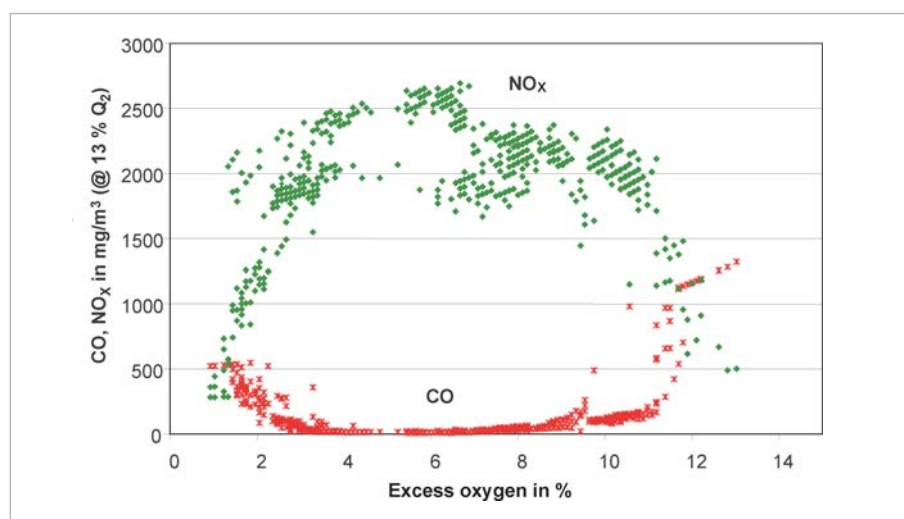
Leider hat sich dieses Bild bei stickstoffreichen Brennstoffen nicht bestätigt. Hier lagen die bisher gemessenen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Betrieb mit dem FLOX-Brenner über den  $\text{NO}_x$ -Werten im Flammenbetrieb.

**Bild 6** zeigt den Zusammenhang zwischen  $\text{NO}_x$ -Emissionen und Luftüberschuss im Betrieb mit dem FLOX-Brenner beim Einsatz von Pellets aus Rapsöl-Presskuchen (5,1 Ma-% Brennstoff-Stickstoff). Es ist deutlich zu erkennen, dass im normalen Betriebsbereich die  $\text{NO}_x$ -Emissionen sehr hoch liegen (2000–2500  $\text{mg/m}^3$ ). Erst wenn die ansonsten sehr geringen CO-Emissionen ansteigen, egal ob bei hohen oder niedrigen  $\text{O}_2$ -Konzentrationen, ergibt sich eine  $\text{NO}_x$ -Minderung. Es liegt also die Vermutung nahe, dass gerade die durch den FLOX-Brenner erreichten sehr guten Ausbrandbedingungen mit sehr guter Vermischung bei geringen Verweilzeiten, die Umsetzung von  $\text{NO}_x$ -Vorläufersubstanzen aus dem Brennstoff zu NO begünstigen. Die ansonsten jeder Flamme innewohnende Stufung von der brennstoffreichen Flammenwurzel über die Flammengrenze mit  $\lambda = 1$  hin zu



**Bild 5:** CO- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei herkömmlicher Verbrennung im Flammrohr im Vergleich zum FLOX-Betrieb

**Fig. 5:** CO and  $\text{NO}_x$ -emissions from conventional combustion in the flame tube



**Bild 6:** CO- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei im FLOX-Betrieb bei unterschiedlichen  $\text{O}_2$ -Gehalten im Abgas

**Fig. 6:** CO and  $\text{NO}_x$ -emissions in FLOX mode for various  $\text{O}_2$ -contents in the exhaust gas

den sauerstoffreichen Gebieten außerhalb der Flamme ermöglicht demnach eine Reduktion der Konversion von Brennstoffstickstoff zu Stickstoffoxiden. Bei stickstoffarmen Brennstoffen kann dies durch die Unterdrückung der thermischen Stickstoffoxidbildung mit dem FLOX-Brenner noch überkompensiert werden, bei stickstoffreichen Brennstoffen kommt die erhöhte Brennstoff-Stickstoff-Konversion aber voll zum Tragen und führt zu höheren Stickstoffoxidemissionen.

Dies ist im Moment natürlich nur eine These die noch des Nachweises bedarf. Der Umstand soll durch zeitgleiche Messungen von HCN und NH<sub>3</sub> im Produktgas und NO<sub>x</sub> im Abgas genauer untersucht werden. Aufbauend darauf sollen dann durch eine genaue Stickstoff-Bilanzierung die Konversionsraten von Brennstoff-Stickstoff zu NO<sub>x</sub> ermittelt werden.

## Ergebnisse

Vergleicht man die mit dem beschriebenen FLOX-Brenner ausgestattete Biomasse-Feuerungsanlage mit dem bisherigen Stand der Technik, ließen sich durch eine Umstellung folgende Vorteile realisieren:

### – CO-Emissionen:

Gegenüber den sonst üblichen CO-Emissionen von 100–150 mg/Nm<sup>3</sup> bei gut eingestellten Holzfeuerungsanlagen ergibt sich eine Emissionsminderung um den Faktor 4. Ähnlich dürfte es sich bei Ruß- und Kohlenwasserstoffemissionen verhalten. Der gute Umsatz auch von im Vorvergaser bereits entstandenem Ruß, konnte mit einer Versuchsreihe mit Pellets aus Rapsöl-Presskuchen nachgewiesen werden.

### – Wirkungsgrad:

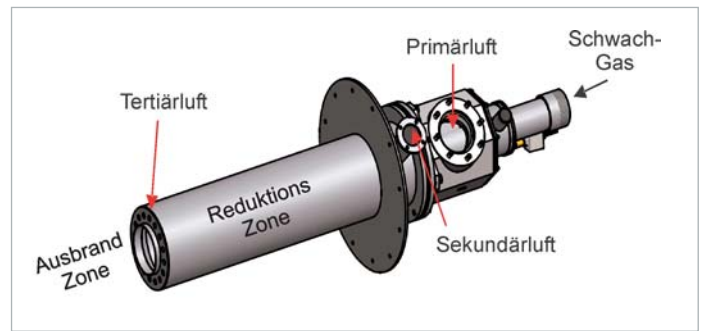
Durch die Absenkung des O<sub>2</sub>-Überschusses von sonst typischen 9 % O<sub>2</sub> auf stabil einhaltbare 4 % O<sub>2</sub> lässt sich die Abgasmenge um rund 25 % vermindern. Dadurch sinkt auch der Abgasverlust um diesen Betrag. Darüber hinaus steigt die abgas-spezifische Heizfläche des Wärmetauschers, d. h. es lässt sich entweder mehr Wärme transferieren (weiter steigender Wirkungsgrad) oder der Wärmetauscher kleiner bauen.

### – Baugröße, Anlagenkosten:

Wie oben beschrieben kann der Wärmetauscher ggf. kleiner gebaut werden. Außerdem kann das Brennerkammervolumen auf rund 25 % verkleinert werden. Dies spart Bauvolumen sowie Material und damit Investitionskosten.

**Bild 7:**  
Neuartiger gestufter FLOX-Flamme-Brenner

**Fig. 7:**  
Übersetzung fehlt !



Neben diesen rundum positiven Ergebnissen hinsichtlich der Verbrennungskapazität haben sich die Hoffnungen hinsichtlich einer Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen aber nur teilweise erfüllt. Nur bei vergleichsweise stickstoffarmen Brennstoffen wie Holzhackschnitzeln bewirkt die Unterdrückung der thermischen NO<sub>x</sub>-Bildung eine Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen. Dagegen steigen diese bei stickstoffreichen Brennstoffen durch eine Erhöhung der Konversionsrate von Brennstoffstickstoff zu NO<sub>x</sub>. Aus diesem Grunde ist bei solchen Brennstoffen eine gestufte Luftzuführung erforderlich, wenn eine Absenkung der NO<sub>x</sub>-Emissionen auf genehmigungsfähige Werte gewünscht ist.

Die sich durch die Kombination Vorvergaser-Brenner ergebende Stufung ist, wohl wegen der schlechten Vermischung im Vorvergaser, nicht ausreichend. Aus diesem Grunde liegt der Fokus der weiteren Entwicklung nun auf einen gestuften Brenner. Dabei sind grundsätzlich drei Varianten denkbar:

### – Flamme-FLOX:

Diese Variante wird nun an der Versuchsfeuerung des IVD implementiert. Dem FLOX-Brenner wird eine Mischkammer vorgeschaltet, in der unterstöchiometrisch Luft zugegeben wird, um die Vermischung zu verbessern und die Temperaturen zu erhöhen. Damit soll eine NO<sub>x</sub>-reduzierende Atmosphäre geschaffen werden.

### – FLOX-Flamme:

Diese Variante soll an einer industriellen Anlage in Polen umgesetzt werden. Hier wird der FLOX-Brenner mit einem Gegenstrom-Vergaser gekoppelt, der ein vergleichsweise heizwertreiches Gas produziert. Der FLOX-Brenner wird unterstöchiometrisch betrieben und sorgt so für optimale Reduktionsbedingungen. Nach dem FLOX-Brenner wird Tertiärluft zugegeben, um einen vollständigen Ausbrand zu

erreichen. **Bild 7** zeigt diesen neuen Brennertyp.

### – FLOX-FLOX:

Diese Kombination bietet im Prinzip die optimalen Reduktionsbedingungen, da die guten Reduktionsbedingungen der Primärstufe mit den guten Ausbrandbedingungen der Sekundärstufe kombiniert werden. Allerdings steigen die Druckverluste an und die erforderlichen Luftmengen zur Einstellung des FLOX-Modus werden in der Regel für den Ausbrand nicht benötigt.

## Fazit

Wie beschrieben konzentrieren sich die Entwicklungsarbeiten im Moment auf einen gestuften Brenner, um auch Brennstoffstickstoffoxide wirksam mindern zu können. Das Flamme-FLOX-Stufungskonzept am IVD soll im September getestet werden, das FLOX-Flamme Konzept wird in der nächsten Heizperiode bei der Firma ZAMER in Polen erprobt. An diese Arbeiten wird sich dann die Umsetzung der Entwicklung eines Brenners aus keramischen Bauteilen anschließen. Damit könnten die Brenner ab Ende 2007 auch kommerziell eingesetzt werden.

Neben diesen speziellen Brennern für heiße Schwachgase aus Vorvergaseranlagen befinden sich auch noch andere Brennertypen in Entwicklung. So z. B. ein Brenner der sehr heizwertarmes Deponiegas verbrennen soll (bis 5 % CH<sub>4</sub> in CO<sub>2</sub>). Dieser wurde zusammen mit dem Ökozentrum Langenbruck aus der Schweiz entwickelt und wird in Kürze an einer Deponie im Tessin in Betrieb gehen.

## Literatur

- [1] [www.eu-projects.de/bio-pro](http://www.eu-projects.de/bio-pro)
- [2] Berger, R.; Schmid, M.; Wüning, J. G.: Low-NO<sub>x</sub>-Schwachgasverbrennung mit flammloser Oxidation. Gaswärme International, 54 (2005), H. 6