

5
2008

GASWÄRME

International

Gasanwendung in Industrie und Gewerbe

<http://www.gaswaerme-online.de>

Schwerpunkt
Brenner und Feuerungen

Verbrennung von Spülgasen aus Industrieöfen

Combustion of purge gases from industrial furnaces

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

erschienen in

GASWÄRME International 5/2008

Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Ansprechpartner: Stephan Schalm, Telefon 0201/82002-12, E-Mail: s.schalm@vulkan-verlag.de

Verbrennung von Spülgasen aus Industrieöfen

Combustion of purge gases from industrial furnaces

Von Roland Berger

Bei vielen thermischen Prozessen in Industrieöfen fallen geringe Mengen Spülgase an, die brennbare und geruchsintensive Bestandteile enthalten. Wegen der geringen Mengen (meist wenige m^3/h) sind konventionelle Nachverbrennungssysteme meist zu groß, weshalb der Erdgasverbrauch unnötig hoch ist. In diesem Beitrag wird ein neues kompaktes Feuerungssystem vorgestellt, das von einem Anwender, einem Hersteller von Siliziumcarbit Keramik und einem Anlagenbauer, der Firma e-flox GmbH gemeinsam entwickelt wurde. Dieses System ist speziell für die effiziente und saubere Verbrennung kleiner Volumenströme bei geringstmöglichem Brennstoffverbrauch ausgelegt. Die neuen Systeme sollen die bisher genutzte zentrale Nachverbrennungsanlage ersetzen und dann zu einer Einsparung des Erdgasverbrauchs von rund 10000 m^3/a führen.

Small quantities of purge gases containing combustible and odour-intensive constituents occur in many thermal processes conducted in industrial furnaces. As a consequence of the low amounts involved (usually only a few m^3/h), conventional after-burner systems are generally too large, and natural gas consumption would therefore be unnecessarily high. This article examines a new and compact combustion system which has been jointly developed by a user, a silicon carbit manufacturer, and a plant manufacturer, e-flox GmbH. The system is designed specifically for efficient and clean combustion of small volumetric flows with the lowest possible fuel consumption. The new systems are intended to replace the central after-burner installations used up to now and to achieve savings of around 10,000 m^3/a on consumption of natural gas.

Bei vielen Industrieöfen entstehen im Laufe der thermischen Behandlung Spülgase (englisch: purge gas) die brennbare Bestandteile enthalten. So werden z. B. in der Metall- oder Kohlenstofftechnik die zu behandelnden Materialien Äthylen, Methan, Wasserstoff o.Ä. Gasen ausgesetzt. Die Gase reagieren mit dem Material, um dessen Eigenschaften zu verbessern. Ein Teil der Einsatzgase und deren Zersetzungsprodukte müssen aber aus dem Ofen gespült werden, bevor die Behandlung weitergeht.

Ein anderes Beispiel ist das Brennen von Keramik. Beim Aufheizen des Ofens zersetzen sich die organischen Bindemittel, die zum Formen der sogenannten Grünlinge eingesetzt wurden, und werden mit Stickstoff oder Luft aus dem Ofen gespült. Wird Luft zur Spülung einge-

setzt, werden die Bindemittel im Ofen weitgehend zersetzt. Hier spricht man vom sogenannten Entbindern. Wird Stickstoff eingesetzt, so werden die organischen Bindemittel im Prozess umgewandelt und deren Zersetzungsprodukte teilweise in das Material mit eingebunden. Unabhängig vom genauen Verfahren entstehen immer Spülgase von meist geringer Menge, die wegen der damit einhergehenden Umweltbe-

lastung nicht einfach abgeleitet werden können. Deshalb verfügen viele Betriebe über zentrale Nachverbrennungseinrichtungen, zu denen die Spülgase über lange Rohrleitungen transportiert werden. Dort werden sie mit Hilfe von Erdgas verbrannt.

Diese zentralen Anlagen zeichnen sich durch folgende Nachteile aus:

1. Regenerative oder Rekuperative thermische Nachverbrennungsanlagen werden nur für sehr große Volumenströme (mehrere 1000 bis mehrere 10000 m^3/h) angeboten. Kleinere Anlagen für mehrere 100 m^3/h oder gar kleiner, nutzen in aller Regel die Abgaswärme nicht zur Luftvorwärmung, weshalb viel Erdgas verbraucht wird.
2. Zentrale Anlagen müssen immer in Betrieb sein, auch wenn nur ein Industrieofen Spülgase produziert. Sie müssen aber dafür ausgelegt sein, das Spülgas aller vorhandenen Öfen gleichzeitig verbrennen zu können. Dadurch sind sie größer als im Mittel notwendig und verbrauchen immer viel Erdgas.

Diese Nachteile und die damit verbundenen hohen Brennstoffkosten haben den Keramik-Hersteller dazu bewogen, für eine neu zu bauende Ofengruppe zur thermischen Behandlung von Silizium Carbide (SiC) nach einem kompakten sparsamen Verbrennungsaggregat zu suchen, das nur dann in Betrieb ist, wenn es auch gebraucht wird. Da auf

Bild 1:
M150 Rekuperator-FLOX Brenner

Fig. 1:
M150 FLOX recuperator burner



dem Markt keine befriedigende Lösung gefunden werden konnte, wurde zusammen mit der Firma e-flox GmbH ein solches Aggregat entwickelt. Dabei kommt das Prinzip der flammlosen Oxidation (FLOX®) zum Einsatz.

Flammlose Oxidation zur Oxidation von Spülgasen

Die FLOX-Technik wurde von der Firma WS Wärmeprozessstechnik entwickelt und findet breiten Einsatz zur Beheizung von Industrieöfen [1]. FLOX-Brenner arbeiten ohne sichtbare Flamme. Sie werden so konstruiert, dass sich eine stabile interne Rezirkulation von heißen Abgasen in der Brennkammer einstellt. Rezirkuliertes Abgas, Verbrennungsluft und Brenngas vermischen sich schnell bei hohen Temperaturen und erst dann kommt es zur Oxidation. Das Fehlen einer Flamme hat dort den Vorteil, dass die sonst bei Hochtemperaturprozessen üblichen hohen NO_x -Emissionen stark verringert werden. Vor allem die thermische Stickstoffoxid-Bildung wird weitgehend unterdrückt [2]. Als thermische NO_x -Bildung wird die Oxidation von Luftstickstoff bei Temperaturen über 1300°C , also z. B. in Flammen, bezeichnet.

Darüber hinaus hat das FLOX-Verfahren aber auch noch weitere Vorteile. Da keine Flamme vorhanden ist, muss auch keine Flamme stabilisiert werden. Deshalb verursachen die sich bei wechselnden Gaszusammensetzungen verändernden Flammenparameter (Wobbe-Index, Flammgeschwindigkeit, u.Ä.) keine Stabilitätsprobleme. Auch die bei stark variierenden Gasmengen oftmals zu beobachtenden Flammenabbrisse oder Materialüberhitzungen stellen kein Problem dar, da die Oxidation gleichmäßig im gesamten Brennraum erfolgt. Diese Vorteile wurden im Rahmen eines EU-Forschungsprojekts untersucht und nachgewiesen [3]. Um auch diese Vorteile industriell zu nutzen, wurde die Firma e-flox GmbH 2006 gegründet.



Bild 2: Reaktorrohr aus SiSiC mit Anschlussflansch für den Brenner (vgl. Bild 1)

Fig. 2: SiSiC reactor tube with burner-connecting flange (see Figure 1)

Bild 3: Spülgas-Verbrennungsreaktor mit integrierter Wärmerückgewinnung

Fig. 3: Purge gas combustion reactor with integrated heat recovery



FLOX-Verbrennungssystem mit integrierter Wärmerückgewinnung

Bild 1 zeigt den eingesetzten Rekuperatorbrenner mit metallischem Rekuperator. Auf der Außenseite des Rekuperators wird Abgas über die Metallrippen abgesaugt. Innen strömt über vergleichbare Rippen Verbrennungsluft zum Brenner und wird dadurch vorgewärmt. Die Temperatur der Luft wird so auf rund 600°C erhöht, die Temperatur des Abgases von 900°C auf ca. 550°C verringert. Dadurch werden im Vergleich zu einer Beheizung ohne integrierte Wärmerückgewinnung rund 50 % Brennstoff gespart.

Der für die Verbrennungsanlage genutzte Brenner ist zusätzlich mit einem Oxidationsreaktor aus SiSiC-Keramik ausgerüstet. In diesem Reaktor findet die Oxidation der Spülgase statt. Ein solches SiSiC-Reaktorrohr ist in **Bild 2** dargestellt. Die heißen Oberflächen sorgen für eine vollständige Oxidation ohne Schlupf. Außerdem erlaubt diese Anordnung eine zusätzliche indirekte Kühlung, indem der SiSiC-Reaktor mit Luft von außen gekühlt wird.

Die Kombination aus Brenner und keramischem Reaktor ist in ein mit Mineralwolle isoliertes Gestell eingebaut. **Bild 3** zeigt beispielhaft eine Anlage komplett mit Steuerung und Visualisierung vor der Installation.

Das Spülgas wird über eine Brenngaslanze direkt axial im Brenner nach vorne geführt. Reicht der Heizwert des Spülgases nicht aus, um die Temperatur im Reaktor über 850°C zu halten, so wird zusätzlich Erdgas zudosiert.

Das Abgas verlässt den Brenner über einen Abgasflansch mit einer Temperatur von rund 550°C . Danach wird Kühlluft zugemischt und das Abgas einem Abluftventilator zugeführt. Alternativ ist auch die Nutzung des Abgases für Heizzwecke in einem Warmwasserkessel möglich und erprobt.

Betriebsweise des FLOX-Verbrennungssystems

Die Einheit wird nur dann betrieben, wenn es erforderlich ist. Im hier betrachteten Fall von Keramiköfen ist dies in der Phase der Fall, wenn die organischen Bindemittel zersetzt werden ($150 - 600^\circ\text{C}$ im Ofen). Nach Einschalten der FLOX-Anlage wird der Reaktor im Flammenbetrieb auf 850°C aufgeheizt. Dies dauert 15–20 Minuten. Danach erfolgt die Umschaltung in den FLOX-Betrieb, wobei gleichzeitig die Spülgasdosierung freigegeben wird. Da sich der Heizwert des Spülgases beim Aufheizen des Keramikofens ständig ändert, wird über ein Erdgas-Dosierventil entsprechend mehr oder weniger Erdgas zudosiert, um die Temperatur im Reaktor zu halten. Eine Lambdasonde im Abgas überwacht den Sauerstoffgehalt und regelt die Luftdo-

sierung entsprechend dem Bedarf. Beim Erreichen einer ausreichend hohen Temperatur im Keramikofen kann davon ausgegangen werden, dass keine brennbaren Bestandteile mehr im Spülgas enthalten sind, die Spülgas-Verbrennung kann abgeschaltet werden. Bei einer üblichen Ofenbetriebsdauer von 3 Tagen ist damit die Verbrennungseinheit nur ca. 10–12 Stunden in Betrieb. Eine Nachverbrennung ist immer zwei Öfen (einer Ofengruppe) zugeordnet, die Gesamtbetriebszeit liegt also dann bei rund 30 %.

Betriebserfahrungen und Einsparpotenzial

Die erste FLOX-Verbrennungseinheit ist nunmehr seit rund 1,5 Jahren in Betrieb. Anfänglich zu beobachtende Probleme konnten durch Optimierungsmaßnahmen an diesem Prototypen beseitigt werden, weshalb die Anlage seit nunmehr einem Jahr stabil betrieben werden kann. Seit rund zwei Monaten findet auch eine Erdgasverbrauchsmessung an der Anlage statt. Dabei lag der durchschnittliche Erdgasverbrauch bei 110 m³ pro Monat.

Dieser Wert ist natürlich statistisch noch nicht sehr aussagekräftig, für einen ersten Vergleich mag er aber genügen. Hierfür wird der Verbrauch mit der noch bestehenden zentralen Nachverbrennung verglichen. Diese zentrale Anlage verbrennt das Spülgas aus 6 Ofengruppen (12 Öfen) und benötigt hierfür 10000 m³ Erdgas im Monat. Würde man die zentrale Anlage durch 6 FLOX-Verbrennungsanlagen ersetzen, läge demnach deren kumulierter Verbrauch der FLOX-Anlagen bei rund 660 m³ pro Monat. Also weniger als einem Zehntel. 9340 m³ Erdgas bzw. rund 96 MWh Erdgas würden pro Monat eingespart. Bei einem Erdgaspreis von 5 ct/kWh entspräche dies einer finanziellen Ersparnis von 4800 Euro im Monat oder 57.700 Euro im Jahr. Zurückgerechnet auf ein einzelnes FLOX-Verbrennungssystem erspart ein solches dem Betrieb also 9.600 Euro Erdgaskosten pro Jahr. Ob der steigenden Erdgaspreise und der aktuellen Klimadiskussion ein sicher nicht zu vernachlässigender Betrag. Es muss aber betont werden, dass dies ein betriebspezifisches Ergebnis ist und nur eingeschränkt auf andere Anwendungen übertragen werden kann.

Die Einsparung setzt sich nach unserer Abschätzung aus folgenden Faktoren zusammen:

1. 40 % durch integrierte Wärmerückgewinnung
2. 30 % durch vermiedene Vorhaltung von Durchsatz-Kapazitäten wie bei zentralen Einheiten unvermeidlich
3. 30 % durch bedarfsorientierten Betrieb der Anlage im Vergleich zum kontinuierlichen Betrieb der zentralen Anlage.

Abgasemissionen

Wie oben bereits beschrieben, zeichnet sich das FLOX-Verbrennungssystem dadurch aus, dass die Entstehung thermischer Stickstoffoxid-Emissionen gering ist. Bei dem hier eingesetzten Brenner kann davon ausgegangen werden, dass die Konzentration thermischer Stickstoffoxide (bezogen auf den hier anzuwendenden Bezugssauerstoffgehalt von 17 Vol %) immer unter 15 mg/m³ liegt. Ähnlich verhält es sich mit der Emission von Produkten unvollständiger Verbrennung, wobei hier lediglich CO betrachtet wird. Hier kann von Emissionen unter 10 mg/m³ ausgegangen werden. Diese Konzentrationen sind natürlich unkritisch, bzw. äußerst gering.

Komplizierter stellt sich die Situation dann dar, wenn Brennstoff-Stickstoffoxide entstehen. Diese NO_x-Emissionen entstehen dann, wenn im Einsatzstoff organische Stickstoffverbindungen enthalten sind. Dies kann z. B. bei Bindemitteln der Fall sein. Diese zersetzen sich im Ofen zu HCN, NH₃ o.Ä., welche in der Feuerung dann in NO_x umgewandelt werden. Überschlüssig kann man davon ausgehen, dass rund 50 % der im Brennstoff

enthaltenen organischen Stickstoffverbindungen so in Stickstoffoxide umgewandelt und emittiert werden.

Bild 4 zeigt einen typischen Emissionsverlauf für Stickstoffoxide. Dieser Verlauf wurde im Abgas des FLOX-Verbrennungssystems während einer typischen Entbinderungsphase gemessen. Es zeigen sich zum Beginn des Betriebs die sehr geringen thermischen NO_x-Emissionen. Dann werden jedoch mehr und mehr organische Stickstoffverbindungen im Ofen ge crackt und als Vorläufersubstanzen zur Brennstoff-NO_x-Bildung in die Feuerung eingetragen. In der Hauptemissionsphase schwanken die Emissionen recht stark und gehen dann nach Abbau der Bindemittel in der Ofenbeladung wieder zurück. Die Emissionswerte liegen zwar immer unter dem hier geltenden Grenzwert für Halbstundenwerte von 500 mg/m³, es muss aber beachtet werden, dass bei größeren Bindemittelmengen oder beim Einsatz anderer Bindemittel die Konzentration auch steigen oder fallen kann.

An dieser Stelle muss jedoch beachtet werden, dass die ausschließliche Betrachtung der Emissionskonzentrationen hier zu kurz greift. Entscheidend für die Belastung der Umwelt ist schließlich die insgesamt emittierte Menge an Schadstoffen, also der Emissionsmassenstrom. Der aus thermischen Stickstoffoxiden resultierende Emissionsmassenstrom liegt beim FLOX-Verbrennungsverfahren wegen der günstigeren Emissionscharakteristik des FLOX-Verfahrens und der Erdgaseinsparung wesentlich niedriger als beim konventionellen Verfahren. Der aus

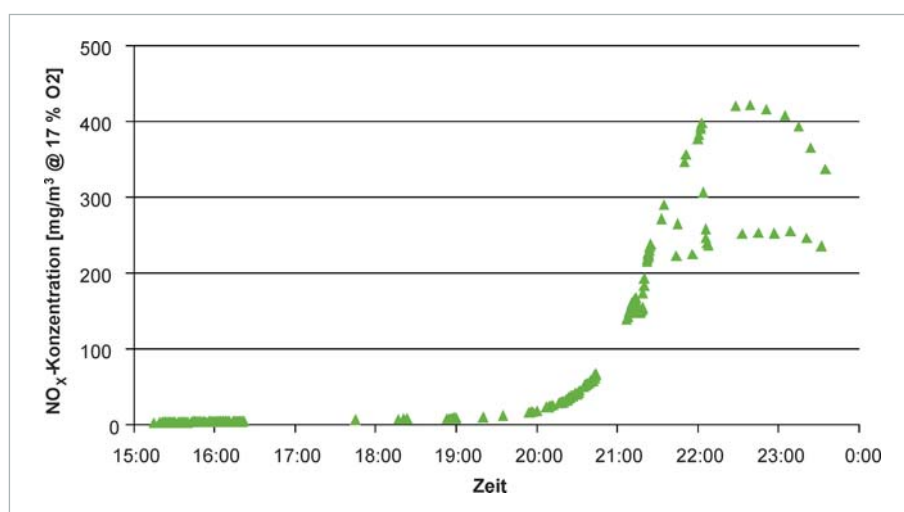


Bild 4: Verlauf der NO_x-Emissionskonzentration während der Zersetzung der Bindemittel

Fig. 4: Plot of NO_x emissions concentration during breakdown of binders

Tabelle 1: Vergleich der spezifischen NO_x-Emissionen einer zentralen Nachverbrennung und einer FLOX-Anlage

Table 1: Comparative assessment of specific NO_x emissions from a central after-burner installation and an FLOX system

Größe	Einheit	Zentrale Anlage	FLOX-Anlage
Thermische NO _x -Emissionen	g/(h*Ofen)	0,91	0,2
Brennstoff NO _x -Emissionen	g/(h*Ofen)	1,05	1,05
NO _x -Emissionen gesamt	g/(h*Ofen)	1,96	1,25
NO _x -Konzentrations-Peak (Halbstundenmittelwert)	mg/m ³	63	318

Brennstoff-NO resultierende Emissionsmassenstrom ist jedoch bei allen Verbrennungsverfahren weitgehend identisch. Allerdings wird dieser Brennstoff-NO-Massenstrom beim FLOX-Verfahren mit Wärmerückgewinnung mit wesentlich weniger Abgasen ausgestoßen, seine Konzentration im Abgasstrom steigt also im Vergleich zu einem nicht so effizienten Verbrennungsverfahren deutlich an. Die folgende Tabelle gibt einen überschlägigen Vergleich für den hier beschriebenen Anwendungsfall wieder, dabei wurden die Emissionsmassenströme jeweils auf einen Industrieofen bezogen. Es wurden lediglich die unterschiedlichen Abgasmengen berücksichtigt, bei den thermischen NO_x-Emissionskonzentrationen wurde davon ausgegangen, dass die zentrale Anlage genauso gute Werte schafft wie die FLOX-Anlage (**Tabelle 1**).

Die hier überschlägig ermittelten Werte zeigen eindrücklich, dass die FLOX-Anla-

ge deutlich emissionsärmer arbeitet, bei einer rein konzentrationsbezogenen Betrachtung aber eventuell schlechter dasteht als eine ineffiziente zentrale Anlage. Dies ist bei evtl. notwendigen Genehmigungsverfahren zu beachten und mit der Behörde zu besprechen. Sonst könnte es sein, dass ein an sich effizienteres und sauberes Verfahren schlechter beurteilt wird als ein energieaufwändigeres Verfahren mit höheren Emissionen.

Fazit

Eine enorme Effizienzsteigerung bei verringerten Schadstoffemissionen haben die den Keramik-Hersteller davon überzeugt, das neue FLOX-Verbrennungssystem für Spülgase in Zukunft verstärkt einzusetzen. So wird aktuell im Rahmen einer Produktionserweiterung eine neue Ofengruppe mit einem FLOX-Verbrennungssystem ausgerüstet. Danach ist geplant, auch im Bestand die

zentrale Nachverbrennung durch entsprechende FLOX-Nachverbrennungssysteme zu ersetzen, damit das oben ermittelte Einsparpotential auch realisiert werden kann. Die Firma e-flox GmbH hat den bei der Firma Schunk installierten Prototypen inzwischen weiterentwickelt, damit auch größere Spülgasmengen mit deutlich höheren Heizwerten verarbeitet werden können. Auch Anlagen mit Abwärmenutzung sind inzwischen im kommerziellen Betrieb.

Literatur

- [1] Wüning, Joachim G.; Wüning, Joachim A.: Ten Years of Flameless Oxidation Technical Applications and Potentials, 2001
- [2] Wüning J.A., Wüning J.G., Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO-Formation, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 23, Seite 81-94, 1997
- [3] Berger, R.; Schmid, M.; Wüning, J. G.: Low-NO_x Schwachgasverbrennung mit Flammloser Oxidation. Gaswärme International, 54 (205), H. 6

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

Tel.: 07159 / 930895
E-Mail:
roland.berger@e-flox.de

