



Flammenlose Verbrennung

Abb 1



- ▶ **Energieeinsparung durch Nutzung von Abgaswärme**
- ▶ **Neue Anwendungen für bewährte Technik**
- ▶ **Dezentrale Wasserstofferzeugung aus Erdgas**
- ▶ **Schadstoffarme Kohlenstaubverbrennung**
- ▶ **Neue Nutzungsmöglichkeiten für Schwachgas**

Keramisches Stahlheizrohr im Versuchslabor

Was zunächst paradox klingt – Flammenlose Verbrennung – setzt sich bei immer mehr industriellen Hochtemperatur-Brennern durch. Mit einer ausgeklügelten Durchmischung von Brenngas, Brennluft und rückzirkulierendem Abgas kann, mit so genannten FLOX-Brennern, eine Verbrennung ohne Flamme aufrecht erhalten werden. Der entscheidende Vorteil: auch bei hohen Ofentemperaturen wird nahezu kein Stickoxid gebildet. Das Verfahren ermöglicht zudem eine effiziente Nutzung der Brennstoffe, da die Abgase zur Vorwärmung der Brennluft genutzt werden können.

Gerade die Stickoxidemissionen sind eine maßgebliche Herausforderung bei Hochtemperaturprozessen. Häufig lassen sich die Grenzwerte der TA Luft nur durch eine nachgeschaltete aufwändige Reinigung der Abgase erreichen. Luftstickstoff oxidiert in besonderem Maße in den heißen Zonen der Flammenfront. Bei der flammenlosen Verbrennung treten solche Temperaturspitzen nicht auf und eine

gleichmäßige Ofentemperatur bis etwa 1.400°C kann bei geringen Stickstoffemissionen aufrechterhalten werden.

Es ist daher nicht verwunderlich, dass jetzt – 15 Jahre nachdem der erste kommerzielle FLOX-Brenner in Betrieb genommen wurde, zahlreiche Varianten für ein breites Anwendungsspektrum zur Verfügung stehen. Insbesondere in der Stahlindustrie und bei Brennern für die Wärmebehandlung kommt die Technologie zum Einsatz. Das Potenzial der FLOX-Technologie ist aber längst noch nicht ausgeschöpft. In verschiedenen Projekten – zum Teil durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und die Europäische Union gefördert – richtet sich das Augenmerk auf die Nutzung von Schwachgasen und Biotreibstoffen, auf die Kraftwerkstechnik und die Kraft-Wärme-Kopplung. Auch für die Reformierung von Erdgas zu Wasserstoff wurden Geräte entwickelt, bei der die FLOX-Technologie zum Einsatz kommt. Gegenüber Brennern ohne Vorerwärmung kann damit der Brennstoffeinsatz um bis zu 50 % gesenkt werden.

► Wie funktionieren FLOX-Brenner?

Abb 2: Anfahren des Brenners im Flambetrieb (a) und FLOX-Betrieb (b)

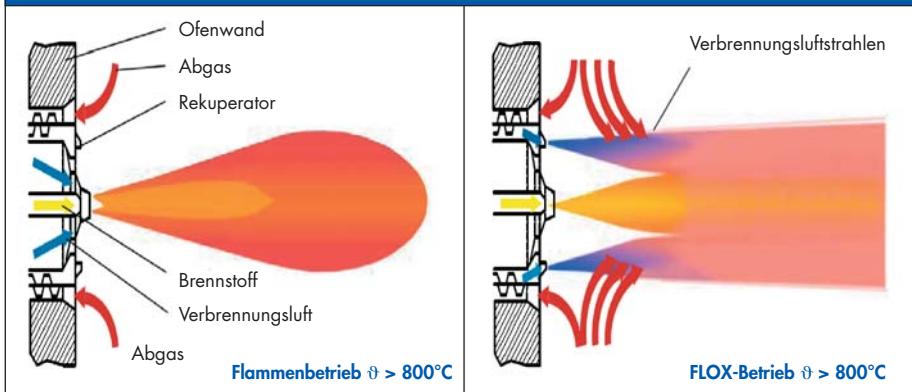
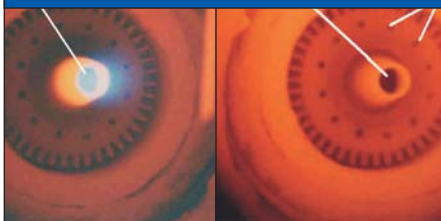


Abb 3: Brenner im Flambetrieb (links) und im FLOX-Betrieb (rechts)



Bei FLOX-Brennern strömen Brenngas und Verbrennungsluft unvermischt mit hoher Strömungsgeschwindigkeit in die Brennkammer (Abb 2b). Der wesentliche Unterschied zu herkömmlichen Brennern ist die sehr starke interne Rezirkulation der Abgase in der Brennkammer und deren Vermischung mit der Verbrennungsluft. Hierdurch und durch die verzögerte Vermischung von Luft

► Ein Anfang in der Industrie

In den frühen 1990er Jahren wurden sowohl rekuperative FLOX-Brenner, bei denen die heißen Abgase die Verbrennungsluft im Brenner über einen Wärmetauscher vorwärmen, als auch regenerative Brenner entwickelt, bei denen die Abwärme über einen Zwischenspeicher genutzt wird. Mittlerweile kann der Nutzer aus einer breiten Palette von Serienprodukten für verschiedene Anwendungen auswählen.

Stahlindustrie

Die Stahlindustrie ist ein Vorreiter beim Einsatz von FLOX-Brennern. Die meisten Brenner werden hier, in der Metallindustrie und in Wärmebehandlungsöfen eingesetzt. Ein entscheidender Durchbruch war die Entwicklung von keramischen Rekuperatorbrennern, die wesentlich temperaturfester als Brenner aus Chrom-Nickel-Stählen sind und eine hohe Lebensdauer haben. Damit können auch Hochtemperaturprozesse wirtschaftlich mit Erdgas befeuert werden, die bisher auf elektrische Energie angewiesen waren. Nicht nur bei den hohen Temperaturen haben die keramischen Brenner Vorteile,

sondern auch, wenn es darum geht, bei niedrigeren Temperaturen möglichst viel Abwärme zu nutzen. Bis heute wurden mehrere Tausend keramische Brenner installiert.

Glas- und Keramische Industrie

Bei der Glasproduktion und -verarbeitung entstehen erhebliche Stickoxidemissionen, die mit hohen Kosten für sekundäre Abgasreinigung verbunden sind. Entsprechend groß ist das Interesse an emissionsarmen Produktionsprozessen. Gleichzeitig bestehen aber auch Vorbehalte, von bewährten Produktionsverfahren abzuweichen. Viele Produktionsdetails beruhen auf empirischen Erfahrungen, die bei Veränderungen erst mühsam wieder erarbeitet werden müssen. Ähnliche Hürden sind in der Keramischen Industrie zu überwinden. Auch hier besteht ein großes Einsatzpotenzial, gleichzeitig trifft man auf Vorbehalte, hoch integrierte Prozesse zu ändern. In beiden Fällen bedarf es eines hohen Forschungs- und Überzeugungsaufwandes, um von den bekannten Pfaden abzuweichen.

Abb 5: Hunderte von keramischen FLOX-Brennern befeuern einen Glühofen

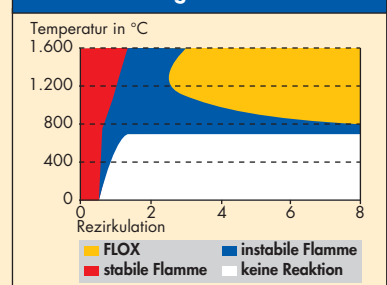


und Brenngas kann sich keine Flammenfront mehr ausbilden. Bei ausreichend hohen Temperaturen von mindestens ca. 800°C oxidiert der Brennstoff im gesamten Brennraumvolumen. Dadurch stellen sich sehr homogene Temperaturen ein. Die Bildung thermischer Stickstoffoxide, die vor allem an der Flammengrenze mit ihren hohen Spitzentemperaturen stattfindet, wird vermieden. Mit der gleichmäßigeren Temperaturverteilung sinken nicht nur die Stickstoffoxidemissionen, es lässt sich auch eine höhere mittlere Brennraumtemperatur aufrechterhalten.

Bei konventionellen Brennern werden die Verbrennungsvorgänge meist mit UV-Messgeräten überwacht. Dies ist im flammenlosen Betrieb nicht möglich. An deren Stelle tritt eine Messung der Nutzraumtemperatur. Wird die Grenztemperatur überschritten, sind die Zündung und der vollständige Ausbrand sichergestellt.

Feuer ohne Flamme

Abb 4: Die entscheidenden Parameter: Temperatur und Abgasrezirkulation



Es waren Versuche an einem Rekuperatorbrenner, die 1989 zu einer überraschenden Entdeckung führten: Bei Ofentemperaturen von 1.000°C und bei einer Luftvorwärmung von 650°C zeigte das Überwachungsgerät für die Brennerflamme kein Signal mehr und es war auch kein Flammgeräusch mehr zu hören. Trotzdem verbrannte der Brennstoff vollständig. Der Kohlenmonoxidgehalt des Abgases lag unter 1 ppm und die NO_x -Emissionen waren so niedrig, dass zunächst eine Fehlfunktion des Messgerätes vermutet wurde. Dennoch – die Verbrennung war stabil und gleichmäßig, ohne dass sich eine Flamme ausbildete. Das Phänomen wurde flammenlose Oxidation oder kurz FLOX genannt. In weiteren Experimenten des vom BMWi geförderten Forschungsprojektes konnten die Forscher die Bedingungen ermitteln, unter denen eine flammenlose Verbrennung möglich ist (Abb. 4). Es zeigte sich bald, dass das Verfahren erhebliche Energieeinsparungen ermöglicht. Auch bei intensiver Brennluft-Vorwärmung mit Abgaswärme wurden niedrige Emissionswerte erreicht. Daher bewilligte das BMWi eine Vielzahl von Folgeprojekten. Die Entdeckung führte letztendlich zu einem weltweit patentierten Verbrennungsverfahren mit zahlreichen Einsatzmöglichkeiten.

► Und neue Einsatzgebiete...

Schwachgase lassen sich nutzen

In verschiedenen Forschungsprojekten wird untersucht, wie Deponiegas, Grubengas, Biogas, Klärgas, Produktgas oder Holzgas energieeffizient und schadstoffarm genutzt werden können. Oftmals handelt es sich um Schwachgase mit einem im Vergleich zum Erdgas geringen Energiegehalt. Zudem schwankt die Brennstoffqualität vielfach häufig kurzfristig, z. B. bei Gasen aus Produktionsprozessen, oder über einen längeren Zeitraum, wie z. B. bei Deponiegasen. Heute werden Schwachgase vielfach noch abgefackelt, damit klimaschädliches Methan nicht in die Umwelt entweicht.

FLOX-Brenner kommen besser als konventionelle Brenner mit energiearmen Gasen zurecht und eine schwankende Brennstoffqualität führt bei flammenloser Oxidation nicht gleich zu Problemen mit der Flammenstabilität.

Im Europäischen Forschungsprojekt BIO-PRO werden Brenner für Bioraffinerien entwickelt. Dies sind Anlagen, die Biomasse in Brennstoffe, Chemikalien, aber auch Nahrungsmittel umwandeln. Bei diesen Prozessen fallen feste, flüssige und gasförmige Reststoffe an. Damit auch feste Brennstoffe verfeuert werden können, untersuchen Forscher der Universität Stuttgart den Einsatz von FLOX-Brennern mit verschiedenen Vorvergäsern.

Für die saubere Verbrennung von Schwachgasen muss die Konversion der in vielen Schwachgasen enthaltenen Stickstoffverbindungen in engen Grenzen gehalten werden. Dass dies möglich ist, wurde im Labor gezeigt. Nun soll es im industriellen Maßstab bestätigt werden. Neben konstruktiven Ansätzen wird hierfür auch die Entwicklung eines neuartigen Brennerreglers vorangetrieben. Gelingt dieser Nachweis innerhalb des Projekts, kann diese Technik in Zukunft kommerziell angeboten werden. Neue Brenner und Brennkammerkonzepte für Mikro-Gasturbinen entwickelt das Gaswärmeinstitut in Essen gemeinsam mit der Universität Bochum. Hier gelingt es Schwachgase einzusetzen, die nur ein Drittel des Heizwertes von Erdgas besitzen. Dabei werden die Stickoxid- und Kohlenmonoxid-

Mini-Blockheizkraftwerk

Für die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung hat die SOLO Kleinmotoren GmbH einen Stirling Motor zur Marktreife entwickelt. Das Aggregat mit einer elektrischen Leistung von 9 kW eignet sich für Hotels, Schwimmbäder, Schulen, Krankenhäuser, Wohngebäude oder Gewerbebetriebe. Es kann mit unterschiedlichen Wärmequellen betrieben werden. Für den Erdgasbetrieb ist ein FLOX-Brenner mit Luftvorwärmung vorgesehen.

Abb 6: Mini-BHKW mit Stirlingmotor



Grenzwerte der TA Luft für Deponie- Bio- und Holzgasverbrennung in Gasturbinen deutlich unterschritten.

Wasserstoff vor Ort erzeugen

Wasserstoff wird bisher vorwiegend industriell erzeugt. Verbraucher beziehen ihren Bedarf über Druckflaschen oder über Wasserstoffleitungen. Jetzt kann vor Ort Erdgas genutzt werden, um den Bedarf zu decken. Dies ermöglichen Reformer in modularer Bauweise, deren Effizienz an die von Großanlagen heranreicht. Die Reformer basieren auf der klassischen Wasserdampfreformierung von Erdgas. Die hierfür notwendigen Temperaturen von rund 800 °C werden von FLOX-Brennern erzeugt. Durch ein neuartiges Wärmemanagement erreichen die Reformer energetische Umwandlungswirkungsgrade von über 80%. Die Technologie könnte in Zukunft einen breiten Einsatz der PEM-Brennstoffzelle ermöglichen.

Bisher wurden zwei Baureihen entwickelt. Bereits marktreif ist eine Version für den Industrieinsatz mit Stundenleistungen von 50 bis 400 Nm³. Der Aufbau des Reformers ist modular. Über die Zahl der Reformerrohre kann die Leistung kostengünstig an den Einsatzzweck angepasst werden. Einige Reformer wurden bereits in Betrieb genommen und versorgen z. B. eine Wasserstofftankstelle am Flughafen München. Eine zweite kompakte Baureihe soll den Einsatz von Brennstoffzellen-Stacks für die Hausenergieversorgung ermöglichen. Prototypen erreichen auch hier bereits einen Umwand-

Abb 7: Brennstoffzellensystem mit FLOX Reformer zur Hausenergieversorgung



lungswirkungsgrad von mehr als 80%. Vor einer Vermarktung wird noch an der Maximierung des Wirkungsgrades, der Betriebssicherheit sowie einer Optimierung der Gasreinigung gearbeitet.

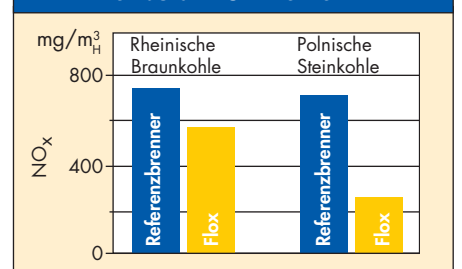
► Saubere Kohlekraftwerke mit Kohlenstaubverbrennung

In dem europäischen Forschungsprojekt FLOX-Coal entwickelt die Universität Stuttgart eine Pilotanlage für die flammenlose Verbrennung pulverisierter Kohle.

Versuche an der Universität Aachen zeigen, dass die Technologie auch für die Druckkohlenstaubfeuerung in Kohlekraftwerken entwickelt werden kann. Dabei verbrennt der Kohlenstaub bei einem Druck von bis zu 20 bar und Temperaturen bis zu 1.450 °C. Messungen an einer Versuchsanlage zeigen eine deutliche Absenkung der

NO_x-Konzentrationen im Vergleich zu einem konventionellen Referenzbrenner. Für rheinische Braunkohle sinken die NO_x-Werte um etwa 20% und für polnische Steinkohle um etwa 65%. Die Druckkohlenstaubfeuerung ist eine Schlüsseltechnologie, um hocheffiziente Gas- und Dampf-(GuD)-Kraftwerke auch für den Betrieb mit Steinkohle zu entwickeln. Der Wirkungsgrad eines Steinkohlekraftwerks könnte damit von derzeit etwa 45 auf weit über 50 Prozent gesteigert werden.

Abb 8: Absenkung der Stickoxid-Emissionen durch FLOX-Brenner



► Wie geht es weiter

FLOX-Brenner werden in der Industrie vornehmlich eingesetzt, weil sie selbst bei intensiver Brennluft-Vorerwärmung geringe Stickoxidemissionen verursachen. So lässt sich Abgaswärme auch bei hohen Prozesstemperaturen nutzen, was den Brennstoffbedarf um bis zu 50% senkt. Die Technologie bietet weitere Vorteile: Der Brennraum hat eine gleichmäßigere Temperaturverteilung, die thermische Belastung und die Geräuschentwicklung des Brenners ist geringer, die Brenner sind oft zuverlässiger und ihre Qualitätsansprüche an das Brenngas sind geringer. Steigende Energiepreise und strenge Emissionsauflagen werden den Einsatz von FLOX-Brennern weiter beflügeln. Neue Entwicklungen, etwa bei Verbrennungsverfahren für Glasschmelzwanne, erweitern die Einsatzgebiete der Technologie.

Weltweit wächst das Interesse an der flammenlosen Verbrennung außerhalb der klassischen Einsatzgebiete. Bei der Forschung steht insbesondere die Stromerzeugung im Fokus – sowohl für konventionelle Energiequellen als auch bei der Nutzung bisher wenig genutzter Energiequellen wie z.B. Schwachgase.

Mit einer sauberen und zuverlässigen Technologie können Schwachgase weit häufiger als bislang für die Wärme- und Stromerzeugung eingesetzt werden. Konsequenterweise lässt sich in Europa die Nutzung von Biomasse um 50% steigern. Gleichzeitig könnte der Stickoxidausstoß aus der Biomasseverbrennung um 76.000 Tonnen pro Jahr gesenkt werden. Bei der Kraftwerkstechnik kann flammenlose Verbrennung eine wichtige Rolle einnehmen. In Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) erforscht die WS-Wärmeprozess-technik GmbH den Einsatz von FLOX in Gasturbinen. Das weitaus größte Potenzial zur CO₂-Minderung liegt in der effizienten Kohleverbrennung. In dem internationalen Forschungsprojekt FLOX-Coal wurde eine Pilotanlage für die Verbrennung pulverisierter Kohle realisiert. Sie erreicht mit dem flammenlosen Brenner einen extrem niedrigen NO_x-Ausstoß. Nicht zuletzt kann die flammenlose Verbrennung eine wichtige Komponente eines CO₂-freien fossilen Kraftwerks sein. An der Umsetzung dieser Idee arbeiten in dem neuen Verbundvorhaben OXYCOAL-AC jetzt Forscher von verschiedenen Hochschulen und Unternehmen. Die einzelnen Projekte werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), vom Ministerium für Wissenschaft und Forschung (MWF) des Landes Nordrhein-Westfalen und Industriepartnern gefördert. Ersten Vorhaben wurden im Rahmen des Ende 2003 vom BMWi aufgelegten „Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke“ (COORETEC) bewilligt.

► PROJEKTADRESSEN

- WS Wärmeprozess-technik GmbH
Dornierstraße 14
71272 Renningen

► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Literatur

- Wüning, J.A.; Wüning J.G.: Brenner für die flammenlose Oxidation mit geringer NO-Bildung auch bei höchster Luftvorerwärmung. In: GasWärme International, Jg. 41 (1992), H. 10, S. 438-444
- Wüning J.G.: Flammenlose Oxidation von Brennstoff. Aachen : Mainz, 1996. ISBN 3-89653-053-4. Zugleich Dissertation, RWTH Aachen, 1995
- Wüning J.G.: Flameless Combustion and its Applications. In: Gas Technology Institute, (USA) (Hrsg.): Natural Gas Technologies. Orlando (USA), 30. Jan. - 02. Febr. 2005. Proceedings. 2005

Abbildungsnachweis

- Abb. 1, 3, 5, 7: WS Wärmeprozess-technik GmbH
- Abb. 2, 4: Nach Erdgas.report 1/03 VNG – Verbundnetz Gas Aktiengesellschaft
- Abb. 6: SOLO Kleinmotoren GmbH
- Abb. 7: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW)

Service

- Ergänzende Informationen wie Literatur, Internet-Links sind bei BINE im Internet unter www.bine.info (Service/InfoPlus) abrufbar.

PROJEKTORGANISATION

■ Förderung

Bundesministerium für
Wirtschaft und Technologie (BMWi)
11019 Berlin

Projekträger Jülich (PTJ) des BMWi und BMU
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Claus Börner
52425 Jülich

■ Förderkennzeichen

0328857A,B,C,D,E
0326939A,B,C
0326940A,B,C,D
0327274A
0327341A,B,C

IMPRESSUM

■ ISSN

0937 – 8367

■ Herausgeber

FIZ Karlsruhe GmbH
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

■ Nachdruck

Nachdruck des Textes nur zulässig bei vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares; Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung der jeweils Berechtigten.

■ Autor

Dr. Franz Meyer

BINE Informationsdienst Kompetenz in Energie

BINE informiert zu Energieeffizienz-technologien und erneuerbaren Energien:

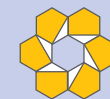
In kostenfreien Broschüren, unter www.bine.info und per Newsletter zeigt BINE, wie sich gute Forschungsideen in der Praxis bewähren.

BINE ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderter Informationsdienst der Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe GmbH.

Kontakt

Fragen zu diesem **projektinfo**?
Wir helfen Ihnen weiter:

Tel.: 0228 92379-44



BINE

Informationsdienst

FIZ Karlsruhe GmbH, Büro Bonn
Kaiserstraße 185 – 197
53113 Bonn

Tel.: 0228 92379-0

Fax: 0228 92379-29

E-Mail: bine@fiz-karlsruhe.de

Internet: www.bine.info