

## HVG-Mitteilung Nr. 2110

Über den Einsatz eines neuen OXYTHERM – Sauerstoffbrenners  
in Glasschmelzöfen

S. Heffels, MAXON GmbH, Essen, C. Taylor, MAXON, Muncie, USA

Vortrag im Rahmen der 80. Glastechnischen Tagung der DGG vom  
12. – 14.6.2006 in Dresden

### 1. Einleitung

Die Europäische Abgas-Richtlinie unterstützt seit Jahrzehnten den Wechsel von Luft zu Sauerstoffbrennern, um die Luftverschmutzung durch Glasschmelzöfen zu verringern. Sauerstoffbrenner werden in der Glasindustrie bereits seit Jahrzehnten genutzt. Außer der Verbesserung der Abgaswerte, konnte die Produktivität durch den erhöhten Wärmeübergang durch eine heißere Flamme gesteigert werden. In einigen Fällen können die Einsparungen durch höhere Produktivität die höheren Kosten für die Sauerstofferzeugung kompensieren. Der OXYTHERM LE wurde seit 1994 über 400 mal weltweit installiert. Der OXYTHERM LE FF ist seit einigen Jahren in mehreren Ländern in großen Schmelzwannen für die Borosilicatglasproduktion in Betrieb. Ziele einer Neuentwicklung von Sauerstoffbrennern sind:

- Senkung der  $\text{NO}_x$  Emission im Vergleich zu älteren Sauerstoffbrennern,
- flache Flamme mit gutem Wärmetransport,
- robuste industrietaugliche Bauart,
- schneller und leichter Austausch der Brennstoffdüse,
- niedrige Kosten durch Nutzung standardisierter Bauteile,
- hohe Flexibilität im Regelbereich,
- Mehrstoffanwendung wie Öl, LPG, Propan, Erdgas und
- wartungsfreie Ausführung.

Endverbraucher lehnen Änderungen der Betriebsbedingungen oder Ofenkonstruktionen in Ihrem Betrieb zunächst meist ab, der neue Brenner soll in gleiche oder ähnliche Wandöffnungen eingebaut werden können. Eine enge Zusammenarbeit des Brennerherstellers mit dem Endverbraucher ist für eine effiziente Entwicklung eines optimalen Brenners aber notwendig und für beide Seiten nützlich. Nach den ersten Versuchen an einem leeren Ofen folgen Versuche an einer maßstäblich verkleinerten Schmelzwanne. Nach diesem Stadium erfolgen Feldversuche in einem industriellen Glasofen.

### 2. Grundprinzip des neuen OXYTHERM LE und LE FF Brenner mit gestufter Sauerstoffzugabe

Obwohl der Wechsel zu Sauerstoff bereits mehr als 90 % des Stickstoffs eliminiert, wird noch  $\text{NO}_x$  gebildet. Ein Teil des  $\text{NO}_x$  stammt aus dem durch den Brennstoff eingebrachten Stickstoff sowie aus der angesaugten Umgebungsluft an undichten Stellen des Ofens. Öl kann bis zu 140 mg/kg Stickstoff enthalten. Sauerstofferzeugungsanlagen liefern Sauerstoff mit bis zu 5 % Stickstoff. Ein geringer Anteil Stickstoff ist chemisch zunächst in den Rohstoffen und später im Glas gebunden. Die Umsetzung des Stickstoffs zu  $\text{NO}_x$  ist besonders bei hohen Temperaturen unter der Anwesenheit von

Sauerstoff möglich (thermisches  $\text{NO}_x$ ). Die  $\text{NO}_x$  Bildung ist demnach von Ofentemperatur und Flamme abhängig.

Die Nutzung von Sauerstoff anstelle von Luft erhöht die Reaktionsgeschwindigkeit der Verbrennung signifikant. Die ersten Sauerstoffbrenner hatten aus diesem Grund kürzere und heißere Flammen als konventionelle Luftbrenner. Dies wiederum führte zu Wandschäden und Verdampfung von Schmelze unterhalb der Flamme. Eine gestufte Sauerstoffzugabe erniedrigt die Flammentemperatur und hat einen positiven Effekt auf die  $\text{NO}_x$  Emissionen. Um die Emissionen so weit möglich zu reduzieren ist eine Betrachtung der verschiedenen Einflussgrößen wichtig. Der Anteil an  $\text{NO}_x$  steigt mit:

- zunehmenden Stickstoffgehalt aus der Umgebung in den Ofen,
- höheren Sauerstoff-Brennstoffverhältnissen als nötig,
- hohen Flammentemperaturen und
- Stickstoff (-verbindungen) im Glas.

Die Temperatur der Flamme kann durch die Mischung der Reaktionsgase beeinflusst werden, d.h. durch die Gasgeschwindigkeiten, die Zusammensetzung und die Konzentrationen an Gas und Sauerstoff. Diese beeinflussen die Temperatur, welche sich aus der Reaktionsgeschwindigkeit und der Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion ergibt.

Der neu konzipierte Brenner ändert die Mischungsgüte der Gase. Das Prinzip des neuen OXYTHERM LE und des OXYTHERM LE FF Brenners basiert auf einer in zwei Stufen geführten Verbrennung: 1. brennstoffreiche Stufe und 2. eine Stufe der Restverbrennung bei niedriger Temperatur. In der ersten Phase wird die Sauerstoffkonzentration in der Zugabe verringert. Dies führt zu einem brennstoffreichen Gemisch. Die maximale Flammentemperatur wird reduziert. In der zweiten Stufe wird die Verbrennung bei niedriger Temperatur zu Ende geführt. Ergänzender Sauerstoff wird separat an die Außenseite der Flamme eingeblasen. Sie mischt sich mit dem zum Teil verbrannten Brennstoffgemisch (Bild 1). Die verzögerte Verbrennung fördert die Dissoziation des Gases und erhöht die Sichtbarkeit der Flamme. Die Bedingungen dieser zweigestuften Verbrennung minimieren den  $\text{NO}_x$ -Gehalt und erhöhen die Flammensichtbarkeit bei Sicherstellung einer vollständigen Verbrennung. Für den OXYTHERM LE FF wurde die Einblasegeschwindigkeit von Sauerstoff, Gas und Öl bezüglich des Flambildes optimiert.

### **3. Vorteile des OXYTHERM LE und OXYTHERM LE FF**

#### **3.1 Niedrige Emission**

Die ersten Versuche mit einem OXYTHERM LE-Brenner wurden in einer Pilot-schmelzanlage durchgeführt. Dabei wurden die Konzentration des Sauerstoffs in der ersten Stufe und der Sauerstoffgehalt in der zweiten Stufe variiert. Bild 2 zeigt die  $\text{NO}_x$  Emissionen bezogen auf einen konventionellen Sauerstoffbrenner ohne gestufte Sauerstoffzugabe. Mit zunehmendem Anteil Sauerstoff in der zweiten Stufe sinkt die  $\text{NO}_x$  Bildung. Dies zeigt, dass eine gestufte Sauerstoffzugabe vorteilhaft ist. Das Ergebnis wurde für Gas und Öl gleichermaßen bestätigt. Ergänzend soll vermerkt werden, dass eine zu hohe Sauerstoffzugabe zu einem schlechten Flammenbild an der Wand führen kann.

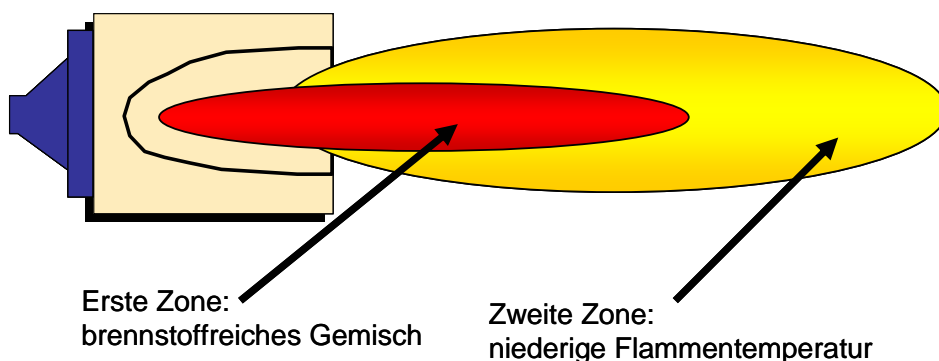


Bild 1: Schematische Darstellung der Verbrennung von Gas oder Öl bei gestufter Sauerstoffzugabe.

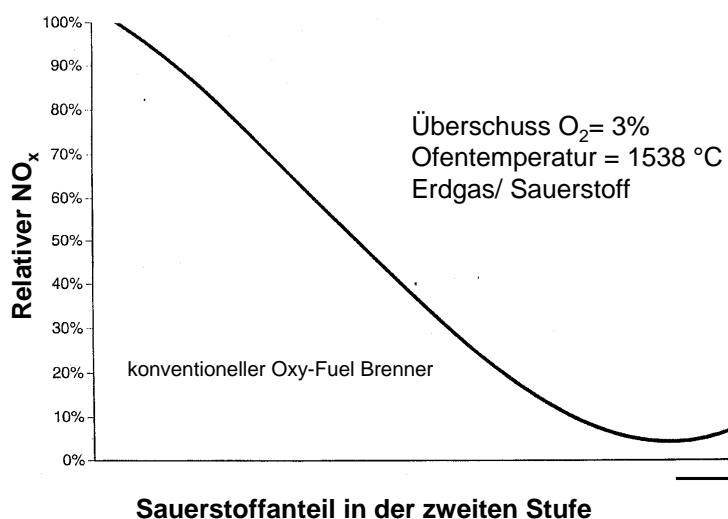


Bild 2: Effekt einer gestuften Sauerstoffzugabe auf die NO<sub>x</sub>-Emission.

Die Stufung führt zu einer unsichtbaren, fast unsichtbaren oder sichtbaren Flamme am Ausgang des Brennersteins. Das Ergebnis einer sichtbaren Flamme sieht man in Bild 4, hier schaut man man durch die unsichtbaren Flammen von Sauerstoffbrennern anderer Hersteller, welche zuviel Sauerstoff gestuft zugeben. Nach Kundenangaben war nach einem Jahr durch den Wechsel von einem nicht gestuften Sauerstoffbrenner zu den neuen OXYTHERM-LE eine Reduzierung von 27 % NO<sub>x</sub> und eine Erhöhung der Produktivität um 6% möglich.

Öl als Brennstoff hat ebenfalls Auswirkungen auf die NO<sub>x</sub> Emissionen. Die Emission von NO<sub>x</sub> sinkt, sobald Sauerstoff anstelle von Luft, und noch mehr, wenn Dampf als Zerstäubungsmedium genutzt wird. Wird Öl verbrannt, so wird die Flamme kompakter als die Gas-Flamme /2/.

### 3.2 Keine „Hot Spots“ an der Wand

Bild 3 zeigt ein CO-Profil als Aufsicht auf das Flammenbild (gemessen durch TNO). Die pfannenförmige Flamme ist typisch für den OXYTHERM LE-Brenner. Er liefert eine größere Abdeckung über die Glasschmelze als man von einem Brenner mit einem zentralen konischen Brennerstein erwarten würde. Das größere Flammenbild ist eine positive Folge aus der gestuften Sauerstoffzugabe in den zweiten Bereich der Flamme.

Die Nutzung einer gestuften Sauerstoffzugabe hat einen positiven Effekt auf die Reduzierung von thermischer Energie, die in der Nähe der Wand freigesetzt wird. Standard Brenner ohne gestufte Verbrennung erzeugen einen höheren Wärmefluss am Anfang der Flamme. Diese höhere Wärmeabgabe kann Schäden an der Wand verursachen (Bild 4). Nach dem Wechsel zu OXYTHERM LE-Brennern kann es sein, dass die Decktemperatur um bis zu 80 K sinkt, während die Bodentemperatur um 20 K steigt.

Die Geschwindigkeiten der Brennstoffstrahlen und des Sauerstoffs beim Austritt aus dem Brennerstein des OXYTHERM LE bzw. LE FF wurden bezüglich des Flammenbildes und der Turbulenz optimiert. Die Brenner wurden in die Seitenwand eingebaut und feuerten horizontal in den Schmelzöfen. Um die Schmelze gleichmäßig abzudecken, wurden die Brenner auf der gegenüberliegenden Wandseite versetzt angeordnet, so dass die pfannenartigen Bilder zahnradartig ineinander greifen und die gesamte Fläche abdecken. Üblicherweise decken die Flammenlängen 60 % - 70 % der Wannenbreite ab (Bild 5).

### **3.3 Gleichmäßige Wärmeverteilung**

Der Wärmefluss wurde mit einem Ellipsoid-Radiometer gemessen. Bild 6 zeigt den Wärmefluss als Funktion des Abstandes von der Wand für einen nicht gestuften Sauerstoff-Brenner. Die verschiedenen Kurven beziehen sich auf unterschiedliche Brennerkapazitäten. Mit steigender Kapazität steigt die Wärmeflussleistung, insbesondere in einem Abstand von 1 m von der Wand. Ein deutliches Maximum ist sichtbar.

Das Maximum verschiebt sich bei einer Erhöhung der Kapazität von 1,2 MW auf 1.5 MW von 1 auf 1,2 m. Die Wandtemperatur erhöht sich ebenfalls. Dies kann zu Schäden und zu unregelmäßigem Flammenverhalten führen. Das Wärmeprofil wird flacher.

Die Abstrahlung wird mit OXYTHERM LE FF mit gestufter Sauerstoffzugabe gleichmäßiger. Wie Bild 7 zeigt, verschiebt sich das Maximum in Richtung 2 m. Von der minimalen bis zur maximalen Kapazität erzeugt der Brenner eine gleichmäßige Wärmestromdichte. Man konnte beobachten, dass sich die Flamme bei gleicher Kapazität bei einem Übergang von einstufiger zu zweistufiger Verbrennung um 38 % vergrößerte. Die Flamme wird sichtbarer. Die Aufzeichnungen zeigen, dass sich die Wärmeübertragungsrate über eine größere Fläche des Schmelzbades erstreckt. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Wannenproduktivität und die Qualität der Glasschmelze aus.

### **3.4 Neue und effiziente Konstruktion**

Der neue Brenner wurde wie seine Vorgänger für die Industrie konstruiert. Die patentierte neue Konstruktion ermöglicht eine gestufte Sauerstoffzugabe und enthält viele benutzerfreundliche Aspekte der älteren OXYTHERM Baureihen. Der neue Brenner hat einen Brennerstein mit Sauerstoffdurchgängen, die außerhalb der Öffnung der Hauptflamme münden (Bild 8).

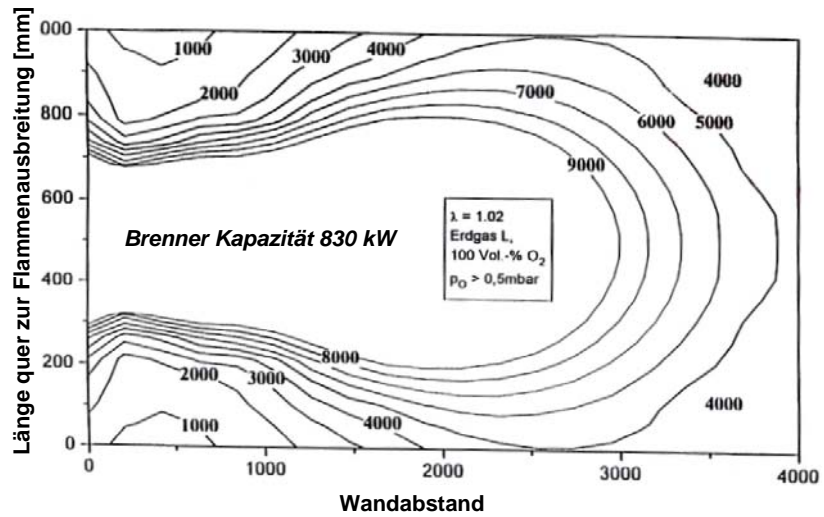
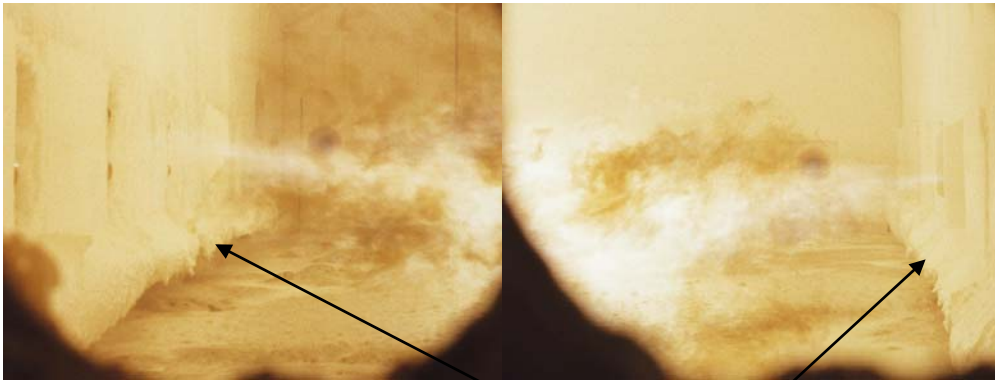


Bild 3: CO-Profil der Flamme.



Seitenwandbeschädigung vor und nach der Änderung zu OXY-THERM LE FF

Bild 4: Maxon OXYTHERM LE FF Feldversuch bei Gallo.



Bild 5: MAXON OXY-THERM LE.

Je nach Anforderung an die Flammenform (konisch oder flach) liegen die Sauerstofföffnungen radial um die Hauptöffnung oder im Falle der Flach-Flamme in einer Reihe unterhalb der Hauptöffnung. Diese Öffnungen speisen Sauerstoff an die Außenseite der Flamme in die zweite Stufe der Verbrennung. Trotz der verschiedenen Austrittsöffnungen wird die Sauerstoffzufuhr nur an einer Stelle des Brenners angeschlossen. Ein Teil des Sauerstoffs strömt zur ersten Stufe der Verbrennung, der verbleibende Anteil zu den Außenöffnungen der gestuften Zugabe. Das Verhältnis wird durch eine präzise Fertigung der internen Öffnungen festgelegt. Für spezielle Anwendungen ist es möglich, auch eine Seite der gestuften Außenöffnungen zu schließen. Damit wird die Temperatur auf einer Seite der Flamme erhöht.

Der neue Brenner hat eine Reihe von Vorteilen /4/:

1. Er hat einen hitzebeständigen Block und ein Gehäuse, das einen optimalen Anteil des Sauerstoffs gestuft in eine zweite Stufe der Verbrennung zuleitet.
2. Die Anzahl der aktiven Öffnungen von Sauerstoffdüsen kann geändert werden, indem man eine dünne Metaldichtung zwischen Gehäuse und Brennerstein einlegt, welche die Öffnungen verschließt. Die Dichtung kann jederzeit leicht entfernt werden, indem man das Gehäuse durch Lösen der 4 Flügelschrauben entfernt. Dies kann innerhalb weniger Minuten während laufender Produktion erfolgen.
3. Ist ein Austausch der Düse wegen Brennstoffwechsel oder massiver Kapazitätsänderung nötig, so kann sie leicht durch Lösen der Überwurfmutter mit der Hand und anschließendem Herausziehen entfernt werden. Eine neue Düse kann somit auch während des laufenden Betriebes eingebaut werden.
4. Ein spezieller Flachflammen-Brenner OXYTHERM LE- FF wurde unter Nutzung eines breiten rechtwinkligen Brennersteins (quadratischen bei Standard OXYTHERM und OXYTHERM LE) mit einer Reihe von horizontal angeordneten Sauerstofföffnungen unterhalb der Flammenaustrittsöffnung entwickelt. Die spezielle Konstruktion der Düse und die Art der Sauerstoffeindüsung produziert eine flache, dünne und pfannenförmige Flamme.

### **3.5 Neue Regelkonzepte**

Die Sauerstoffzugabe benötigt eine sehr genaue Regelung. Eine Abweichung der Sauerstoffzugabe von 5 % führt zu einer ebenso starken Abweichung des Sauerstoffs bei der Verbrennung. Ein Überschuss an Sauerstoff, der für die Verbrennung nicht benötigt wird, bedeutet eine enorme Kostenverschwendung und ist sofort ergebniswirksam, da er meist zugekauft wird. Weiterhin fördert ein extremer Sauerstoffüberschuss die NO<sub>x</sub> Bildung im Vergleich zu einem optimal eingestellten Verbrennungsgemisch. Dies gilt nicht in dem Maße für luftbetriebene Brenner, hier führt eine Abweichung von 5 % nur zu einer Abweichung von +/- 1 % an Sauerstoff in der Verbrennung. MAXON hat kürzlich ein elektronisches Regelsystem SMARTLINK zur Verbesserung sämtlicher Luft-Brennstoff und Sauerstoff-Brennstoff Brenner auf den Markt gebracht. Das neue System mit fein regelbaren Regelventilen kompensiert kleine Abweichungen im Gasdruck und Temperatur. Es lassen sich verschiedene Abhängigkeiten genau und vielseitig programmieren.

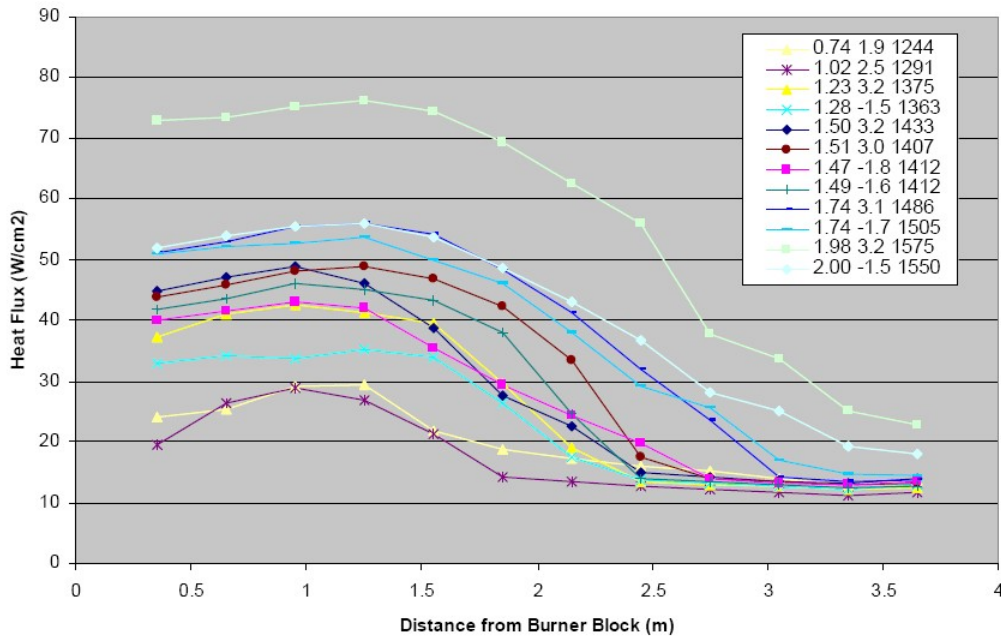


Bild 6: Wärmefluss eines konventionellen Oxyfuel-Brenners.

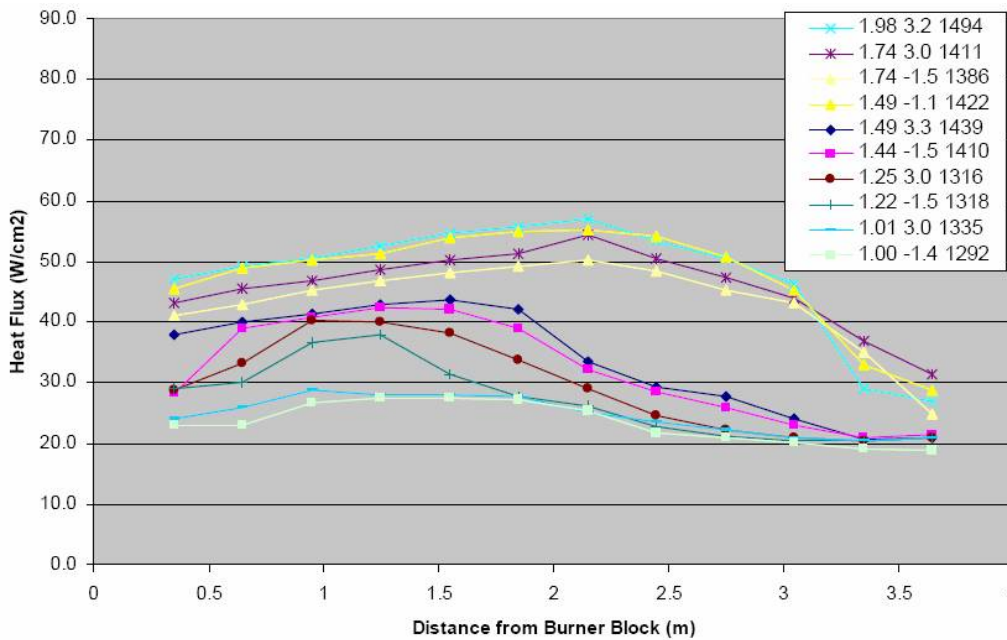


Bild 7: Wärmefluss eines OXYTHERM LE FF-Brenners.

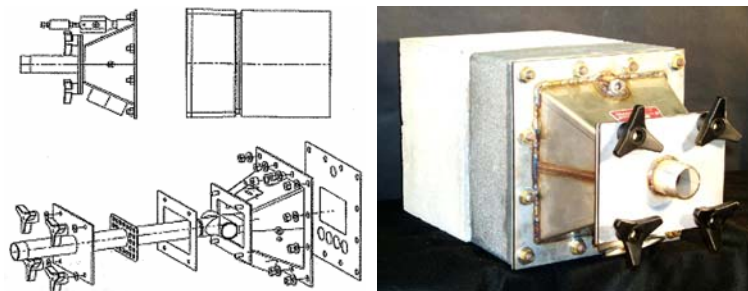


Bild 8: Konstruktion des Brenners.

#### **4 Zusammenfassung**

Eine neue Serie der Sauerstoffbrenner, OXYTHERM LE und OXYTHERM LE FF wurde entwickelt. Ein Teil des Sauerstoffs wird innerhalb des Ofens in eine zweite Stufe der Verbrennung einspeist. Dadurch wird die NO<sub>x</sub> Bildung stark reduziert, die Wärmeentwicklung wird über eine größere Fläche verteilt und heiße Stellen an Decke und Wand werden vermieden. Die neue Konstruktion erfüllt die vielen beliebten Eigenschaften des Standard OXYTHERM Brenners. Düse und Flammenbild können während des Betriebes gewechselt werden, so dass zusätzliche Abschaltungen der Wanne vermieden werden können und die Produktivität erhöht werden kann. Der Aufwand für Ersatzteile und Wartung wird auf ein Minimum reduziert.

#### **5. Danksagung**

Besonderer Dank gilt den Herren Ulrich Conen, Eric van Buinder, Bart Geysken, Peter Meelberghs, Thomas Gruner und Ulrich Lerch für die nützlichen Hinweise.

#### **6. Literatur**

- [1] Lievre, K. et.al.: "Recent developments in oxy-fuel firing for glass melters", Glass Industry (2001) 3, p.25-31.
- [2] Lubitz, G.: „Results obtained with an oxy-fired Furnace with external Heat Recovery“, Int. Glass J (1999) 99, p. 33-36.
- [3] Simpson, N.: "The advanced Generation", proceedings from Glass, April 2003.
- [4] <http://www.maxoncorp.com/catalog/ngb-oxy-fuel-burners.html>