

# Oxy-Fuel-Verbrennung Grundlagen und Anwendungsbeispiele



Oxy-Fuel-Verbrennung:  
Einsatz von reinem Sauerstoff  
anstelle von Luft. Dieses  
Verfahren wird heute in fast  
allen Metallbranchen  
eingesetzt. Aber auch  
Unternehmen aus der Glas-,  
Keramik- und Chemie-  
industrie nutzen die Vorteile  
der Energieersparnis und  
Emissionsminderung.

# Effizienz und geringere Emissionen durch den Einsatz von Sauerstoff

## Grundlagen der Oxy-Fuel-Verbrennung

Bei der Brennstoff-Sauerstoff-Verbrennung wird als Oxidationsmedium technischer Sauerstoff anstatt Luft verwendet. Dadurch wird kein für die Verbrennung überflüssiger Stickstoff durch den Feuerraum geschleust und Ballast im Abgas vermieden. Damit steigen der feuerungstechnische Wirkungsgrad, die maximal erreichbare Flammentemperatur, die Verweilzeit der Verbrennungsgase im Feuerraum und die durch Strahlung erzeugte Wärmeübertragung.

Mit der Oxy-Fuel-Verbrennung lassen sich der Brennstoffverbrauch und die Schadgasemissionen (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) wirkungsvoll senken. Auch die Leistung des Prozesses erhöht sich beträchtlich.

Air Liquide bietet maßgeschneiderte Oxy-Fuel-Feuerungssysteme für zahlreiche Branchen und vielfältige Prozesse an.

## Stöchiometrie der Verbrennung

### Brennstoff-Luft-Verbrennung

Konventionell werden Brennstoffe mit Luft als Oxidationsmedium verbrannt, hier das Beispiel Methanverbrennung:



Für die stöchiometrische Verbrennung von 1 m<sup>3</sup> Methan werden 2 m<sup>3</sup> Sauerstoff benötigt. Da Luft jedoch rund viermal so viel Stickstoff wie Sauerstoff enthält, müssen hierfür 10 m<sup>3</sup> Luft eingesetzt werden. Damit entstehen 11 m<sup>3</sup> Abgas und eine Wärmemenge von 39.796 kJ.

### Oxy-Fuel-Verbrennung

Bei der Oxy-Fuel-Verbrennung dient technischer Sauerstoff als Oxidationsmedium:



Infolge des vermiedenen Stickstoffballasts entstehen je 1 m<sup>3</sup> Methan bei der stöchiometrischen Methanverbrennung lediglich 3 m<sup>3</sup> Abgas bei gleicher freiwerdender Wärmemenge.

Bei beiden Verbrennungsarten verlässt das Abgas den Feuerraum mit einer Temperatur oberhalb der Prozesstemperatur. Wenn keine Wärmerückgewinnung, zum Beispiel zur Vorwärmung des Oxidationsmediums bzw. des Brennstoffs, erfolgt, geht die Wärme des Abgases dem Prozess verloren. Dabei ist die über das Abgas verlorene Wärmeenergie umso größer, je höher die Prozesstemperatur und je größer das Abgasvolumen sind.

**Abbildung 1** zeigt den auf die Abgastemperatur bezogenen feuerungstechnischen Wirkungsgrad für eine Erdgas-Luft- und zum Vergleich für eine Erdgas-Sauerstoff-Verbrennung.

Eine stöchiometrische Verbrennung (vollständige Verbrennung) ist dann gegeben, wenn alle Brennstoff-Moleküle vollständig mit dem Luftsauerstoff reagieren können, ohne dass Sauerstoff fehlt oder unverbrannter Brennstoff (zum Beispiel Methan) übrig bleibt.

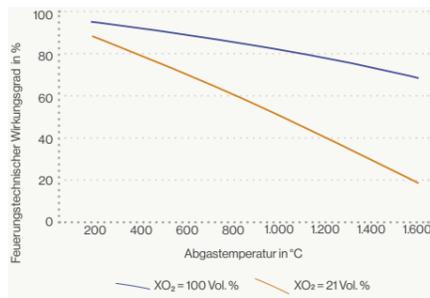


Abb. 1 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad bei Verbrennung von Erdgas mit Luft bzw. reinem Sauerstoff  
Parameter: Lufttemperatur: 20 °C; Luftzahl:  $\lambda = 1,1$   
Brennstoff: Erdgas L,  $H_u = 8,9 \text{ kWh/m}^3$

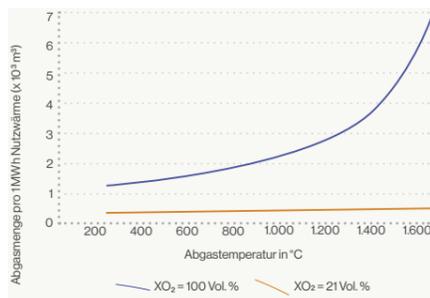


Abb. 2 Abgasmenge einer Erdgas-Luft und einer Erdgas-Sauerstoff-Verbrennung, bezogen auf eine Nutzwärmeleistung von 1 MW

Parameter: Lufttemperatur: 20 °C; Luftzahl:  $\lambda = 1,1$   
Brennstoff: Erdgas L,  $H_u = 8,9 \text{ kWh/m}^3$

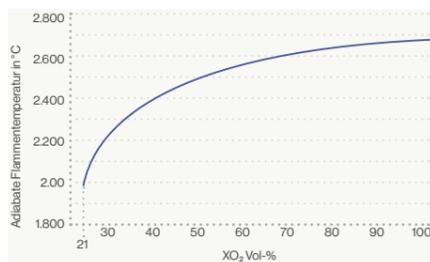


Abb. 3 Adiabate Flammentemperatur der stöchiometrischen Erdgas-Verbrennung

Parameter: Lufttemperatur: 20 °C; Luftzahl:  $\lambda = 1,0$   
Brennstoff: Erdgas (Niederlande),  $H_u = 8,9 \text{ kWh/m}^3$

Die Enthalpie (H) kann auch als Wärmeinhalt eines thermodynamischen Systems bezeichnet werden. Sie ist die Summe aus der inneren Energie (U) und dem Produkt aus Druck (p) und Volumen (V) des Systems. Enthalpie wird in der Einheit Kilowattstunden oder Joule gemessen.

Je höher die Abgastemperatur, desto vorteilhafter gestaltet sich die Energieausnutzung des Brennstoffs bei der Erdgas-Sauerstoff-Verbrennung im Vergleich zur Erdgas-Luft-Verbrennung. Bei einer Abgastemperatur von 1.600 °C können bei der Erdgas-Luft-Verbrennung lediglich 17 % der im Erdgas chemisch gebundenen Enthalpie genutzt werden. Bei der Oxy-Fuel-Verbrennung liegt dieser Wert mit 70 % wesentlich höher. Ursache hierfür ist das erheblich kleinere Abgasvolumen der Erdgas-Sauerstoff-Verbrennung.

Für eine gegebene Nutzwärmeleistung in einem Feuerraum kann somit bei der Oxy-Fuel-Verbrennung weniger Brennstoff eingesetzt werden als bei der Brennstoff-Luft-Verbrennung.

Neben dem vermiedenen Stickstoffballast im Abgas bei der Oxy-Fuel-Feuerung verringert sich hierbei also additiv das Abgasvolumen (Abb. 2).

## Adiabate Flammentemperatur

Bei Verbrennungsprozessen erfolgt eine Umsetzung der im Brennstoff chemisch gebundenen Enthalpie in fühlbare Wärme. Diese wird einerseits im Feuerraum auf das Wärmegut übertragen, andererseits erhitzt sich das entstehende Abgas, das den Ofenraum verlässt. Um verschiedene Brennstoffe, Oxidationsmittel und Feuerungsbedingungen vergleichen zu können, wurde die adiabate Flammentemperatur definiert. Sie beschreibt die maximal auftretende Flammentemperatur unter der Voraussetzung, dass kein Wärmeübertrag an die Umgebung und das Wärmegut stattfindet.

Die tatsächliche Flammentemperatur ist niedriger und prozessabhängig. **Abbildung 3** zeigt die adiabate Flammentemperatur einer Erdgas-Flamme in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration des Oxidationsmediums. Bei einer Erdgas-Luft-Flamme (rund 21 % Sauerstoff) liegt die adiabate Flammentemperatur bei etwa 1.950 °C. Sie steigt bis zu einer Sauerstoffkonzentration von etwa 30 % stark an.

Wird die Sauerstoffkonzentration im Oxidationsmedium weiter erhöht, flacht der Anstieg aber deutlich ab. Die Ursache sind in diesem Temperaturbereich einsetzende Dissoziationsreaktionen der Rauchgaskomponenten CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Sie mildern den weiteren Temperaturanstieg ab.

# Wärmeübertragung und Thermische NO<sub>x</sub>-Bildung

Die Wärmeübertragung von Flamme und Rauchgasen auf Wärmegut und Verbrennungsraum hat eine große Bedeutung. Die thermische NO<sub>x</sub>-Bildung reduziert sich deutlich.

# Wärmeübertragung

Im unteren Temperaturbereich (< 800 °C) ist die Konvektion der dominierende Wärmeübertragungsmechanismus (**Abbildung 4**).

Für einen hohen konvektiven Wärmeübergang ist vor allem ein großes Rauchgasvolumen mit hochturbulentem Strömungszustand günstig. Hier ist die Brennstoff-Luft-Verbrennung von Vorteil.

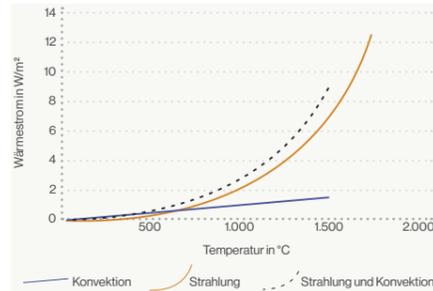


Abb. 4 Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion

Durch externe Rauchgas-Rezirkulation, bei der das durch den Ofenraum geschleuste Gasvolumen erheblich ansteigt, erhöht sich aber wiederum der konvektive Wärmeübergang der Oxy-Fuel-Verbrennung erheblich.

Im oberen Temperaturbereich dominiert die Wärmeübertragung durch Strahlung. Stickstoff nimmt als symmetrisches Molekül nicht daran teil. Da bei der Oxy-Fuel-Verbrennung das Rauchgas nahezu frei von Stickstoff ist und hauptsächlich aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O besteht, ist der radiative Wärmeübertragungskoeffizient erheblich größer als bei der Brennstoff-Luft-Verbrennung.

Bei zusätzlicher Berücksichtigung der höheren Flammentemperatur bietet die Oxy-Fuel-Verbrennung durch Strahlung also eine erheblich bessere Wärmeübertragung. Damit ist die Oxy-Fuel-Verbrennung der Brennstoff-Luft-Verbrennung klar überlegen. Diese Überlegenheit nimmt bei weiter steigenden Prozesstemperaturen sogar noch zu (**Abbildung 4**).

## Stickoxid-Bildung

Die bei der Verbrennung entstehenden Stickoxide (NO<sub>x</sub>) schaden unserer Umwelt (zum Beispiel als eine Ursache für sauren Regen). Die mit der Flamme entstehenden Stickoxide bilden sich auf drei unterschiedliche Arten:

- 1. Bildung von NO<sub>x</sub> aus dem molekularen Stickstoff** von Verbrennungsluft und eintretender Falschluff oder dem molekularen Stickstoffanteil des Brennstoffs (zum Beispiel Erdgas L). NO<sub>x</sub> entsteht hierbei in den heißesten Zonen („thermisches NO<sub>x</sub>“).
- 2. Bildung von NO<sub>x</sub> aus organisch gebundenen Stickstoffkomponenten des Brennstoffs** (Fuel-NO<sub>x</sub>). Die NO<sub>x</sub>-Bildung erfolgt über ein komplexes System zahlreicher chemischer Reaktionen. Brennstoffe mit organisch gebundenen Stickstoffkomponenten sind zum Beispiel schweres Heizöl und Kohle. Da diese Brennstoffe für technische Feuerungen in der westlichen Welt zunehmend an Bedeutung verlieren, wird auf diesen Punkt im Folgenden nicht eingegangen.
- 3. Bildung von NO<sub>x</sub> aus molekularem Stickstoff über den Fuel-NO<sub>x</sub>-Mechanismus.** Die auf diesem Weg gebildete NO<sub>x</sub>-Menge ist klein und damit vernachlässigbar.

Konvektion (Wärmeströmung) ist ein Mechanismus zur Wärmeübertragung von Energie von einem Ort zu einem anderen. Andere Methoden der Wärmeübertragung sind Wärmeleitung und Wärmestrahlung.

Konvektion ist stets mit dem Transport von Teilchen verknüpft, die ihre Energie mitführen. Sie ist in Gasen oder Flüssigkeiten kaum zu vermeiden. Durch die Reduktion von Stickstoff kann sie jedoch verringert und somit eine effizientere Wärmeübertragung erzielt werden.

# Thermische NO<sub>x</sub>-Bildung

Die NO<sub>x</sub>-Bildung kann nach den Gleichungen 1 und 2 (Zeldovich-Mechanismus) beschrieben werden. Das Reaktionssystem stellt dabei eine Reaktionskette dar (Kettenstartreaktion Gl. 1):



Es hat sich gezeigt, dass die zweite Reaktion (Gleichung 2) unter hohen Temperaturen wesentlich schneller abläuft als die erste (Gleichung 1).

Mit steigender Temperatur erhöht sich die NO<sub>x</sub>-Bildung erheblich. Modellrechnungen zeigen, dass eine nennenswerte NO<sub>x</sub>-Bildung in realen Feuerungen erst ab etwa 1.300 °C beginnt, da erst dann ausreichende Mengen an freien Sauerstoffradikalen vorliegen. Maßgeblich hierfür sind die maximal auftretende Flammentemperatur und die Temperaturspitzen.

Oxy-Fuel-Brenner nutzen als Oxidationsmedium Sauerstoff, der nahezu frei von Stickstoff ist. Stickstoff gelangt hier in geringen Mengen nur durch den Brennstoff (zum Beispiel Erdgas) und durch eventuell eingesaugte Falschluff in den Feuerraum.

Infolge der hohen Flammentemperaturen bei der Oxy-Fuel-Verbrennung ist der Konversionsgrad zu NO<sub>x</sub> jedoch recht hoch. Das Abgas von konventionellen Oxy-Fuel-Brennern weist daher in der Regel höhere NO<sub>x</sub>-Konzentrationen auf. Aufgrund der geringen Abgasmenge ist jedoch die insgesamt emittierte NO<sub>x</sub>-Fracht bei diesem Verfahren deutlich kleiner.

## NO<sub>x</sub>-arme Oxy-Fuel-Brenner

Um die NO<sub>x</sub>-Emissionen von Oxy-Fuel-Brennern weiter zu verringern, hat Air Liquide NO<sub>x</sub>-arme Brenner entwickelt. Wichtigste Maßnahme ist das Absenken der maximal auftretenden Flammentemperatur auf einen Wert möglichst nahe der Prozesstemperatur. Die interne und externe Abgas-Rezirkulation ist hierzu ein bewährtes Mittel.

Mit der Stufenverbrennung kann darüber hinaus der Sauerstoffpartialdruck in Zonen hoher Temperatur verringert werden. In **Abbildung 5** sind die NO<sub>x</sub>-Abgaskonzentrationen eines derartigen Oxy-Fuel-Brenners abhängig von der Brennkammertemperatur aufgetragen und werden mit denen eines konventionellen Oxy-Fuel-Brenners verglichen.

Bei einer Brennkammertemperatur von 1.400 °C liegen die NO<sub>x</sub>-Konzentrationswerte eines Standardbrenners zwischen etwa 2.500 und 3.200 mg/m<sup>3</sup>, die eines NO<sub>x</sub>-armen Brenners lediglich zwischen etwa 130 und 220 mg/m<sup>3</sup>. Dies entspricht einer Reduktion von mehr als 90 %.

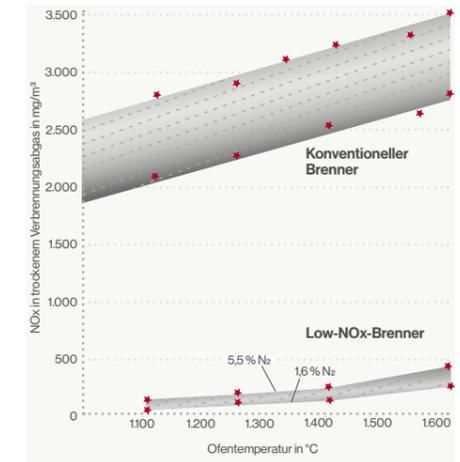


Abb. 5 NO<sub>x</sub>-Konzentration, gerechnet als NO<sub>2</sub> (trockenes Abgas, 3 % O<sub>2</sub>), unter Einsatz von Erdgas H

Oxy-Fuel-Brenner nutzen nahezu stickstofffreien Sauerstoff. Infolge der hohen Flammentemperaturen ist der Konversionsgrad bei konventionellen Brennern zu NO<sub>x</sub> zwar recht hoch, die emittierte NO<sub>x</sub>-Menge fällt jedoch durch die geringe Abgasmenge deutlich kleiner aus.

Komplettpaket:  
Air Liquide konzipiert,  
produziert und installiert  
maßgeschneiderte  
Oxy-Fuel-Feuerungssysteme

# Anwendungen von Oxy-Fuel-Feuerungssystemen

## Oxy-Fuel-Brenner

Die Vorteile der Oxy-Fuel-Verbrennung finden in vielen Industriezweigen wie der Metall-, Glas-, Keramik- und Zement-Industrie Anwendung. Die Oxy-Fuel-Feuerungssysteme bestehen im Wesentlichen aus dem Brenner, der Mess- und Regeltechnik für die erforderlichen Medien, der elektronischen Brennerregelung sowie eventuell notwendigen mechanischen Hilfseinrichtungen.



Abb. 6 ALBATICH-Brenner für Drehtrommelöfen

Oxy-Fuel-Brenner werden in unterschiedlichen Bauformen angeboten, zum Beispiel als metallische Brenner für Drehtrommel- oder Lichtbogenöfen oder als keramischer Brenner, etwa für Glaswannen oder Anwärmöfen. Zur Produktpalette gehören Oxy-Fuel-Brenner für unterschiedliche flüssige und gasförmige Brennstoffe in einem breiten thermischen Leistungsbereich. Neu entwickelte Sauerstoffbrenner (**Abbildung 6**) minimieren die NO<sub>x</sub>-Emissionen durch Nutzung der „gestuften Verbrennung“ und einer internen Abgas-Rezirkulation. Diese Mechanismen werden bei der flammlosen Verbrennung genutzt, um sehr geringe NO<sub>x</sub>-Emissionen zu erreichen.



Abb. 7 ALBATICH-Brenner in einem kippbaren Aluminium-Drehtrommelofen

## Metall-Schmelzöfen

Zum Einschmelzen der Nichteisenmetalle Aluminium und Buntmetall im Drehtrommelofen (**Abbildung 7**) hat sich die Befuerung mit Brennstoff und technischem Sauerstoff durchgesetzt. Neben der hohen Schmelzleistung ist vor allem die größere Ausbringung von Metall vorteilhaft. Schrotte mit brennbaren Anhaftungen können direkt im Ofen verarbeitet werden. Die sich bildenden Pyrolysegase verbrennen durch eine spezielle Steuerung direkt im Ofen und reduzieren damit den Brennstoffbedarf.

Die Kombination aus Brennstoff-Sauerstoffbrenner und Nachverbrennung wird auch in Herdöfen genutzt (**Abbildung 8**). Zusätzlich zu der Energieersparnis spielt die Reduzierung der Emissionen an CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> eine bedeutende Rolle.



Abb. 8 Herdofen mit Sauerstoffbrenner

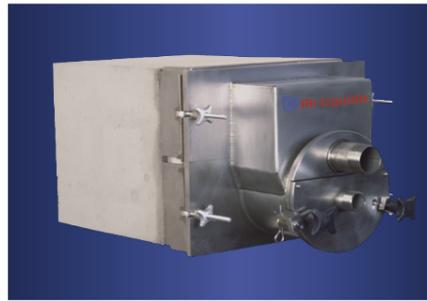


Abb. 9 ALGLASS-FC-Brenner

## Glaswannen

Auch für die Glasindustrie wird die Beheizung mit Sauerstoff zur Steigerung der Schmelzleistung, der Energieeinsparung und Emissionsminderung genutzt (Abbildungen 9 und 10). Gerade bei hohen Glas-Schmelztemperaturen bis 1.600 °C können die Abgasgrenzwerte für NO<sub>x</sub> unter Umständen nur durch eine Abgasbehandlung eingehalten werden.

Bei der Oxy-Fuel-Befuerung ohne den Stickstoffeintrag über die Verbrennungsluft lässt sich die Massenfracht an NO<sub>x</sub> drastisch senken. Air Liquide hat ein Verfahren entwickelt, bei dem Erdgas und Sauerstoff vor der Verbrennung durch die Ofenabgase vorgewärmt werden. Damit können gleichzeitig Energiekosten und Emissionen noch einmal gesenkt werden. Weitere etwa 10 % Ersparnis sind mit diesem Verfahren von Air Liquide realisierbar.

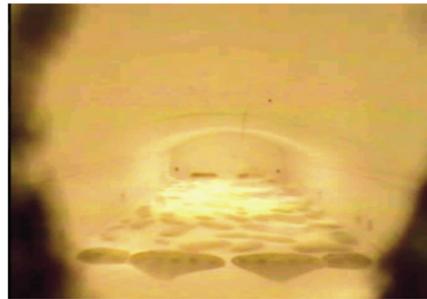


Abb. 10 ALGLASS-FC-Brenner mit flacher Flamme für optimale Wärmeübertragung auf das Glasbad

## Zement-Drehrohr

Zur Herstellung von Zement wird gemahlener Kalkstein mit weiteren Rohstoffen in einem langen Drehrohr (Abbildung 11) zu Klinker verarbeitet. Dabei wird das Rohmehl bei ca. 1.450 °C gebrannt. Aus Kostengründen arbeiten die Brenner mit verschiedenen sogenannten Ersatzbrennstoffen, die gegenüber Kohle oder Öl teilweise einen geringeren Heizwert haben. Durch eine Sauerstoffzugabe, zum Beispiel direkt in die Flamme, wird die Verbrennung durch eine höhere Flammentemperatur und bessere Zündeigenschaften intensiviert. Der Anteil an Ersatzbrennstoffen kann dadurch weiter gesteigert und der spezifische Energieverbrauch und damit auch die Brennstoffkosten gesenkt werden. Zusätzlich leistet die Verbrennung mit Sauerstoff einen Beitrag zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

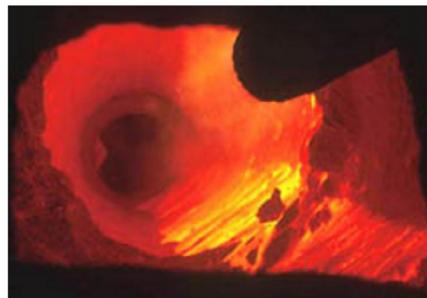


Abb. 11 Zementdrehrohr

## Die Vorteile der Oxy-Fuel-Verbrennung auf einen Blick

- Besserer Wirkungsgrad (steigt weiter mit höherer Prozesstemperatur)
- Geringe Emissionen der Schadgase CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>
- Steigerung von Ersatzbrennstoffen durch Sauerstoff unterstützte Verbrennung möglich
- Leistungssteigerung bei bestehenden Feuerungsanlagen
- Wesentlich verringerte Abgasmenge reduziert den Aufwand der Abgasreinigung erheblich
- Erheblich höhere radiative Wärmeübertragung
- Weiter sinkende NO<sub>x</sub>-Emissionen durch den Einsatz NO<sub>x</sub>-armer Oxy-Fuel-Brenner
- Geringerer Brennstoffverbrauch

## Abfallverbrennung

Bei der Sonderabfall-Verbrennung (Abbildung 12) verbessert die Sauerstoffzugabe die Durchsatzleistung, Wirtschaftlichkeit und die Nachverbrennung. Gerade für thermische Verfahren, die durch auftretende Heizwertschwankungen einen permanent veränderten Luftbedarf aufweisen, bietet der gezielte Sauerstoffeinsatz eine wirtschaftliche Möglichkeit, den Ausbrand zu optimieren und die Abgaswerte auch bei höheren Durchsatzleistungen einzuhalten. Es sind bereits Anwendungen mit der Sauerstoff-Verfahrenstechnik in Drehrohröfen, Wirbelschichtöfen und Nachbrennkammern realisiert worden.



Abb. 12 Abfallverbrennungsanlage

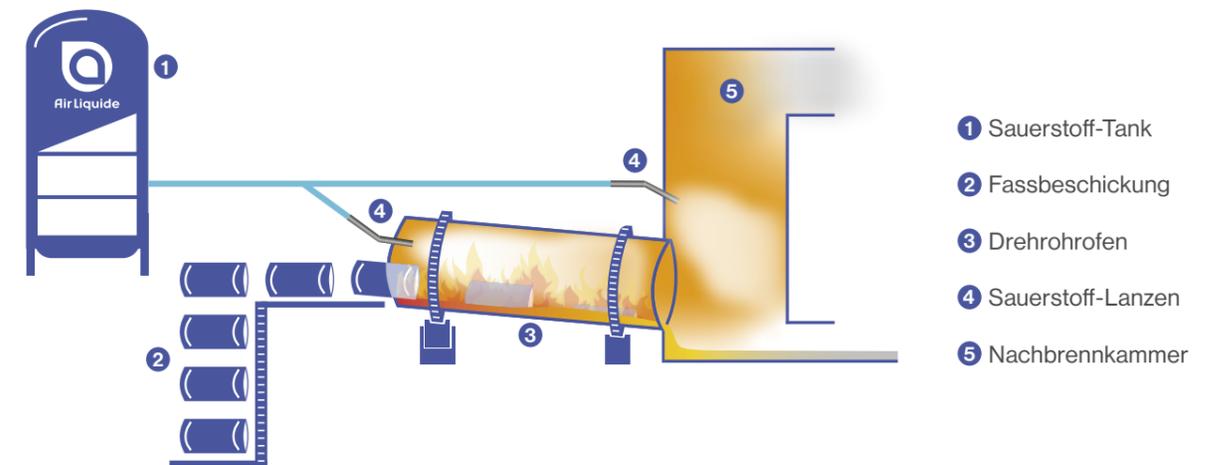


Abb. 13 Drehrohröfen und Nachbrennkammer mit Sauerstoff-Eindüsung

Für die Entsorgung von Sondermüll hat sich der Drehrohröfen mit Nachbrennkammer bewährt. Bei der Aufgabe von Fassware mit heizwertreichen Abfällen wurden wegen wechselnder feuerungstechnischer Bedingungen die CO-Grenzwerte der TA-Luft bei konventioneller Fahrweise teilweise überschritten. Zur Optimierung der Verbrennung wurden Sauerstoff-Lanzen in der Frontplatte des Drehrohröfens sowie in der Nachbrennkammer installiert. Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn Sauerstoff entweder im Drehrohr oder im Drehrohr und der Nachbrennkammer in Kombination eingesetzt wurde (Abbildung 13).

Neben der Abfallverbrennung mittels Fasszuführung hat Air Liquide eine spezielle Sauerstoff-Zerstäuberlanze für die Verbrennung von flüssigen Abfallstoffen entwickelt. Sie sorgt für eine schnelle Zündung und eine bessere Verbrennung.

Wegen diverser Verordnungen darf in der Landwirtschaft immer weniger Klärschlamm als Dünger eingesetzt werden. Daher wird Klärschlamm zunehmend in Wirbelschichtöfen verbrannt. Um die Leistung von Klärschlammverbrennungsanlagen wesentlich zu steigern, wird Sauerstoff entweder direkt oder durch Anreicherung der Verbrennungsluft in die Feuerung eingetragen. Die individuelle Anpassung der Sauerstoff-Verfahrenstechnik an die spezifischen Randbedingungen der Verbrennungsgasanlagen sichert neben der größeren Kapazität eine hohe Wirtschaftlichkeit. Bei geringen Investitionskosten lässt sich der Primärenergieverbrauch bei höherer Anlagenflexibilität reduzieren.

In der Abfallverbrennung wird Sauerstoff zur Unterstützung der Feuerung eingesetzt. Typische Einsatzgebiete sind die Sonderabfall- und Klärschlammverbrennung.

## Kontakt

---

**Air Liquide Deutschland GmbH**  
Fütingsweg 34  
47805 Krefeld  
Tel: +49 2151 379-0  
metall@airliquide.de

[www.airliquide.de](http://www.airliquide.de)



Air Liquide ist ein Weltmarktführer bei Gasen, Technologien und Services für Industrie und Gesundheit. Mit rund 66.000 Mitarbeitern in 80 Ländern versorgt Air Liquide mehr als 3,6 Millionen Kunden und Patienten.

