

Energieeffizienz und Minderung des CO₂-Ausstoßes durch Sauerstoffverbrennung

Energy efficiency and decrease of CO₂ by oxyfuel combustion

Herbert Pfeifer, Werner Högner, Patrik Fredriksson, Joachim von Schéele und Rainhard Paul

Die Sauerstofftechnologie ist für die Prozesse in der Stahlindustrie von zunehmender Bedeutung. Nachdem in der Vergangenheit in erster Linie die Leistungssteigerung und Kostenreduzierung im Vordergrund stand, wird der Einfluss auf die Reduzierung der Energie und Ausstoß der Emissionen zukünftig immer häufiger in den Fokus rücken. Der Beitrag beschreibt den Einfluss der Sauerstofftechnologie zur Steigerung der Energieeffizienz am Elektrolichtbogenofen sowie die Auswirkungen der flammenlosen Sauerstoffverbrennung zur Energiereduzierung und Minderung des CO₂-Ausstoßes bei Schmelz- und Aufwärmprozessen, auch unter Nutzung vorhandener Hochofen- und Konvertergase.

The use of oxygen technologies within the steel industry has become increasingly important. During the last decades increased throughput capacity and lowered average cost have been the driving forces, however, today the positive impact on energy savings and reduced emissions have come into the focal point, a fact that seems to be even further pronounced in the future. The article describes how the oxygen technologies can contribute to an increased energy efficiency in the electric arc furnace process, how flameless oxygen combustion reduces fuel consumption and CO₂ emission in melting and heating operations, and how low calorific gases, for example blast furnace top gas and converter gas, can be effectively used to further improve the overall energy efficiency, reduce CO₂ emission, and reduce costs.

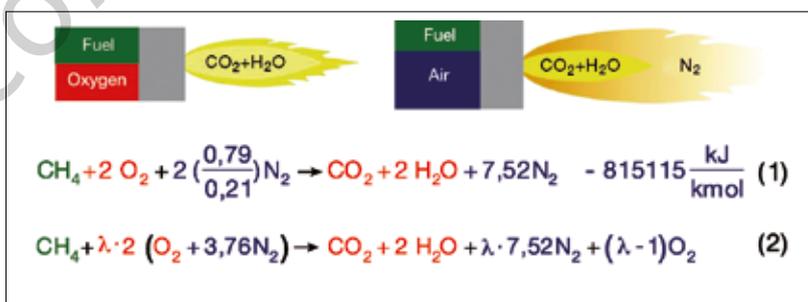
Die Entwicklung der Thermoprozesstechnik war in der Vergangenheit und wird noch vermehrt in der Zukunft u. a. von den nachfolgenden Randbedingungen vorangetrieben:

- Reduzierung der Emissionen (CO₂ und NO_x)
- Steigerung der Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen
- Steigerung der Produktivität und Verfügbarkeit der Anlagen
- Verbesserung der Produktqualität.

Die Reduzierung von CO₂-Emissionen ist und bleibt eine gesellschaftlich-technische Problemstellung, der sich die Anlagenbauer und -betreiber stellen müssen. Dieses Thema ist jedoch direkt mit der Steigerung der Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen gekoppelt. Hier haben die extremen Schwankungen der Energiepreise der letzten Zeit deutlich gemacht, dass auch aus dieser Sichtweise das Thema „Energieeffizienz“ hochaktuell ist und sicherlich auch zukünftig sein wird.

Für eine gegebene Aufgabenstellung in der Hochtemperaturtechnik sind übliche Beheizungsverfahren

- die Verbrennung gasförmiger Brennstoffe mit Luft, wobei zur Steigerung des feuerungstechnischen



1

Vergleich der Verbrennung von Methan mit Luft und der Oxyfuel-Technik
Comparison of combustion of methane with air and oxyfuel technology

Wirkungsgrades hohe Luftvorwärmungen angestrebt werden,

- die Verbrennung von Brennstoffen mit reinem Sauerstoff (Oxyfuel) als Oxidator und
- die elektrische Beheizung.

Für die vollständige Bewertung der Effizienz sowie der Nachhaltigkeit dieser Verfahren sind auch die Herstellungsprozesse von Sauerstoff bzw. elektrischer Energie aus primärenergetischer Sicht bzw.

Komponente	Zusammensetzung in % Volumenanteil			
	Russisches Erdgas	Hochofengas	Konvertergas	Koksofengas
CO ₂	0,08	22,0	17,8	2,3
N ₂	0,84	52,5	12,1	7,3
O ₂	<0,01	-	0,1	0,9
CO	-	21,4	62,5	5,8
H ₂	-	4,1	7,5	56,8
CH ₄	98,30	-	-	23,7
C ₂ H ₆	0,52	-	-	-
C ₃ H ₈	0,17	-	-	-
C ₄ H ₁₀	0,06	-	-	-
C ₅ H ₁₂	0,02	-	-	-
C ₆₊	0,01	-	-	-
Heizwert kJ/m ³	35 890	3 150	8 705	18 165
kWh/m ³	10,0	0,875	2,42	5,05
Verbrennung mit Luft:				
Luftbedarf m ³ /m ³ _B	9,54	0,6	1,66	4,39
Abgasvolumen m ³ _A /m ³ _B	10,34	1,48	2,31	5,09
Adiabate Verbrennungstemperatur in °C	2 040	1 270	2 047	2 100
Verbrennung mit Sauerstoff:				
Sauerstoffbedarf m ³ _O /m ³ _B	2,00	0,128	0,349	0,92
Abgasvolumen m ³ _A /m ³ _B	3,00	1,00	1,00	1,63
Adiabate Verbrennungstemperatur in °C	2 780	1 685	2 447	2 745

2

Typische Brenngaszusammensetzungen und Verbrennungskenndaten [2]

Composition and combustion data of typical gaseous fuels [2]

den zugeordneten indirekten CO₂-Emissionen zu berücksichtigen.

Der Einsatz von Sauerstoff ist in der Stahlindustrie für den Hochofen-, Konverter- und Elektrolichtbogenofenprozess kein Neuland. Zunehmend wird aber auch die Sauerstofftechnologie für Aufwärmprozesse [1] unter Einsatz der Brennstoff-Sauerstoff (Oxyfuel)-Verbrennung in den Fokus rücken.

Unter den ökonomischen und ökologischen Vorgaben sind Entwicklungen zur verbesserten Energieeffizienz und die damit verbundene Reduzierung des CO₂-Ausstoßes zwingend. Dazu wird der Einsatz der in den letzten Jahren entwickelten Oxyfuel-Technologie einen Beitrag liefern können.

Verbrennung gasförmiger Brennstoffe mit Luft bzw. reinem Sauerstoff

Die Reaktionsgleichung für die Verbrennung von Methan (CH₄), dies entspricht mit geringfügigen Abweichungen der Zusammensetzung von russischem Erdgas, ist in Bild 1 dargestellt. Für die stöchiometrische Verbrennung (Luftverhältnis λ=1) mit reinem Sauerstoff ist ersichtlich, dass pro m³ Brennstoff je 2 m³ Sauerstoff benötigt werden und abgasseitig 1 m³ CO₂ und 2 m³ Wasser (dampfförmig) entstehen. Dies entspricht ca. 0,2 kg CO₂/kWh_B. Bei der Verbrennung mit Luft werden zusätzlich 7,5 m³ inerte Stickstoff (Ballast) durch den Prozess geführt. Bei überstöchiometrischer Verbrennung erhöht sich dieser Anteil proportional mit dem Luftverhältnis λ und es liegt zusätzlich noch Sauerstoff im Abgas vor.

Prozesstechnisch hat die Verbrennung gasförmiger Brennstoffe mit reinem Sauerstoff zur Folge, dass neben den verringerten Abgasverlusten aufgrund des fehlenden Luftstickstoffs sich u. a. die adiabate Verbrennungstemperatur und die Gasstrahlung erhöht.

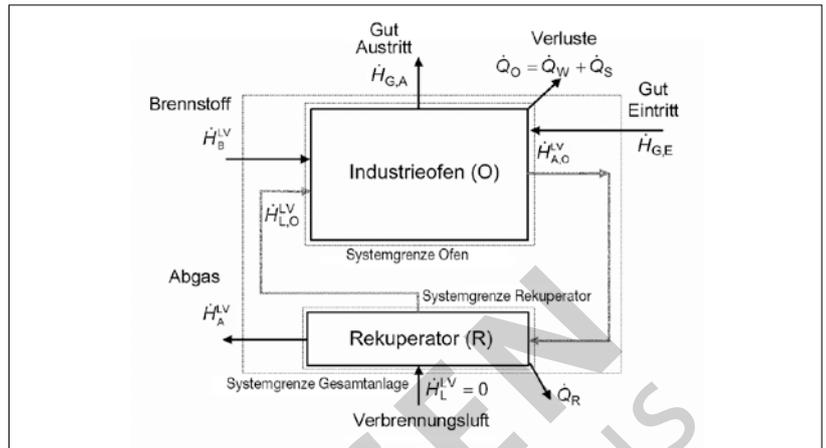
Aktualisierte Version eines Vortrags auf der Jahresveranstaltung STAHL 2008 am 13. November 2008 in Düsseldorf.

Prof. Dr.-Ing. **Herbert Pfeifer**, RWTH Aachen, Aachen; Dipl.-Ing. **Werner Högner**, ThyssenKrupp Steel AG, Duisburg; Dr. **Patrik Fredriksson**, Ovako, Hofors, Schweden; Dr. **Joachim von Schéele**, Dipl.-Ing. **Rainhard Paul**, Linde Group, Hamburg.

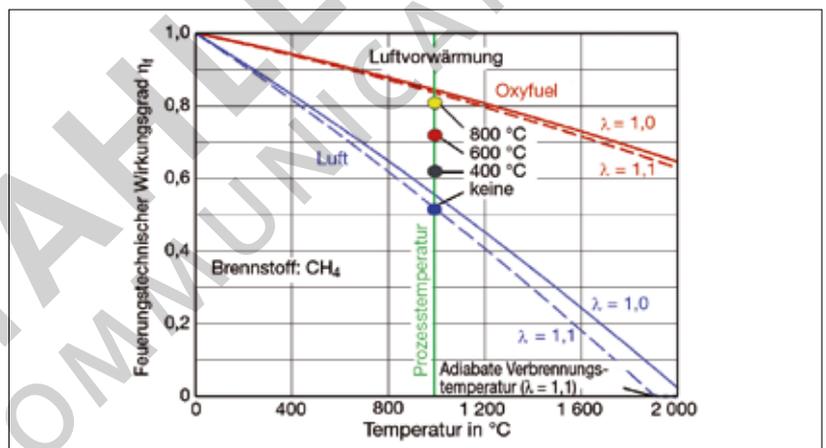
Bei gleichem Ofenraumvolumen steigt somit auch die Verweilzeit des reagierenden Gasgemischs im Ofen und die Querschnitte des Abgassystems können kleiner gewählt werden. Dadurch, dass bei der Verbrennung mit reinem Sauerstoff die Abgasmenge um den Stickstoffanteil der Verbrennungsluft niedriger ist, sind bei gleicher Prozesstemperatur die Abgasverluste ohne weitere Wärmerückgewinnungsmaßnahmen ebenfalls niedriger, da keine Abgasverluste durch den Stickstoffballast auftreten. Ein Indiz dafür ist die adiabate Verbrennungstemperatur, die für die Verbrennung von Erdgas mit Luft ca. 2000 °C beträgt und für die Verbrennung mit reinem Sauerstoff ca. 2800 °C, Bild 2. Darüber hinaus besteht das Verbrennungsgas bei der Verbrennung von Methan mit Sauerstoff lediglich aus H₂O (66 %) und CO₂ (33 %). Die für den Wärmeübergang relevante Gasstrahlung erhöht sich dadurch.

Bild 3 zeigt das Schema eines Industrieofens mit Luftvorwärmung. Für die Minimierung des Energieeinsatzes sind alle Verluste des Ofens (Wandverluste \dot{Q}_W Abstrahlungsverluste \dot{Q}_S , Rekuperatorverluste \dot{Q}_R und Kühlwasserverluste \dot{Q}_{KW}) einschließlich der Abgasverluste \dot{H}_A zu minimieren. Dabei stellen die Abgasverluste den höchsten Verlustterm dar. Die Abgasverluste werden durch die Luftvorwärmung in Wärmetauschern (Zentralrekuperatoren, Rekubrennern oder Regeneratorbrennern) minimiert. Alternativ kann die spezifische Abgasmenge durch die Verbrennung mit Sauerstoff (Ausschluss des Luftstickstoffs) erreicht werden. Den zusätzlichen Kosten für Sauerstoff der Oxyfuel-Technik mit einfachen Brennerkonstruktionen stehen bei den Anlagen mit Luftvorwärmung höhere Kosten für die komplexeren Brennersysteme und deren Wartungsaufwand gegenüber. Bild 3 zeigt, dass sich der Gesamtwirkungsgrad des Ofens η_{ges} aus den Teilwirkungsgraden Ofengütegrad oder Reaktorwirkungsgrad η_O und Feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_f zusammensetzt. Dieser beschreibt die Differenz zwischen der zugeführten Brennstoffenergie und der über das Abgas abgeführten Energie. Der Feuerungstechnische Wirkungsgrad für Methan (russisches Erdgas) in Abhängigkeit der Abgastemperatur am Austritt aus dem Reaktor ist in Bild 4 für die Verbrennung mit Luft bzw. Sauerstoff für die Luftverhältnisse $\lambda = 1,0$ und $\lambda = 1,1$ dargestellt.

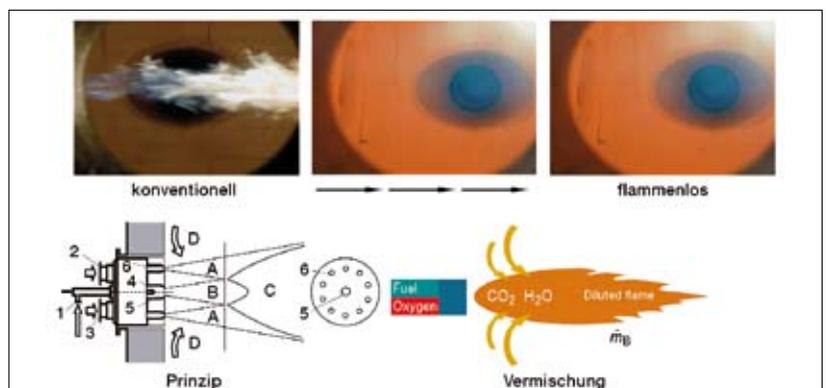
Aufgrund des in der Luft enthaltenen hohen Stickstoffanteils wirkt sich ein höherer Luftfaktor bei der Verbrennung mit Luft stärker in der Absenkung des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades aus als bei der Verbrennung mit Sauerstoff. Damit bei der Verbrennung mit Luft bei gleichen Prozesstemperaturen bzw. Abgasaustrittstemperaturen in Hochtemperaturprozessen der Feuerungstechnische Wirkungsgrad gesteigert werden kann, ist eine Luftvorwärmung erforderlich, wobei die Temperatur-



3 Energiebilanzen und Systemgrenzen eines Industrieofens mit Luftvorwärmung [2]
Energy balances and system boundaries of an industrial furnace with air preheating [2]



4 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad für die Verbrennung von Methan als Funktion der Prozesstemperatur bzw. der Austrittstemperatur der Abgase und Einfluss der Luftvorwärmung
Combustion efficiency for the combustion of methane vs process temperature (parameter: air preheating temperature)



5 Übergang der konventionellen Verbrennung zur flammenlosen Verbrennung
Change from conventional combustion to flameless oxidation

Stromverbrauch für Sauerstoffherstellung	0,5 kWh _{el} /m ³ O ₂
CO ₂ -Freisetzung für Strommix (Deutschland) [6]	0,6 kg CO ₂ /kWh _{el}
CO ₂ -Emissionen (indirekt) für Sauerstoffherstellung	0,3 kg CO ₂ /m ³ O ₂
CO ₂ -Emissionen für Erdgasverbrennung mit Luft (Russisches Erdgas ca. 100 % CH ₄)	0,20 kg CO ₂ /kWh _{el}
Verbrennung Kohlenstoff mit Sauerstoff	1,964 kg CO ₂ /m ³ O ₂ 3,66 kg CO ₂ /kg C

6

Bewertungskennzahlen für CO₂-Emissionen

Evaluation data for CO₂ emissions

	Fossil	Wasser- kraft	Kernkraft	kg CO ₂ / kWh _{el}
Deutschland	62 %	3 %	24 %	0,612
Frankreich	9 %	9 %	78 %	0,088
Schweden	2 %	47 %	45 %	0,017

7

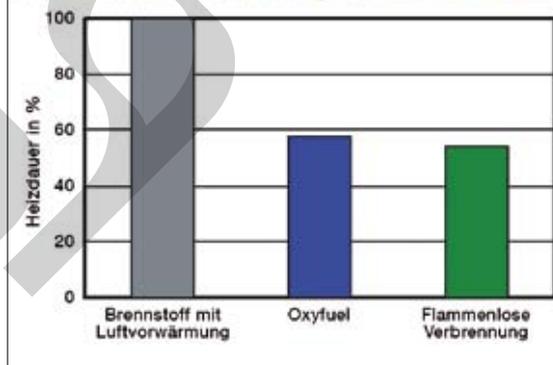
Struktur der Elektrizitätswirtschaft verschiedener Länder und zugeordnete CO₂-Emissionen [7]

Mix of electric power industries of various countries and related CO₂ emissions



8

Drehherdofen bei Ovako Steel (Hofors) mit Oxyfuel-Brennern (a) sowie Einfluss der Brennersysteme auf die Wärmzeit (b) Rotary hearth furnace at Ovako Steel (Hofors) with oxyfuel-burners (a) and influence of the burner systems on the heating time (b)



werte von 400, 600 und 800 °C stellvertretend sind für einen metallischen Zentralrekuperator sowie dezentrale Rekuperativ- bzw. Regenerativbrenner [3]. Die Abgasverluste sind umgekehrt proportional zum Feuerungstechnischen Wirkungsgrad. Die Steigerung des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades ist aus der Sicht der Luftvorwärmung mit zusätzlichen Kosten, die

mit zunehmender Luftvorwärmung deutlich steigen (höherwertige Werkstoffe, komplexere Brennerkonzepte, Wartungsaufwand etc.), verbunden. Aber auch aus der Sicht der Verbrennung mit reinem Sauerstoff, wo die zusätzlich zum Brennstoff aufzubringenden Kosten für den Sauerstoff zu berücksichtigen sind, treten Mehrkosten auf. Die Kosten werden sich je nach Erfolg der Maßnahme unterschiedlich schnell amortisieren. Ein Vorteil des Sauerstoffbrenners ist dessen relativ einfacher Aufbau (Kosten) und auch der geringe Platzbedarf am Ofen.

Einsatz von Sauerstoff in Wiedererwärmungsöfen

Für den Einsatz der Oxyfuel-Technik in Industrieöfen muss aufgrund der örtlich hohen Temperaturspitzen auch die NO_x-Bildung berücksichtigt werden, da die Kuppelgase der Stahlindustrie und auch Erdgase (z.B. niederländisches Erdgas) Stickstoffgehalte von mehr als 7 % aufweisen. Die flammenlose Verbrennung, die bei der Verbrennung von gasförmigen Brennstoffen bei hoher Luftvorwärmung bereits erfolgreich zur NO_x-Minimierung eingesetzt werden konnte, kann ebenfalls bei der Verbrennung mit reinem Sauerstoff [4] realisiert werden, Bild 5. Oberhalb der Sicherheitstemperatur von 750 °C [5] können Brennstoff und Oxidator örtlich verteilt in den Brennraum eingeleitet werden. Dadurch wird die Verbrennung zeitlich und örtlich erweitert, was eine gleichmäßige Temperaturverteilung ohne ausgeprägte Temperaturspitzen in der „Flamme“ zur Folge hat. Dies wird durch die Vermischung der Flamme mit Verbrennungsgasen noch verstärkt. Durch die Vermeidung der Temperaturspitzen lassen sich niedrigste NO_x-Gehalte realisieren.

Bewertung der CO₂-Emissionen

Bei der Bewertung der CO₂-Emissionen unter verschiedenen Gesichtspunkten ist zum einen der Kennwert für die Stromerzeugung, Bild 6, der von der jeweiligen Infrastruktur der Elektrizitätswirtschaft verschiedener Länder, Bild 7, abhängt, und zum anderen der Stromeinsatz für die Sauerstoffherstellung, der ebenso variieren kann, von Bedeutung. Für den letzteren Kennwert wird hier ein Wert von 0,5 kWh_{el}/m³ O₂ angenommen.

Fallbeispiele für die Optimierung von Erwärmungsöfen

Vorgestellt werden einige Beispiele für optimierte Erwärmungsöfen.

Tief- und Drehherdöfen bei Ovako. Die Firma Ovako in Hofors, Schweden, kann als Pionier der Oxyfuel-Technologie bezeichnet werden [8]. Seit 1994 wurden die Luft-Brennstoff-Brenner an 48 Tieföfen und zwei Drehherdöfen, Bild 8, durch Sauerstoff-

brenner mit flammenloser Verbrennung ausgetauscht und nachstehende Ergebnisse erzielt:

- 43 % kürzere Aufwärmzeiten im Vergleich zu den alten rekuperativen Luft-Brennstoff-Systemen,
- 35 % Brennstoffeinsparung und Reduzierung der CO₂-Emissionen (bezogen auf die Systemgrenze „Ofen“) im Vergleich zu rekuperativen Luft-Brennstoff-Systemen.

In einem zweiten Schritt wurde die Technik der flammenlosen Verbrennung eingesetzt. Dadurch wurden weitere Erfolge erzielt:

- 17 % mehr Energieeinsparungen bei der flammenlosen Verbrennung im Vergleich zur konventionellen Oxyfuel-Verbrennung,
- verbesserte Wärmeverteilung im Ofen,
- Ultra-low-NO_x-Emissionen <75 mg/MJ.

55-t/h-Drehherdofen bei ArcelorMittal. Bei diesem Ofen in Shelby in Ohio, USA, handelt es sich um einen Drehherdofen für die Anwärmung runder Knüppel für eine nachfolgende Rohrwalzstraße. Dieser wurde im August 2007 als Turnkey-Projekt aus folgenden Gründen auf flammenlose Oxyfuel-Technik umgebaut:

- Erhöhung der Produktivität der Rohrwalzstraße von 55 t/h auf 68 t/h (+25 %) für Rohre (Durchmesser: 165 mm) durch größere Knüppelabmessungen,
- Senkung des spezifischen Energieeinsatzes des Drehherdofens um 50 % durch flammenlose Oxyfuel-Brenner,
- verbesserte Temperaturgleichmäßigkeit,
- 50 % weniger Zunderbildung sowie
- 75 % geringere NO_x-Emissionen.

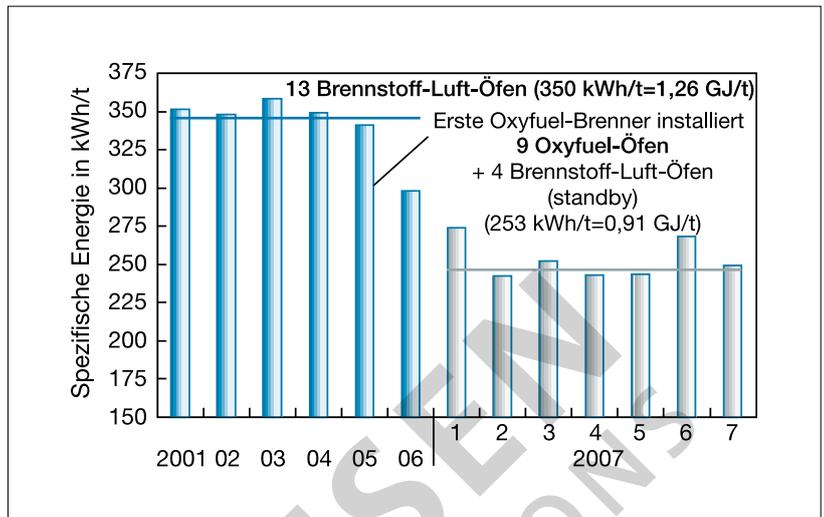
Als Maßnahmen wurden u. a. durchgeführt:

- Ersatz der vorhandenen Brennstoff-Luft-Brenner (32 MW) durch keramische selbstkühlende flammenlose Oxyfuel-Brenner (17,9 MW)
- Erhöhung der Zonenzahl von vier auf fünf mit geeigneter Temperaturmesstechnik
- neue Verbrennungsregelung für Brennstoff und Sauerstoff sowie
- Optimierung und Anpassung des Abgassystems.

Aus Bild 4 ist zu entnehmen, dass bei einer Ziehtemperatur der Knüppel von ca. 1 200 °C der Feuerungstechnische Wirkungsgrad für einen Ofen ohne oder nur mit niedriger Luftvorwärmung von $\eta_f = 0,4$ auf $\eta_f = 0,8$ für Oxyfuel-Brenner gesteigert werden kann. Der spezifische Energiebedarf Δe_B beträgt dann

$$\Delta e_B = \frac{\Delta h_G}{\eta_f \eta_o}, \quad (1)$$

wobei Δh_G die spezifische Energie des Gutes ist und η_o den Gütegrad des Ofens beschreibt. Bei konstanter



9

Entwicklung des spezifischen Brennstoffbedarfs als Folge der Umrüstung von Luft-Brennstoff-Brennern auf Oxyfuel-Brenner bei Ascométal (Fos Sur Mer)

Specific fuel consumption vs. time resulting from the modification of fuel-air-burners to oxyfuel-burners at Ascométal (Fos Sur Mer)

		Brennstoff-Luft	Oxyfuel	Differenz in %	
Produktion max.	t/h	280	397	+99	+35
Energie ges. EG	MW	102	109	+7	+6
Abgasenergie	MW	42	15	-27	-65
Abgasvolumen	m ³ (STP)/h	120 000	34 000	-86 000	-72
Abgastemperatur	°C	858	862	+4	+0,5
Spez. Energie	GJ/t	1,312	1,033	-0,279	-22
Brennstoff NG	m ³ (STP)/t	36	28	-8	-23
Sauerstoff	m ³ (STP)/t	0	58	+58	100
CO ₂ -Emissionen	kg/t	72	56	-16	-22
Jahresproduktion*	t/a	1 754 000	2 387 000	633 000	+36

* Jahresproduktion 8 400 h; Herdraumbelegung 75 %

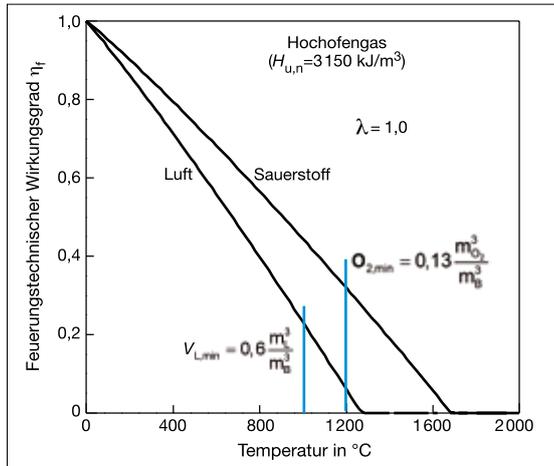
10

Vergleich Hubbalkenofen mit und ohne Oxyfuel-Technik

Walking beam furnace with and without oxyfuel technology

spezifischer Nutzenergie von $\Delta h_G \approx 0,750$ MJ/t und einem angenommenen Ofengütegrad von $\eta_o = 0,8$ ergibt sich eine Brennstoffreduzierung von 50 %. Bezogen auf die Systemgrenze Ofen bedeutet dies somit auch eine Halbierung der CO₂-Emissionen.

Umrüstung von Öfen bei Ascométal. Im Werk Fos Sur Mer von Ascométal werden Rohblöcke (bis 7,5 t), Knüppel und Vorblöcke (90 bis 400 mm), gewalzte Stäbe (80 bis 325 mm) sowie Walzdraht (5 bis 32 mm) und gezogener Draht (1 bis 20 mm) erzeugt.



11

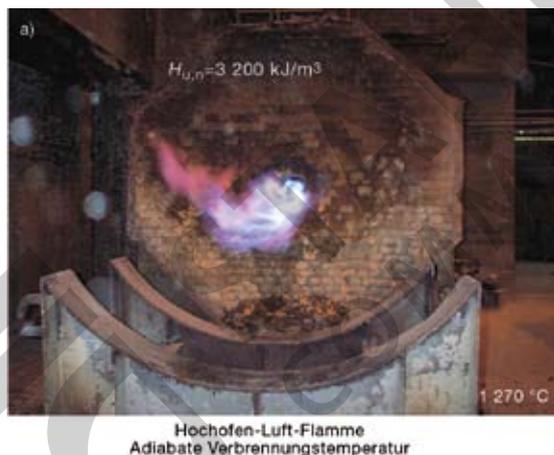
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad für die Verbrennung von Hochofengas (Zusammensetzung nach Bild 2) mit Luft bzw. Sauerstoff

Combustion efficiency for the combustion of BF gas (composition in figure 2) with air and oxygen

Von 13 Öfen mit Luft-Brennstoff-Brennern wurden neun Öfen auf Oxyfuel-Brenner umgerüstet. Die Jahresleistung wird seit 2007 mit neun Tieföfen anstatt von bisher 13 Tieföfen erzeugt. Vier noch mit Luftbrennern ausgerüstete Öfen werden als Standby-Produktionsanlagen vorgehalten. Im Mittel konnte dadurch der spezifische Energiebedarf von 350 kWh/t (1,26 GJ/t) auf einen Mixwert von 253 kWh/t (0,91 GJ/t) abgesenkt werden, Bild 9. Bezogen auf den Ausgangswert ist dies eine Reduzierung von 28 %.

Umstellung eines Hubbalkenofens auf die Sauerstofftechnologie. Bei der Betrachtung einer Umstellung eines Hubbalkenofens von der Luftverbrennung auf die flammenlose Sauerstoffverbrennung ergeben sich unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und ökologischen Kenndaten nachstehende Ergebnisse, Bild 10:

Bei einem fast gleichen Gesamtenergieeinsatz ist eine Produktionssteigerung bei gleichzeitiger Reduzierung der relevanten spezifischen Kenndaten von 35 % möglich. Wird eine Produktionszeit von 8 400 h und eine Herdraumbelegung von 75 % zugrunde gelegt, so ergeben sich für den Betreiber neben einer Entlastung des Abgassystems um 72 % eine jährliche Mehrproduktion von über 600 000 t ohne zusätzliche Investitionen in neue Ofenanlagen. Durch die spezifische Energiereduzierung werden die CO₂-Emissionen um ca. 38 000 t reduziert und stellen einen entsprechenden Gegenwert im Emissionshandel dar. Die Amortisationszeit für die notwendige neue Brennertechnologie beträgt weniger als ein Jahr.



12

Flammen bei der Verbrennung von niederkalorischem Hochofengas ($H_{u,n} = 3\,200\text{ kJ/m}^3$) mit Luft (a) bzw. Sauerstoff (b)
Flames for the combustion of low calorific BF gas ($H_{u,n} = 3\,200\text{ kJ/m}^3$) with air (a) and/or oxygen (b)

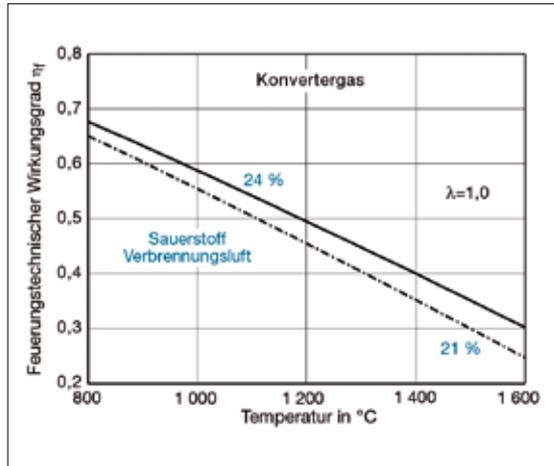
Verbrennung von Kuppelgasen mit Sauerstoff

Ein weiterer Ansatz zur Energieeinsparung ist die Nutzung von „In-House-Gasen“ bzw. Kuppelgasen (Koksofen-, Hochofen- oder Konvertergas), die individuell oder als Mischgas genutzt werden. Große Mengen an Brennstoffen mit geringen Heizwerten stehen vorwiegend in integrierten Hüttenwerken zur Verfügung [9].

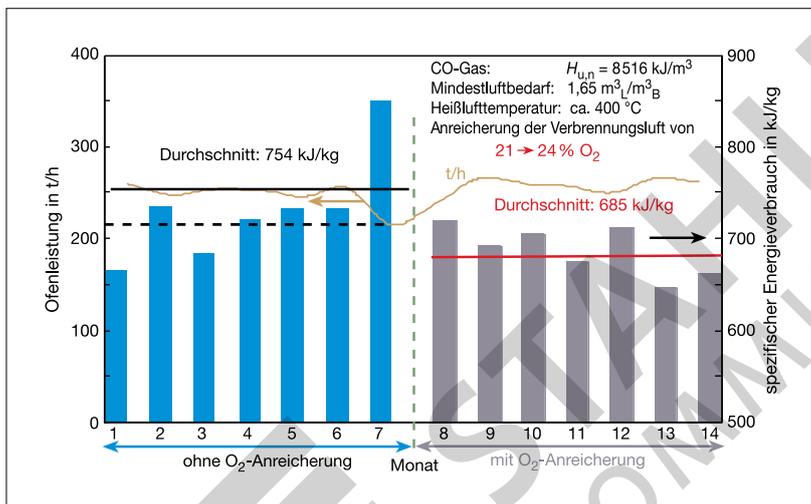
Durch die Verbrennung von Hochofengas mit Sauerstoff wird sowohl die adiabate Verbrennungstemperatur (von z. B. 1 270 auf 1 685 °C für die in Bild 2 angegebene Zusammensetzung) als auch der feuerungstechnische Wirkungsgrad angehoben, Bild 11.

Neben dem höheren feuerungstechnischen Wirkungsgrad für die Verbrennung niederkalorischer Brenngase mit Sauerstoff ist insbesondere die Ausbildung einer stabilen Flamme von Interesse. Im Vergleich hierzu ergibt sich bei der Verbrennung von Hochofengas mit Luft ein weniger stabiles Flammenbild, Bild 12.

13
 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad von Konvertergas (Zusammensetzung nach Bild 2) für ein Luftverhältnis $\lambda = 1,0$ sowie Sauerstoffgehalten in der Verbrennungsluft von 21 bzw. 24 %
 Combustion efficiency of BOF gas (composition in figure 2) for an air ratio $\lambda = 1.0$ and oxygen contents in the air of 21 and 24 %



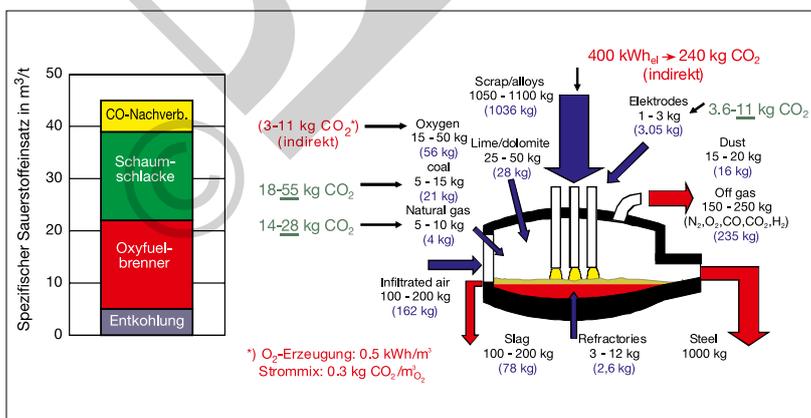
Den sinnvollen Einsatz von Konvertergas ($H_{u,n} = 8,5 \text{ MJ/m}^3$) mit Sauerstoff zeigt eine Installation bei ThyssenKrupp Steel in Duisburg an einem Rollenherddurchlaufofen mit Heißeinsatz. Schon bei einer Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft von 21 auf 24 % reduziert sich der spezifische Energieverbrauch um durchschnittlich 7 % durch den Anstieg des Feuerungstechnischen Wirkungsgrads, Bild 13, von der ursprünglichen spezifischen Energie von 754 kJ/kg auf ca. 700 kJ/kg. Weitere 2 % Energieeinsparung auf den in Bild 14 angegebenen Wert von 685 kJ/kg bei gleicher Produktionsleistung ergeben sich aus Optimierungsmaßnahmen im Rahmen der Umstellung des Ofens.



14
 Änderung des spezifischen Energieeinsatzes eines Rollenherddurchlaufofens mit Heißeinsatz durch die Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft von 21 auf 24 %
 Variation of the specific energy input of a roller hearth furnace with hot charging resulting from an increasing oxygen content of combustion air from 21 to 24 %

Anwendung von Sauerstoff im Elektrolichtbogenofen

Ein stetig weiterentwickeltes Anwendungsfeld der Sauerstofftechnik stellt die Elektrostahlherstellung im Elektrolichtbogenofenprozess dar. Die in den letzten Jahrzehnten erreichte Reduzierung des spezifischen elektrischen Energieverbrauchs auf Werte von ca. 350 kWh/t und die damit verbundene Leistungssteigerung der Öfen ist direkt mit dem stetig steigenden Sauerstoffeinsatz im Elektrolichtbogenofen verbunden. Neben der Sauerstoffmenge für die Entkohlung der Stahlschmelze werden größere Sauerstoffmengen für Oxyfuel-Brenner, das Schäumen der Schlacke zum Schutz des Ofengefäßes vor der Lichtbogenstrahlung sowie die CO-Nachverbrennung eingesetzt, Bild 15. Neue Öfen werden mit spezifischen Gesamtsauerstoffmengen von ca. $45 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{RSt}}$ ausgelegt bzw. betrieben. Dies sind lediglich 5 – 10 m³ Sauerstoff/t_{RSt} weniger als die beim Sauerstoffaufblasprozess eingesetzte Menge.



15
 Aufteilung des Sauerstoffeinsatzes bei Elektrolichtbogenöfen und Beispiel für eine Stoffbilanz
 Oxygen input in electric arc furnaces and mass balance

Dieser hohe spezifische Sauerstoffeinsatz wirkt sich in der Stoffbilanz des Elektrolichtbogenofens auf die emittierte CO₂-Menge aus. Demnach wäre in der aktuell praktizierten Ermittlung und Bewertung der CO₂-Emissionen von Elektrostahlwerken (ohne die Bewertung der CO₂-Mengen für die Bereitstellung von Strom, Sauerstoff) für den Emissionshandel, der mit dem Ziel einer Minimierung der CO₂-Emissionen verbunden sein sollte, der Sauerstoffeinsatz zu Gunsten des Stromeinsatzes zu verringern. Interessant ist jedoch die Fragestellung, wie sich das Substitutionspotenzial von elektrischer Energie aufgrund des Einsatzes von Sauerstoff darstellt.

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen elektrischen Energieeinsatz des Elektrolichtbogenofens, der von einer Vielzahl von Einflussgrößen, wie den Sauerstoffeinsatz für Brenner, Lanzen und der CO-Nachverbrennung abhängt, ist in der Formel von Köhler, die auf einer Vielzahl von Chargendaten verschiedener Elektrolichtbogenöfen basiert, beschrieben, Bild 16.

Für die Klärung der Fragestellung, ob der Sauerstoffeinsatz generell und ggf. unter welchen Randbedingungen der Sauerstoffeinsatz im Elektrolichtbogenofen aus der Sicht der relevanten CO₂-Emissionen sinnvoll ist, werden die Kenndaten für den Strombedarf der Sauerstoffherstellung von 0,5 kWh_{el}/m³ O₂ sowie die Kohlendioxidemissionen des Kraftwerks für den deutschen Strommix (2006) von 0,6 kg CO₂/kWh_{el} angesetzt. Somit beinhalten die folgenden Betrachtungen näherungsweise die Gesamtemissionen des Prozesses und sind somit volkswirtschaftlich relevant.

Brennstoff-Sauerstoff-Brenner. Durch 1 m³ Brennstoff (CH₄) werden 8 kWh_{el} elektrische Energie substituiert. Es gilt somit im Mittel für die große Anzahl ausgewerteter Elektrolichtbogenöfen ein Substitutionsfaktor von

$$\frac{\Delta e_{el}}{\Delta e_{Br}} = f_{Sub} = 0,8, \quad (2)$$

d. h. für die Substitution von 1 kWh_{el}/t sind 1,25 kWh_{Br}/t erforderlich. Für die Herstellung von Sauerstoff und durch die Verbrennung von CH₄ mit Sauerstoff werden direkt und indirekt 0,26 kg CO₂/kWh_{Br} freigesetzt. Für die elektrische Energie gilt 0,6 kg CO₂/kWh_{el}. Bild 17 zeigt, dass für einen Substitutionsfaktor von f_{sub} > 0,45 weniger CO₂-Gesamtemissionen durch Erdgas-Sauerstoff-Brenner freigesetzt werden als für die äquivalente substituierte elektrische Energie. Dies entspricht auch der gängigen Praxis in Elektrolichtbogenöfen, wo man

die Brennstoff-Sauerstoff-Brenner als Einschmelzhilfe und zur Symmetrierung des Einschmelzvorgangs nur zu Beginn des Einschmelzprozesses nach der Chargierung eines Korbes einsetzt.

Schäumen der Schlacke. Gemäß Bild 15 werden je nach Anlage 5 bis 20 kg Kohlenstoff über den Schrotteinsatz, kohlenstoffhaltige Legierungsträger sowie stückige bzw. staubförmige Kohlenstoffträger zugegeben. Mit Ausnahme der hoch legierten nichtrostenden Stähle dient der Kohlenstoff zusammen mit dem über Lanzen oder Injektoren/Brenner in die Schmelze eingeleiteten Sauerstoff zur Bildung von CO, das zusammen mit der Schlacke einen Schaum bildet, wodurch sich das Schlackenvolumen vergrößert und die direkte Lichtbogenstrahlung auf Wandelemente und Deckel unterbunden wird. Dadurch können lange, leistungsstarke Lichtbögen eingestellt werden, wodurch sich wieder die Chargendauer verkürzt und der spezifische Energiebedarf abnimmt. Nach Bild 16 ist der Zusammenhang zwischen der Absenkung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes Δe_{el} und der Sauerstoffmenge M_L (bzw. ΔV_{O₂})

$$\Delta e_{el} = -4,3 \frac{kWh_{el}}{m^3} \Delta V_{O_2}. \quad (3)$$

Geht man davon aus, dass bereits hier der Kohlenstoff vollständig in CO₂ umgesetzt wird (dies erfolgt jedoch erst bei der Nachverbrennung im Ofenraum bzw. beim Austritt des Abgases aus dem Ofen), so ergibt sich für die chemische Umsetzung

$$W_{el} = 375 \frac{kWh}{t} + 0,3 \frac{kWh}{t \cdot K} (T_A - 1600^\circ C) + 1 \frac{kWh}{t \cdot \min} (t_s + t_N)$$

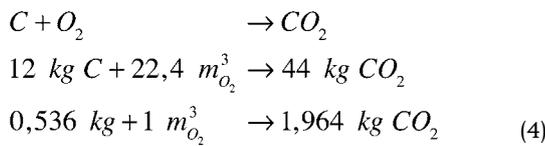
$$+ 400 \frac{kWh}{t} \left(\frac{G_E}{G_A} - 1 \right) + 80 \frac{kWh}{t} \frac{G_{DRI} + G_{HBI}}{G_A} - 350 \frac{kWh}{t} \frac{G_{HM}}{G_A} + 1000 \frac{kWh}{t} \frac{G_Z}{G_A}$$

$$- 4 \frac{kWh}{m^3} M_{Br} - 4,3 \frac{kWh}{m^3} M_L - 2,8 \frac{kWh}{m^3} M_N$$

(In blau: im Beitrag diskutierte Einflussgrößen)

W _{el}	Spez. elektrischer Energieeinsatz	T _A	Abstichtemperatur
G _E	Masse metallischer Einsatz	t _s	Power-on time
G _A	Abstichmasse	t _N	Power-off time
G _{DRI}	Masse DRI	M _{Br}	Spez. Sauerstoff (Brenner)
G _{HBI}	Masse HBI	M _L	Spez. Sauerstoff (Lanze)
G _{HM}	Masse flüssiges Roheisen	M _N	Spez. Sauerstoff (Nachverbrennung)
G _Z	Masse Schlackenbildner		

16 Einfluss von Prozessdaten auf den spezifischen elektrischen Energieeinsatz von Elektrolichtbogenöfen [10]
Relation between process data and the specific electric energy consumption of electric arc furnaces [10]



ein Wert von 1.964 kg CO₂/m³O₂ sowie zusätzlich für die Sauerstoffherstellung ein Wert von 0,3 kg CO₂/m³O₂. Aus Bild 16 ergibt sich somit ein Verhältnis der indirekten CO₂-Emissionen für die Stromerzeugung zu den direkten am Elektrolichtbogenofen freigesetzten CO₂-Emissionen

$$\begin{aligned}
 \frac{CO_2(\text{Stromerzeugung})}{CO_2(\text{Lichtbogenofen})} &= -4,3 \frac{kWh_{el}}{m^3_{O_2}} \frac{0,6 \frac{kg \text{ CO}_{2,el}}{kWh_{el}}}{2,264 \frac{kg \text{ CO}_{2, EAF}}{m^3_{O_2}}} \\
 &= \frac{2,58 \text{ kg } CO_2}{2,264 \text{ kg } CO_{2, EAF}} > 1. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Dies bedeutet, da dieser Quotient >1 ist, dass durch das Schäumen weniger CO₂ am Ofen direkt erzeugt wird als indirekt im Kraftwerk. Diese Maßnahme geht aufgrund der Gesamtbilanz leicht zugunsten der Umsetzung im Elektrolichtbogenofen auf.

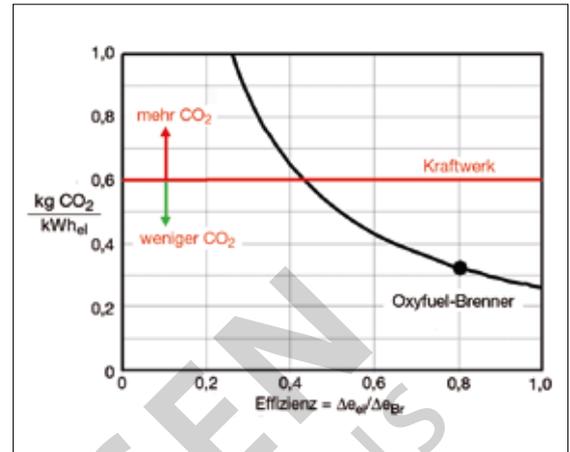
CO-Nachverbrennung. Da die Ofenabgase hohe CO-Anteile aufweisen, kann die Bilanz durch die CO-Nachverbrennung im Ofen verbessert werden. In Bild 16 ist der Zusammenhang zwischen der Absenkung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes Δe_{el} und der Sauerstoffmenge für die CO-Nachverbrennung M_N (bzw. ΔV_{O₂})

$$\Delta e_{el} = -2,8 \frac{kWh_{el}}{m^3_{O_2}} \Delta V_{O_2}. \quad (6)$$

Es ergibt sich somit ein Verhältnis der indirekten CO₂-Emissionen für die Stromerzeugung zu den direkten am Elektrolichtbogenofen freigesetzten CO₂-Emissionen

$$\begin{aligned}
 \frac{CO_2(\text{Stromerzeugung})}{CO_2(\text{Lichtbogenofen})} &= -2,8 \frac{kWh_{el}}{m^3_{O_2}} \frac{0,6 \frac{kg \text{ CO}_{2,el}}{kWh_{el}}}{0,3 \frac{kg \text{ CO}_{2, EAF}}{m^3_{O_2}}} \\
 &= \frac{1,68 \text{ kg } CO_2}{0,3 \text{ kg } CO_{2, EAF}} > 1. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Aus Sicht der Minderung der CO₂-Gesamtemissionen des Elektrolichtbogenofenprozesses ist somit die CO-Nachverbrennung zielführend, wobei jedoch zu



17 Spezifische CO₂-Gesamtemissionen der Zusatzbrenner von Lichtbogenöfen in Abhängigkeit vom Verhältnis der substituierten elektrischen Energie zur Brennstoffenergie
Specific CO₂ emissions of EAF burners depending from the ratio of substituted electric energy to fuel input

berücksichtigen ist, dass diese Maßnahme nur dann sinnvoll ist, wenn die Ofenabgase noch im direkten Kontakt mit Schrott stehen.

Fazit

Der Einsatz von Sauerstoff zur Optimierung von Hochtemperaturprozessen ist aus energetischer und ökologischer Sicht sinnvoll. In diesem Beitrag wurde ein Überblick über den Einfluss der Verbrennung verschiedener Gase mit reinem Sauerstoff im Vergleich mit Luft als Oxidator gegeben. Die adiabate Verbrennungstemperatur und der Feuerungstechnische Wirkungsgrad sind deutlich höher, sodass für bestimmte Anwendungen dann auch niederkalorische Gase eingesetzt werden können. Die flammenlose Oxidation, die auch für die Oxyfuel-Technik entwickelt wurde, garantiert gleichzeitig auch niedrigste NO_x-Emissionswerte. An einer Vielzahl umgerüsteter Wiedererwärmungsöfen wurde nachgewiesen, dass die Sauerstofftechnik aufgrund der platzsparenden Bauweise dazu geeignet ist, die Öfen energieeffizient und leistungsoptimiert zu gestalten. Bezogen auf das System „Ofen“ ergeben sich dadurch deutlich geringere CO₂-Emissionen, die je nach Art der Stromwirtschaft eines Landes 1 : 1 auf die CO₂-Gesamtemissionen übertragen werden können.

Außerdem wurde gezeigt, dass die Sauerstofftechnik bei der Elektrostahtlerzeugung, bei der bis zu 45 m³ Sauerstoff pro t Stahl eingesetzt werden, die CO₂-Gesamtemissionen unter Berücksichtigung des Kraftwerks ebenfalls minimiert.

rainhard.paul@de.linde-gas.com

Literatur

[1] Scherello, A.; Högner, W.; Claesson, E.; Bamforth, P.; Mercier, C.: State-of-the-art oxyfuel solutions for reheating and annealing furnaces in steel industry, METEC InSteelCon 2007, 11.-15. Juni 2007, Düsseldorf.

[2] Pfeifer, H. [Hrsg.]: Taschenbuch Industrielle Wärmetechnik – Grundlagen, Berechnungen, Verfahren, 4. Aufl., Vulkan Verlag, Essen, 2007.

[3] Wünnig, J.; Milani, A.: Handbuch der Brenner-technik für Industrieöfen, Vulkan Verlag, Essen, 2007.

[4] von Schéele, J.; Gartz, M.; Paul, R.; Lantz, M.-T.; Riegert, J.-P.; Söderlund, S.: stahl u. eisen 128 (2008) Nr. 7, S. 35.

[5] DIN EN 746-3: Industrielle Thermoprozessanlagen, Teil 3: Sicherheitsanforderungen für die Erzeugung und Anwendung von Schutz- und Reaktionsgasen, Mai 1997.

[6] Umweltbundesamt 2008: www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf

[7] Carbon emission from electricity generation by country: http://lightbucket.wordpress.com/2008/10/22/carbon-emissions-from-electricity-generation-by-country/

[8] Fredriksson, P.; Claesson, E.; Vesterberg, P.; Moroz, G.; von Schéele, J.: Iron Steel Tech. 5 (2008) Nr. 5, S. 323/28.

[9] von Schéele, J.; Ekman, T.: Nordic Steel Mining Rev. (2008) Nr. 3, S. 24/26.

[10] Köhle, S.: Recent improvements in modelling energy consumption of electric arc furnaces, Proc. 7. Europ. Electric Steel-making Conf., Venedig, Italien, 26.-29. Mai 2002, S. 1.305/14.