

## Wie sinnvoll ist eine Sauerstoffanreicherung bei gasbeheizten Industrieöfen?

Oxygen enrichment — How useful is it with gas-fired industrial furnaces?

Quel est l'intérêt d'un enrichissement en oxygène dans les fours industriels chauffés au gaz?

Von K. Hanzlik

In den letzten Jahren haben Wissenschaftler [1], Ofenbauer und -betreiber intensive Überlegungen angestellt, um den Energieverbrauch von direkt befeuerten Wärmöfen zu verringern. Unter den möglichen Maßnahmen rangiert erstaunlicherweise die Sauerstoffanreicherung bei der Verbrennung nicht an vorderer Stelle, obwohl das Ersparnispotential mit einigen Prozent beziffert wird. Im folgenden soll daher der Hintergrund für den Einsatz einer Sauerstoffanreicherung etwas beleuchtet werden.

Die Wärmeübertragung in einer Industrieofenanlage läuft prinzipiell auf drei Arten ab: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Beispielsweise sind in einem Aluminiumschmelzofen alle drei Arten der Wärmeübertragung anzutreffen. Bei den in diesem Ofentyp auftretenden Temperaturen liefert die Strahlung den Hauptbetrag des Wärmeflusses. Anschaulich ist dieser Effekt auch in der Natur durch den Wärmetransport von der Sonne zur Erde zu beobachten. Dabei gilt die Definition: Wärmestrahlung sind elektromagnetische Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im materiefreien Raum ausbreiten und nur durch die Wellenlänge zu unterscheiden sind. Der Physiker Max Planck hat hierzu eine Gesetzmäßigkeit gefunden, die in Abhängigkeit von Wel-

Wellenlänge und Temperatur die Strahlungsintensität, das heißt die eingeschaltete Energiedichte eines schwarzen Körpers bei einer Wellenlänge beschreibt. Dieses Gesetz lautet:

$$J_\lambda = \frac{2 \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5 \cdot (\exp(h \cdot c/\lambda \cdot k \cdot T) - 1)} . \quad (1)$$

Darin bedeutet

$J_\lambda$  die Strahlungsintensität in  $\text{W/m}^2$ ,

$c$  die Lichtgeschwindigkeit in  $\text{m/s}$ ,

$\lambda$  die Wellenlänge in  $\text{m}$ ,

$h$  die Planckkonstante  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ,

$k$  die Boltzmannkonstante  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  und

$T$  die thermodynamische Temperatur in  $\text{K}$ .

Bild 1 zeigt dieses Gesetz in logarithmischer Darstellung, wobei die Maxima dieser Graphen auf einer Geraden liegen. Das Plancksche Gesetz gibt aber noch keine Auskunft über die gesamte, von einem schwarzen Körper abgegebene Wärmestromdichte der Wärmestrahlung. Für die Beantwortung dieser Frage muß die Intensität über den gesamten Wellenlängenbereich integriert werden.

$$\dot{Q} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} J_\lambda(T) d\lambda . \quad (2)$$

Hieraus läßt sich das Stefan-Boltzmannsche Gesetz hinsichtlich der Wärmestromdichte für den schwarzen Körper ableiten.

$$\dot{Q} = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

mit  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  der Strahlungskonstanten (Stefan-Boltzmann-Konstante) des schwarzen Körpers.

Absorbiert und reflektiert ein Körper die Strahlung nur teilweise, so wird von einem grauen Körper gesprochen. Dies bedeutet eine Verminderung der Eigenstrahlungsstromdichte  $\dot{E}_s$  gegenüber der des schwarzen Strahlers  $\dot{E}_s$  und wird mit dem Verhältnis  $\varepsilon = \dot{E}/\dot{E}_s$  ausgedrückt.  $\dot{E}_s$  ist abhängig von der Temperatur, dem Material und dessen Oberflächenbeschaffenheit, stellt also den Emissionsgrad („Schwärzegrad“) dar.

Der Wärmestrom infolge Strahlung kann zwischen zwei festen Körpern durch folgende Beziehung ausgedrückt werden:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) , \quad (4)$$

mit

$\sigma$  Strahlungskonstante des schwarzen Körpers in  $\text{W/m}^2\text{K}^4$ ,

$A$  Flächeninhalt in  $\text{m}^2$ ,

$T_{1/2}$  thermodynamische Temperaturen der Körper in  $\text{K}$ .

Wird in Gleichung (4) für  $T_1$  die Heizgastemperatur und für  $T_2$  die Guttemperatur eingesetzt, so scheint bei einer Erhöhung der Heizgastemperatur und gleichbleibender Guttemperatur durch die Vergrößerung des Terms  $(T_1^4 - T_2^4)$  der Wärmestrom entscheidend verbessert. Eine Variation der Heizgastemperatur (theoretische Verbrennungstemperatur) kann, wie in Bild 2 dargestellt, durch Anreicherung von Sauerstoff, Luftvorwärmung und/oder Änderung des Brennstoff-Luft-Verhältnisses bzw. einer Kombination bewirkt werden.

Im gegenständlichen Fall eines gasbeheizten Schmelzofens kann Gleichung (4) in der dargestellten Form jedoch nicht verwendet werden, da erstere nur für Festkörperstrahlung gilt und den Gaskörper nicht berücksichtigt. Der Gaskörper verändert den Emissionsgrad  $\varepsilon$ , der dann als effektiver Strahlungsaustauschkoeffizient  $\varepsilon_{\text{ges}}$  angegeben und noch berechnet werden muß. Es ergibt sich demnach für den auf das Wärmegut übertragenen Wärmestrom bei Vorhandensein von transparenter Körper (Heizgas) folgende Beziehung:

$$\dot{Q}_G = \varepsilon_{\text{ges}} \cdot \sigma \cdot A_G \cdot (T_H^4 - T_G^4) \quad (5)$$

mit

$A_G$  Wärmegutoberfläche in  $\text{m}^2$ ,

$T_H$  thermodynamische Temperatur des Heizgases in  $\text{K}$ ,

$T_G$  thermodynamische Temperatur des Gutes in  $\text{K}$ .

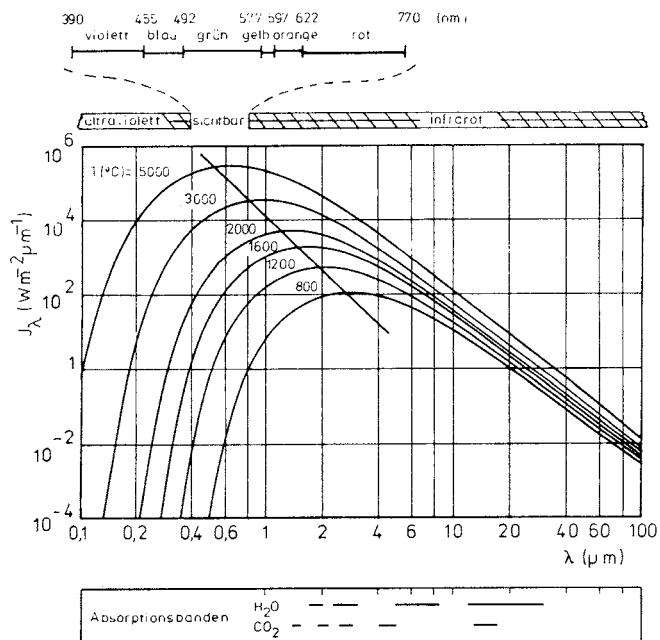


Bild 1: Plancksches Strahlungsgesetz in logarithmischer Darstellung. Eingezeichnet sind die Einteilung der Wellenbereiche und die Absorptionsbanden von Kohlendioxid und Wasserdampf

Fig. 1: Planck's law of radiation shown logarithmically. Entered are the frequency ranges and the absorption bands of carbon dioxide and water vapour

Fig. 1: Loi de radiation de Planck en représentation logarithmique. Sont inscrites ici la répartition des plages d'ondes et les bandes d'absorption du gaz carbonique et de la vapeur d'eau

Die detaillierte Herleitung für die Berechnung des Koeffizienten  $\varepsilon_{\text{ges}}$  gestaltet sich leider so umfangreich, daß diese den Rahmen dieses Beitrages sprengen würde. Es soll deshalb an diesem Abschnitt nur die allgemeine Problematik aufgezeigt und insbesondere der Gaskörper untersucht werden.

Bei der Betrachtung eines Gaskörpers neigt man dazu anzunehmen, daß die Gase strahlungsdurchlässig sind. Tatsächlich existieren Gase, die strahlungsdurchlässig sind, und andere, die die Strahlung absorbieren. Die Absorption tritt aber nur in bestimmten Wellenlängenbereichen auf. Innerhalb dieser Bereiche können verschiedene Gase Strahlung absorbieren und emittieren, so zum Beispiel Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ), die Bestandteile der Verbrennungsgase einer Gasfeuerung sind (Bild 1). Der Anteil der Strahlungsabsorption und -emission von Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) ist zu vernachlässigen.

Die Gasstrahlung kommt dadurch zustande, daß bei Molekülzusammenstoßen die einzelnen Atome eines Moleküls Schwingungen und Rotationen ausführen und dabei, sofern sie freie Ladungen haben, elektromagnetische Wellen aussenden. Die aus Atomen gleicher Art aufgebauten Elementargase ( $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) haben keine solchen freien Ladungen und sind daher für Wärmestrahlung durchlässig.

Sind solche absorbierenden Gase neben Stickstoff Hauptbestandteile des Abgases einer Feuerung, beispielsweise einer Erdgasfeuerung, so beeinträchtigen sie den ungehinderten Strahlungsaustausch zwischen Heizgas, Wand und Gut. Auf der anderen Seite erhöhen bzw. ermöglichen diese Gase den Wärmetransport durch Strahlung an jene Stellen, die im Strahlungsschatten der Flamme liegen. Speziell beim Schmelzen von Blechschrott, bei dem der größte Teil der Oberfläche im Strahlungsschatten der Flamme liegt, ist dieser Umstand von besonderer Wichtigkeit. Mit diesen Erkenntnissen verbindet sich die Idee, die Wärmeübertragung nicht allein durch Veränderung der Heizgastemperatur, sondern auch der Gaskonzentration zu verbessern. Dazu muß die Abhängigkeit des Emissionsgrades  $\varepsilon$  des Gaskörpers von seinen Einflußparametern untersucht werden. Ersterer wird sinnvollerweise als Funktion der flächenspezifischen Molekülmenge und der Temperatur angeschrieben.

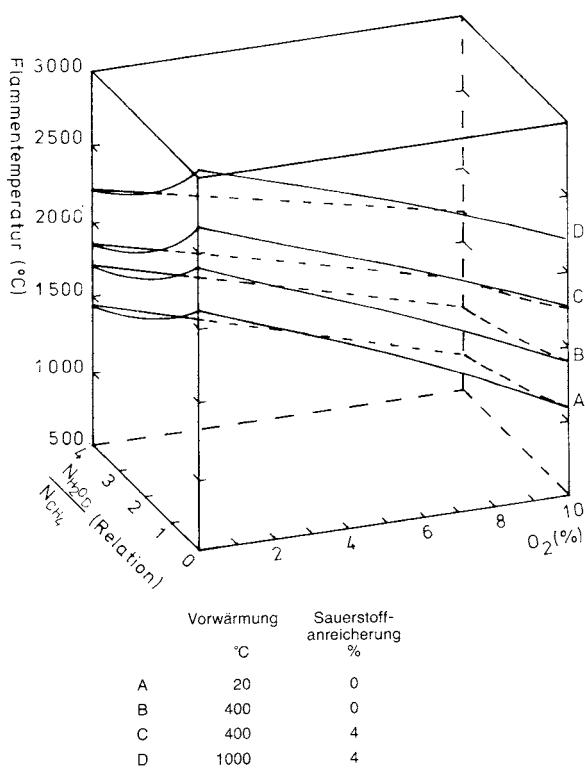


Bild 2: FlammenTemperatur in Abhängigkeit von Restsauerstoffgehalt und Dampfanreicherung bei verschiedenen Betriebsparametern

Fig. 2: Flame temperature as a function of residual oxygen content and admixture of water vapour with different operating parameters

Fig. 2: Température de la flamme en fonction de la teneur en oxygène résiduaire pour différents paramètres d'exploitation

$$\varepsilon = f \left( \frac{p \cdot s}{T}, T \right); \quad (6)$$

p Partialdruck in bar,

s Schichtdicke in m,

T thermodynamische Temperatur in K.

Schack hat dazu in einer Veröffentlichung [2] Interpolationsformeln für die Wärmestrahlung von kohlendioxid- und wasserdampfhaltigen Verbrennungsgasen angegeben, die die Abhängigkeiten nach Gleichung (6) berücksichtigen. Diese Formeln sollen hier lediglich zeigen, wie kompliziert sich die Berechnung der Strahlung im Zweikörpersystem darstellt. Hierbei sind die Absorptionsbanden, wie in Bild 1 dargestellt, zugrundegelegt.

$$\dot{q}_{CO_2} = 8,9 \varepsilon_{Material} (p \cdot s)^{0,4} \cdot ((T_H/100)^4 - (T_w/100)^4 \cdot (T_H/T_w)^{0,65}), \quad (7)$$

$$\dot{q}_{H_2O} = \varepsilon_{Material} (40 - 73 p s) (p \cdot s)^{0,6} ((T_H/100)^{2,32 + 1,37(p s)} - (T_w/100)^{2,32 + 1,37(p s)}). \quad (8)$$

Die Gesamtstrahlungsstromdichte ist:

$$\dot{q} = (\dot{q}_{CO_2} + \dot{q}_{H_2O}) \left( 1 + \frac{0,25 \sum p s}{0,11 + \sum p s} \cdot \left( 1 - \frac{p s_{CO_2}}{\sum p s} \right) \cdot \ln \left( 1 - \frac{p s_{CO_2}}{\sum p s} \right) \right), \quad (9)$$

und der Emissionsgrad ist dann:

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}}{\sigma \cdot T^4}; \quad (10)$$

p Partialdruck in bar,

s Schichtdicke in m,

T<sub>H</sub> Temperatur des Heizmittels in K,

T<sub>w</sub> Temperatur der Wand in K.

Im gegenständlichen Fall soll aber ein Dreikörpersystem Heizmedium — Wand — Gut mit je unterschiedlichen Temperaturen und Material-emissionsgraden untersucht werden. Dabei ergeben sich sechs verschiedene Strahlungsaustauschfaktoren [4]:

— ε<sub>HW</sub>: Heizmedium — Wand,

— ε<sub>HG</sub>: Heizmedium — Gut,

— ε<sub>WG</sub>: Wand — Gut,

sowie für die Rückstrahlung

— ε<sub>WH</sub>: Wand — Heizmedium,

— ε<sub>GH</sub>: Gut — Heizmedium,

— ε<sub>GW</sub>: Gut — Wand.

Außerdem hängen diese Faktoren von der Geometrie und Anordnung der beteiligten Körper sowie deren Temperaturen ab. Für die einzelnen Wärmestromdichten resultieren folglich:

$$\dot{q}_{HW} = \varepsilon_{HW} \cdot \sigma \cdot T_H^4 - \varepsilon_{WH} \cdot \sigma \cdot T_w^4, \quad (11)$$

$$\dot{q}_{HG} = \varepsilon_{HG} \cdot \sigma \cdot T_H^4 - \varepsilon_{GH} \cdot \sigma \cdot T_G^4, \quad (12)$$

$$\dot{q}_{WG} = \varepsilon_{WG} \cdot \sigma \cdot T_w^4 - \varepsilon_{GW} \cdot \sigma \cdot T_G^4. \quad (13)$$

Werden die Wärmestromdichten mit den entsprechenden Flächen multipliziert, so ergeben sich die Wärmestrome, die zusammengefaßt und nach [4] zu einem effektiven Strahlungsaustauschkoeffizienten ε<sub>ges</sub> umgerechnet werden können. Dieser wird in Gleichung (5) eingesetzt, wobei A<sub>G</sub> die Gutoberfläche bedeutet. Man erhält so, den durch Strahlung auf das Gut übertragenen Wärmestrom.

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht eine quantitative Beurteilung der durchgeföhrten Anreicherung und deren Auswirkung auf Temperatur und Gaskonzentration. Dabei erweist es sich als sinnvoll, die Flächen von Glühgut, Ofenwand, Gut- und Wandtemperatur sowie die Emissionsgrade der Materialien konstant zu halten. Derart kann eine dimensionslose Relation  $\dot{Q}/\dot{Q}_0$  gebildet werden, die zusammen mit der Gleichung

$$\varphi = 100 \cdot (1 - \dot{Q}/\dot{Q}_0) \quad (14)$$

die prozentuale Verbesserung oder Verschlechterung des Wärmestromes angibt. Als  $\dot{Q}_0$  wird der resultierende Wärmestrom festgelegt, der sich im betrachteten Dreikörpersystem ergibt, wenn ein Heizgas aus der Verbrennung von Methan mit Luft vorhanden ist und im Abgas noch 1 % Restsauerstoff gemessen wird.

Im folgenden werden einige Variationen durchgerechnet:

Als erste Variation wurden die Verbrennungsgase auf 400 °C erwärmt, was nach den beschriebenen Berechnungen eine Verbesserung des Wärmestrahlungsstromes um 10,7 % bedeutet.

Wird als nächstes zusätzlich die Verbrennungsluft mit 4 % Sauerstoff, auf absolut 25 %, angereichert und dabei der Restsauerstoffgehalt im Abgas, wie im vorherigen Beispiel, auf 1 % gehalten, so bewirkt diese Maßnahme 25,4 % Verbesserung. Hier scheint sich die eingangs getroffene Aussage zu bestätigen, daß sich der Wärmestrom bei Sauerstoffanreicherung infolge der Temperaturerhöhung der Flamme erhöht (vgl. Bild 2).

Der Zusammenhang zwischen getätigter Sauerstoffanreicherung und erzielter Verbesserung ist jedoch nicht proportional, wie eine Extrapolation von Bild 1 vermuten ließe. Die Sauerstoffanreicherung bewirkt primär einen starken Temperaturanstieg in der Flamme, der sekundär durch thermische Dissoziation die Anteile Kohlendioxid und Wasserdampf vermindert (Bild 3).

Dadurch wirkt sich die Erhöhung der Temperatur um 300 K auf 2575 °C nicht in dem Maße aus, wie zu erwarten wäre. Damit werden Nutzen

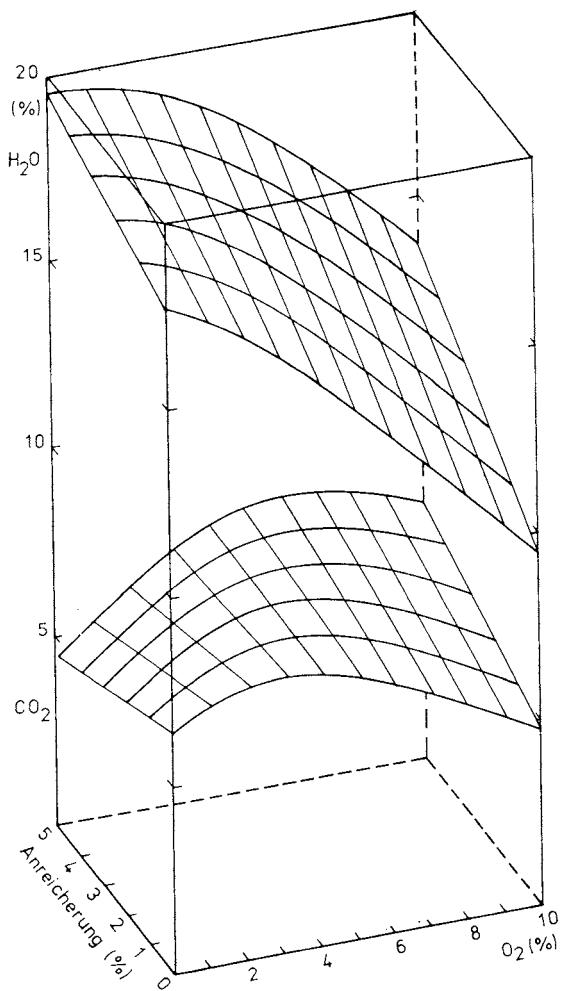


Bild 3: Dissoziationsprodukte Kohlendioxid und Wasserdampf als Funktion des Restsauerstoffgehaltes im Abgas und der Sauerstoffanreicherung

Fig. 3: The dissociation products carbon dioxide and water vapour as a function of residual oxygen content in the waste gas and oxygen enrichment

Fig. 3: Produits de la dissociation du gaz carbonique et de la vapeur d'eau comme fonction de la teneur d'oxygène résiduaire dans les fumées et de l'enrichissement en oxygène

und wirtschaftliche Grenzen einer Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft sichtbar.

An diesem Punkt setzt eine weitere Überlegung an, die darauf basiert, die durch Dissoziation vermindernden strahlungsrelevanten Gase zu ersetzen. Ein Ersatz des Kohlendioxids ist technisch realisierbar, scheitert aber am Aufwand und den Kosten. Im Gegensatz dazu erscheint

Tafel 1: Synergieanalyse verschiedener Maßnahmen zur Veränderung der Strahlung

Table 1: Synenergetic analysis of various measures designed to change radiation

Tableau 1: Analyse synergétique de différentes mesures pour modifier le rayonnement

Medien-vor-wärmung °C	Sauerstoff-anreicherung %	Dampf-anreicherung $\xi = \frac{N_{H_2O}}{N_{CH_4}}$	Restsauerstoff im Abgas %	Flammen-temperatur °C	Strahlungs-faktor $\psi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_0}$
20	0	0	1	2005	1,000
20	0	0	0,1	2090	1,054
20	0	0	2	1905	0,939
20	4	0	1	2325	1,209
400	0	0	1	2265	1,107
400	4	0	1	2575	1,254
400	4	1	1	2310	1,370
1000	0	0	1	2685	1,170
1000	4	1	2	2650	1,469
1000	4	4	0,2	2260	1,711

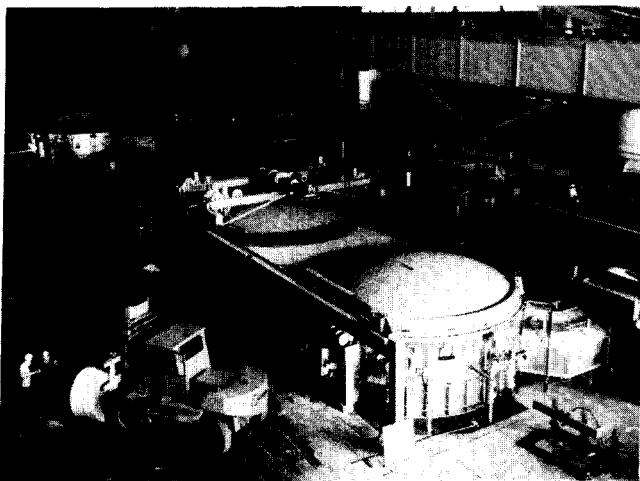


Bild 4: Aluminiumschmelzofen mit Sauerstoffanreicherung und Sauerstoffregelung

Fig. 4: Aluminum melting furnace with oxygen enrichment and automatic oxygen control

der Ersatz von Wasserdampf naheliegender und interessanter, denn Wasser ist leicht verfügbar und kostengünstig.

Betrachtet man den Verbleib der Abgase bei einem Aluminiumschmelzofen, so wird üblicherweise mit Rekuperatoren dem Abgas Enthalpie entzogen und damit die Verbrennungsluft vorgewärmt. Hierbei kann jedoch nicht die gesamte zur Nutzung verfügbare Energie ausgetauscht werden. Ein großer Teil geht dem Erwärmungsprozeß trotzdem verloren. Man könnte diese Verlustenergie nutzen, Wasser verdampfen, auf Luftvorwärmtemperatur erwärmen und der Verbrennung zuführen. Dieser Wasserdampfanteil erhöht in den Gleichungen (8) und (9) den Ausdruck  $p \cdot s$  und somit den durch Wärmestrahlung übertragenen Wärmestrom.

Ein weiterer ganz entscheidender ökologischer Vorteil kommt zu den wirtschaftlichen Aspekten dazu. Aus [3] ist bekannt, daß sich der NO<sub>x</sub>-Anteil im Abgas mit zunehmender Temperatur stark erhöht. Durch die Wasserdampfanreicherung wird die Flamme gekühlt und somit die Bildung von NO<sub>x</sub> maßgeblich verringert.

Berechnet man, wie oben, den Wärmestrom bei einer zudosierten Dampfmenge in gleicher Größenordnung wie die Methangasmenge, bei einer Vorwärmung der Gase auf 400°C, Sauerstoffanreicherung um 4 % und Restsauerstoffgehalt im Abgas von 1 %, so zeigt sich folgendes: Trotz der Reduzierung der Flammentemperatur auf 2100°C bilanziert ein Vorteil von 37 % gegenüber der Ausgangsbasis. Das sind 9,3 % mehr gegenüber demselben Beispiel ohne Dampfanreicherung.

Diesen Rechenvorgang kann man sinngemäß auf andere Vorwärmtemperaturen, Anreicherungsverhältnisse und Restsauerstoffgehalte beziehen. Einige Beispiele dazu sind in Tafel 1 aufgestellt.

Bei diesen Betrachtungen zeigt sich, daß die größtmögliche Verbesserung erreicht wird, wenn das Gas vorgewärmt, die Verbrennungsluft mit Sauerstoff angereichert und zusätzlich Wasserdampf zudosiert wird. Als wesentliches Kriterium ist die Einhaltung eines vorgegebenen Restsauerstoffgehaltes im Abgas zu beachten, was nur mit Hilfe einer Restsauerstoffregelung (Bild 4) erreicht werden kann.

Um dies zu untermauern, sei ein weiteres Beispiel angeführt: Würde, wie im Basisbeispiel, der Restsauerstoffgehalt von 1 % auf 0,1 % reduziert, so würde sich der Wärmestrom der Gasstrahlung um 5,4 % erhöhen. Umgekehrt würde eine Anhebung des Restsauerstoffgehaltes auf 2 % den Strahlungsaustausch um 6,1 % verringern (vgl. Tafel 1).

Hier zeigt sich recht deutlich, wie notwendig eine kontinuierliche Erfassung des momentanen Verbrennungsvorganges durch eine Sauerstoffmessung ist. Die Messung dient dann als Grundlage für eine Regelung des Brennstoff-Luft-Gemisches, wobei die eventuelle Zuführung

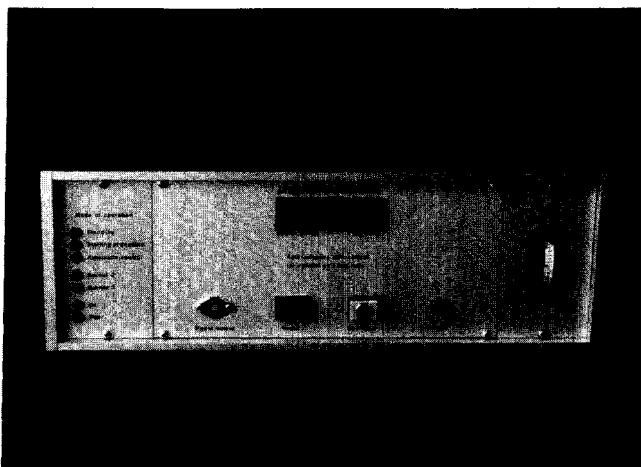


Bild 5: Reglerteil für die Aufschaltung des Sauerstoffrestwertes im Abgas auf die Brennersteuerung eines Aluminiumschmelzofens

Fig. 5: Controlier for transmitting the residual oxygen value of the waste gas to the burner control system of an aluminium melting furnace

Fig. 5: Organes de régulation pour la mise au point de la valeur d'oxygène résiduaire dans les fumées sur la commande des brûleurs d'un four de fusion de l'aluminium

von Wasserdampf nur grob der Gasmenge angepaßt werden muß (Bild 5).

#### Schrifttum

- [1] Seimann, M.: Simulation des Schmelzprozesses in einem flammenbeheizten Aluminiumschmelzofen. *Gas wärme international* 33 (1984) Nr. 6 – 7, S. 296 – 298.
- [2] Schack, A.: Der industrielle Wärmeübergang. 6. Auflage, 1962, Verlag Stahleisen.
- [3] Junge, K., Jeschar, R.: Mathematisches Modell der Wärmeübertragung in einem Chargenofen bei Sauerstoffanreicherung und Luftvorwärmung unter Berücksichtigung der Dissoziation. *Gas wärme international* 33 (1984) Nr. 8, S. 371 – 380.
- [4] Jeschar, R., Schupe, W.: Vereinfachte Berechnung des Strahlungswärmeübergangs in Industrieöfen und Vergleich mit Messungen in einer Versuchsbrennkammer. *Gas wärme international* 24 (1975) Nr. 2, S. 64 ff.

#### Bildnachweis

Bild 4: Werkbild Alu Norf GmbH

#### Zusammenfassung

Sauerstoffanreicherung ist ein wirksames Mittel, um den Wirkungsgrad eines Wärmofens zu verbessern. Allerdings muß man hierbei den

Restsauerstoffgehalt regeln, um den angestrebten Vorteil nicht zu gefährden.

Um Schadstoffbildung zu vermeiden, die bei Sauerstoffanreicherung infolge höherer Flammtemperatur auftritt, wird dem Brennstoff-Luft-Gemisch Wasserdampf zugesetzt. Diese Maßnahme verbessert zusätzlich den Wirkungsgrad.

Jede einzelne Maßnahme trägt in sich den Schlüssel für eine Energieersparnis. Ein Optimum kann — wie beschrieben — in sinnvoller Kombination von Sauerstoffregelung, Sauerstoff- und Wasserdampfanreicherung erzielt werden.

#### Summary

Oxygen enrichment is an effective aid to improve the efficiency of a re-heating furnace. However, its use makes it necessary for the residual oxygen content to be controlled automatically as otherwise the advantage of oxygen enrichment would not materialize.

In order to prevent the formation of pollutants occurring as a result of higher flame temperatures produced by oxygen enrichment, water vapour is added to the fuel/air mixture. This again helps to improve the efficiency.

Each of these measures itself contributes to the reduction in energy input. If suitably combined, automatic oxygen control, oxygen enrichment and the addition of water vapour can bring about the optimum saving in energy input.

#### Résumé

L'enrichissement en oxygène est un moyen efficace pour améliorer le rendement d'un four de réchauffage. Toutefois, il faut, dans ce cas, régler la teneur d'oxygène résiduaire pour ne pas compromettre les avantages ainsi recherchés.

Pour éviter la formation de matières nuisibles, intervenant lors de l'enrichissement en oxygène par suite de la température plus élevée de la flamme, on ajoute de la vapeur d'eau au mélange d'air et de combustible. Cette mesure permet en outre d'améliorer le rendement.

Chaque mesure isolée contribue, par elle-même, à économiser de l'énergie. Pour atteindre l'économie optimale, il convient — comme décrit ici — de combiner judicieusement le réglage de l'oxygène et l'enrichissement en oxygène et en vapeur d'eau.

#### Erstveröffentlichung:

"*Gaswärme International*", Band 34, 1985, Heft 9, September, S. 370-374

Vulkan Verlag