

Energieeffiziente Ofenbeheizung – Regenerative Wärmerückgewinnung mit Flachflammenbrennern

Energy-efficient furnace heating – Regenerative heat recovery using flat flame burners

Von Sabine von Gersum, Wolfgang Adler, Wolfgang Bender

Der Einsatz thermischer Regeneratoren führt an Industrieöfen zu hohen Brennstoffeinsparungen und ermöglicht die Substitution hochwertiger Energieträger wie Erdgas durch niederkalorige Prozess- und Biogase. Des Weiteren werden zur Erreichung einer gewünschten Beheizungsqualität häufig Flachflammenbrenner gefordert. Es wurde daher ein neuartiges Beheizungssystem aus Rohrregenerator und Flachflammenbrenner (ROREBS) entwickelt. Das System wurde zunächst systematisch experimentell und mittels numerischer Simulationsrechnungen untersucht und dann mit großem Erfolg betrieblich erprobt. Sowohl mit Erdgas als auch mit hüttentechnischen Prozessgasen wurden Brennstoffeinsparungen von 20 - 30 % gegenüber heute üblichen Systemen nachgewiesen. Zusätzlich zeichnet sich das gesamte System durch einen geringen Strömungswiderstand aus, der Druckverlust beträgt ca. 15 mbar bei Volllast.

The use of thermal regenerators in industrial furnaces achieves high fuel savings and permits the replacement of expensive energy sources such as natural gas by low-calorific-value process and biogases. Flat flame burners are, in addition, frequently required in order to achieve the necessary quality of heat input. An innovative heating system consisting of a tubular regenerator and flat flame burners (ROREBS) has therefore been developed. This system was initially methodically investigated by experimental means, and using numerical simulations, and then submitted, with great success, to operational trials. Fuel savings of 20 to 30 % compared to current standard combustion systems were verified using both natural gas and waste gases from metallurgical processes. The entire arrangement is also notable for its low fluid-dynamic resistance; pressure drop under full load operation is around 15 mbar.

Die heute üblichen Zentralreuperatoren sind vorwiegend aus dem Werkstoff Stahl gefertigt. Das Abgas der Hochtemperaturprozessanlage verlässt das Ofengefäß mit einer Prozesstemperatur von mehr als 1.000 °C. Da die zulässige Materialtemperatur im Reuperator deutlich unter dieser Temperatur liegt, wird das heiße Abgas vor Eintritt in den Reuperator mit Kühlluft gemischt, das große Potenzial der Abgaswärme wird nicht effizient genutzt. Ein Großteil der im Abgasstrom enthaltenen Wärmeenergie geht dem Prozess somit verloren.

In **Bild 1** ist das Einsparpotenzial eines erdgasbefeuerten Chargenofens bei einer Abgastemperatur von 1.200 °C für verschiedene Wärmerückgewinnungstechniken beispielhaft dargestellt. Um einen Wärmestrom von 1 MW in das Nutzgut zu erhalten, müssen bei einem Ofen ohne Wärmerückgewinnung rd. 3 MW über das Brenngas zugeführt werden, bei rekuperativer Wärmerückgewinnung rd. 2,2 MW und bei regenerativer Wärmerückgewinnung rd. 1,5 MW. Für den Fall der Umrüstung eines Ofens von rekuperativer auf regenerative Wärmerückgewinnung ist demnach eine Einsparung von bis zu 30 % möglich.

In Wärmöfen von Schmiede- und Walzwerken wird beispielsweise Nutzgut auf ca. 1.200 °C erwärmt. Die Jahrespro-

In Hochtemperaturprozessanlagen geht über das mit hoher Temperatur austretende Abgas ein wesentlicher Teil der eingebrachten Energie dem Prozess verloren. Ein Ansatz zur Minimierung dieser Verluste ist, mit einer effizienten Wärmerückgewinnung die im Abgasstrom noch vorhandene Wärme zur Brennmedienvorwärmung einzusetzen. Bei einer Feuerung mit Erdgas stellt die Brennluft ca. 90 % des eintretenden Gasmassenstromes. Hier ist eine Brennluftvorwärmung sinnvoll. Je niedriger der Luftbedarf des Brenngases ist, desto weniger Wärme kann so über die Brennluft

in den Prozess zurückgeführt werden. Werden Schwachgase wie beispielsweise Hochofengas eingesetzt, so ist zusätzlich eine Vorwärmung des Brenngases mit ausgekoppelter Abgaswärme sinnvoll.

Tabelle 1: Typische Betriebsarten der Stahlindustrie

Table 1: Typical operational characteristics of existing plants

		Schmiedebetrieb	Walzwerk
Produktion	t/a	30.000	350.000
Spezifischer Energiebedarf	GJ/t	2,0 – 4,0	1,4 – 1,8
Energieverbrauch	GJ/a	60.000 – 120.000	490.000 – 630.000
Brennstoffkosten	€/GJ	12	12
Energiekosten	€/a	720.000 – 1.440.000	5.880.000 – 7.560.000

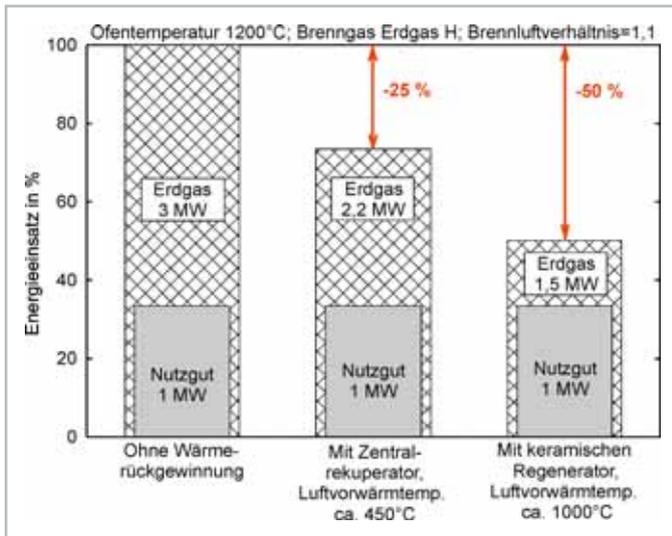


Bild 1: Einsparpotenzial durch Brennluftvorwärmung mittels Wärmerückgewinnung

Fig. 1: Savings potential by heat recovery by means of combustion air preheating

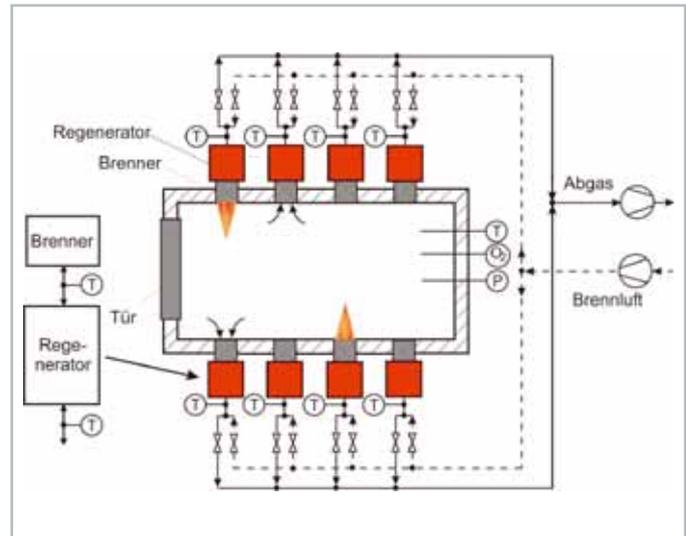


Bild 2: Schema für eine effektive Umsetzung an einem Wärmofen

Fig. 2: Schema of an implementation at a reheating furnace

duktion eines Schmiedewerkes mittlerer Größe liegt in der Größenordnung von rd. 30.000 t. Bei einem typischen spezifischen Energiebedarf der Schmiedeofen zwischen 2,0-4,0 GJ/t ergibt sich ein Energieverbrauch von rd. 100.000 GJ/a (**Tabelle 1**), verbunden mit den entsprechenden Brennstoffkosten. Bei großen Walzwerksofen werden so Brennstoffkosten von mehreren Mio. € pro Jahr erreicht. An diesen Anlagen ist ein erhebliches Einsparpotenzial vorhanden.

Die Wärmerückgewinnung mittels thermischer Regeneratoren ist in vielen Industriezweigen seit langem bekannt. Sie stellt keine grundlegend neue Technologie dar. Die Bereitschaft zur Umsetzung dieser Technik in Zweigen wie der Schmiede- und Walzwerkstechnik war bisher gering. Die Kapitalrückflusszeit wird als zu hoch angesehen. Bis vor wenigen Jahren waren keine geeigneten Brenner verfügbar, da die extrem hohe Brennstoffvorwärmung zu erhöhtem NO_x -Ausstoß führte und die Standfestigkeit nicht geklärt war. In jüngster Zeit haben die stark gestiegenen Energiepreise die Wirtschaftlichkeit für Regeneratorsysteme entscheidend verbessert. Betriebliche Erprobungen haben gezeigt,

dass die NO_x -Problematik nach den vorliegenden Erkenntnissen lösbar ist und eine zufriedenstellende Standfestigkeit der eingesetzten Komponenten erreicht wird.

Entwicklung eines neuen Beheizungssystems (ROREBS) für Wärmöfen

Zur qualitativ hochwertigen Beheizung von Nutzgütern werden von den Ofenbetreibern häufig Flachflammenbrenner gefordert. Die zurzeit verfügbaren Flachflammenbrenner sind mit Einbauten zur Drallerzeugung versehen. Diese bewirken einen hohen Druckverlust. Bei einer üblichen Brennluftvorwärmung mittels eines Zentralrekuperators fällt nur über den Brenner bereits ein Druckverlust von über 50 mbar an. Bei einer effizienten regenerativen Brennluftvorwärmung würde dieser Wert etwa verdoppelt werden. Die Investitions- und Betriebskosten für die dafür nötigen Brennluftgebläse steigen entsprechend. Des Weiteren sind die eingesetzten Einbauten zur Drallerzeugung in der Regel bei der hohen Temperaturbeanspruchung in einem regenerativen System nicht standfest. Daher waren bisher keine Flachflammenbren-

ner für einen Einsatz mit thermischen Regeneratoren verfügbar.

Es wurde ein neuer Flachflammenbrenner entwickelt, konstruiert und betrieblich getestet, der auf Einbauten zur Drallerzeugung verzichtet. Zusammen mit einem kompakten Regenerator wurde ein neues Regenerator-Brenner-System (ROREBS) geschaffen, das die Vorteile einer regenerativen Brennluftvorwärmung mit der Technik des Flachflammenbrenners verbindet. Der Flachflammenbrenner besteht im Inneren aus temperaturfesten keramischen Materialien. Auf den Einsatz von Kühl- und Spülluft kann daher verzichtet werden. Der Druckverlust des Brenners beträgt bei einer Luftvorwärmung von 1000 °C ca. 10 mbar. Daher wurde der Brenner mit einem kompakten Rohrregenerator kombiniert, der durch seinen Besatz aus Wabenkörpern einen sehr geringen Druckverlust von wenigen mbar aufweist. Dieses neue System ROREBS wurde an Prüfständen getestet, mittels numerischer Simulationsrechnungen (CFD) optimiert und an Wärmöfen von Schmiedewerken mit den Brenngasen Erdgas, Koksofengas und Konvertergas betrieblich erprobt.

Betriebliche Erprobung des ROREBS an Wärmöfen von Schmiedebetrieben

Ein Kammerofen und mehrere Herdwagenöfen wurden mit ROREBS ausgestattet. Einer dieser Öfen kann wahlweise mit Koksofengas und Konvertergas be-

Tabelle 2: Heizwert und Luftbedarf getesteter Brenngase
Table 2: Calorific value and air demand of tested fuel gases

	Erdgas	Koksofengas	Konvertergas
Heizwert	31,7 MJ/m ³	17,7 MJ/m ³	9,2 MJ/m ³
min. Luftbedarf ($\lambda=1,0$)	8,4	4,7	1,7

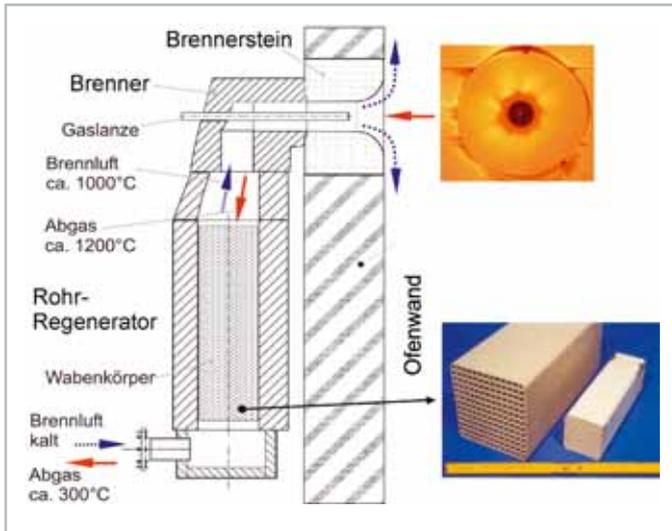


Bild 3: Neue Beheizungstechnik mit Regenerator und Flachflammenbrenner
Fig. 3: New heating technology with regenerator and flat flame burner



Bild 4: Neue Flachflammenbrenner in einem Herdwagenofen
Fig. 4: Flat flame burner in a bogie hearth furnace

trieben werde. Die anderen Öfen werden mit Erdgas betrieben. Diese Brenngase unterscheiden sich grundlegend in Heizwert und Luftbedarf (**Tabelle 2**). Ein mit acht ROREBS ausgestatteter Schmelzofen ist in **Bild 2** schematisch dargestellt. Jeder Brenner hat einen eigenen Regenerator. Das Abgas wird aus dem Ofen über die Brenner und Regeneratoren abgesaugt. Die Systeme werden taktend betrieben. Während ein Teil der Regeneratoren die Brennluft vorwärmt, wird das Abgas über andere Regeneratoren abgesaugt. Das Laden und Entladen der Regeneratoren verläuft im Gegenteil.

Ein Beheizungssystem bestehend aus Regenerator und Flachflammenbrenner ist in **Bild 3** im Detail dargestellt. Heißes Abgas wird vom Ofenraum über den Brenner zum Wärmespeicher geführt. Dort gibt das Abgas den Großteil seiner Wärme ab und verlässt den Regenerator am unteren Ende mit ca. 300°C. Im Gegenteil wird die Abgasabsaugung abgeschaltet und am Regeneratorfuß tritt nun kalte Brennluft ein. Diese wird durch den Wärmespeicher geleitet und auf ca. 1.000°C aufgeheizt. Als Wärmespeicher dienen keramische Wabenkörper. Die heiße Brennluft wird im direkten Anschluss in den Brenner geleitet.

Der Brenner ist so gestaltet, dass durch die Art der Luftzuführung ein Drall entsteht, der stark genug ist eine Flachflamme am anschließenden Brennerstein auszubilden. Für die Führung der Brennluft sind keine Einbauten erforderlich.

Dadurch weist dieser Brenner einen geringen Druckverlust auf und neigt nicht zu strömungsbedingtem Verschleiß.

Die Abgastemperatur wird am Regeneratorfuß gemessen. Bei Überschreitung eines Grenzwertes wird zur Schadensvermeidung die Absaugung von Abgas unterbrochen und eine thermische Überlastung nachgeschalteter Anlagenteile verhindert. Optional kann zusätzlich zwischen Regenerator und Brenner über ein Thermoelement die Brennlufttemperatur vor Brenner erfasst werden.

Beispielhaft ist in **Bild 4** ein erdgasbeheizter Herdwagenschmelzofen mit

ROREBS dargestellt, an dem pro Ofenseite fünf Systeme mit jeweils 300kW Brenngasanschlussleistung installiert wurden. Die neue Beheizungstechnik ist an diesem Ofen seit ca. vier Jahren in Betrieb. Bei ausgeglichenem Ofen und einer Betriebstemperatur von 700°C wird dort die Brennluft auf 500 bis 550°C vorgewärmt. Bei einer Ofentemperatur von 1.260°C erreicht die Brennlufttemperatur Werte zwischen 1.000°C und 1.100°C. In diesem Bereich wird der Ofen mit maximaler Leistung betrieben. In der anschließenden Ausgleichsphase fällt die Ofenleistung bis auf ca. 20% bis 30% des Anschlusswertes ab. Kon-

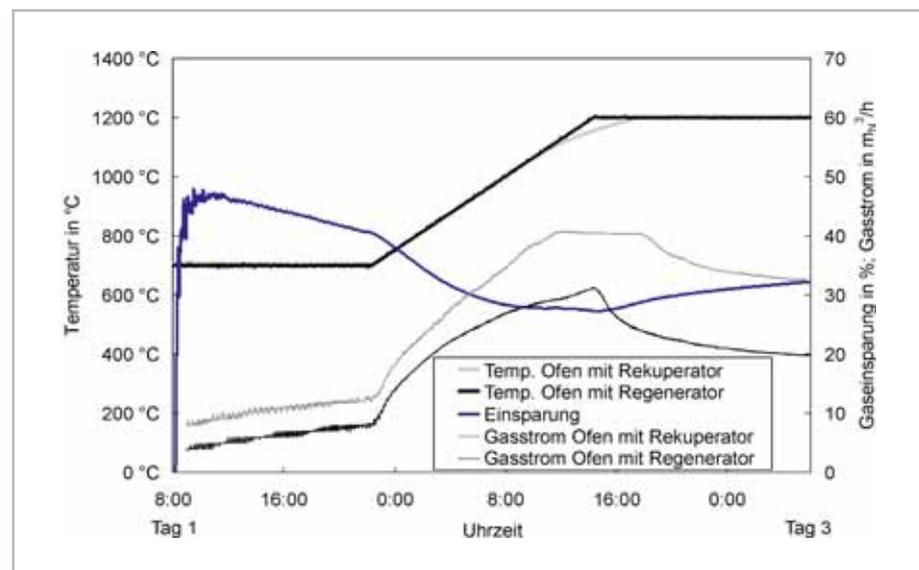


Bild 5: Erzielte Brenngaseinsparung an einem Wärmofen einer Schmiede
Fig. 5: Attained fuel savings at a reheating furnace in a forge

ventionelle Beheizungstechniken sinken hier deutlich im Wirkungsgrad. Mit dem neuen Beheizungssystem kann die Brennlufttemperatur nahezu konstant auf 1.000°C gehalten werden.

Erzielte Brenngaseinsparungen sind beim Betrieb eines Schmiedekammerofens mit vier ROREBS pro Ofenseite detailliert gemessen worden. Dieser Ofen ist seit über fünf Jahren in Betrieb. Ein Vergleich mit dem Rekuperatorbetrieb eines ansonsten baugleichen Nachbarofens hat ergeben, dass über einer gesamten Ofenreise mit dem neuen System eine Energieeinsparung von bis zu 30 % erreicht wird (**Bild 5**).

Fazit

Es wurde mit ROREBS ein neues Beheizungssystem für Hochtemperaturprozessanlagen entwickelt, konstruiert und betrieblich erprobt, das die effiziente Abwärmerückgewinnung mittels thermischer Regeneratoren mit den Vorzügen der Brennerbauart eines Flachflammenbrenners koppelt. Betrieblich wurden Einsparungen im Brennstoffbedarf (Energiekosten, CO₂-Emission) von 20-30 %

gegenüber heute üblichen Systemen nachgewiesen. Zusätzlich tritt trotz deutlich gesteigerter Brennlufttemperatur ein wesentlich geringerer Druckverlust (Gebläseleistung) bei Einsatz des neuen Systems auf. Die Eignung des Systems sowohl für Erdgas als auch für Prozessgase wurde demonstriert.

Die neuartigen Komponenten des ROREBS, Rohrregenerator und Flachflammenbrenner, werden im Detail weiterentwickelt. Sie werden sowohl für den Einsatz an anderen Industriefeuerungen, wie beispielsweise Pfannen- und Walzwerksöfen, als auch für den Betrieb mit alternativen Brennstoffen optimiert.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle

- bei den Industriepartnern G. Grimm Edelstahlwerk GmbH & Co. KG, Kind & Co. Edelstahlwerk GmbH & Co. KG und der Saarstahl AG (Ofenbetreiber)
- bei Andritz Maerz (Ofenbau) und R. Buchwald (Regenerator- und Brennerbau)

– für die finanzielle Unterstützung in mehreren Forschungsvorhaben durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sowie den Projektträger Jülich ■

Dr.-Ing. Sabine von Gersum
Elster GmbH, Lotte



Tel.: 0541 / 1214 374
sabine.gersum@elster.com

Dr.-Ing. Wolfgang Adler
VDEh – Betriebsforschungsinstitut GmbH

Tel.: 0211 / 6707 309
wolfgang.adler@bfi.de

Dipl.-Ing. Wolfgang Bender
VDEh – Betriebsforschungsinstitut GmbH



Tel.: 0211 / 6707 317
wolfgang.bender@bfi.de