

Erfahrungen mit Erdgas/Sauerstoff-Brennern an einem Kupolofen

Aktueller Stand des durch das BMBF geförderten Forschungsvorhabens „KUPOLOPT“.

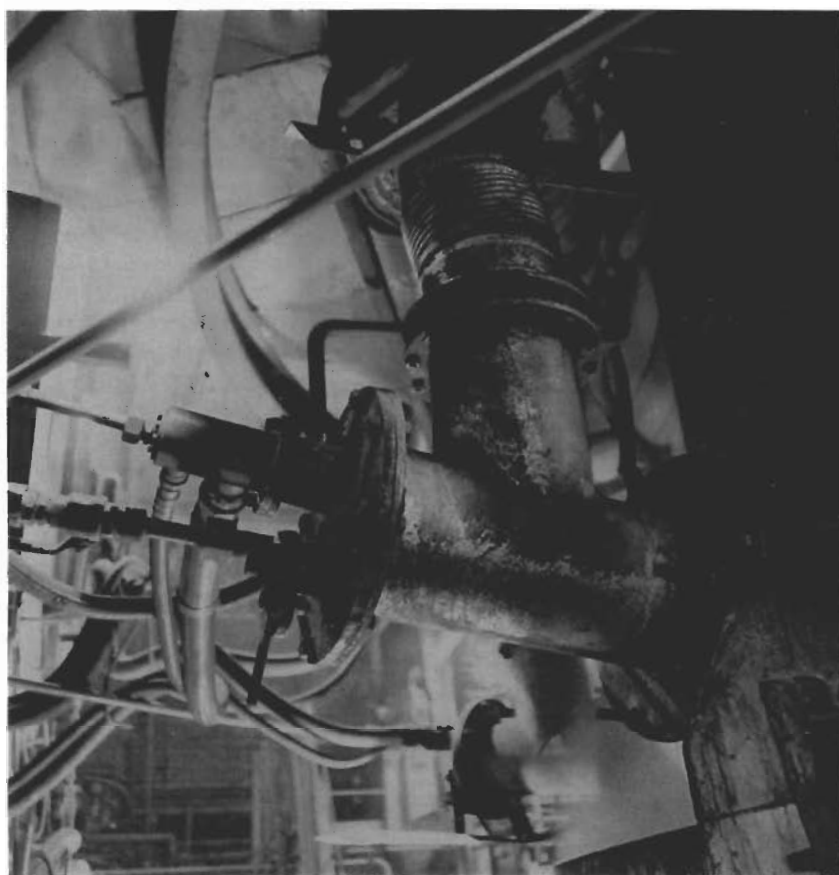


Bild 1: Blasform mit integriertem Erdgas/Sauerstoff-Brenner

suche durchgeführt, die im Gießereibetrieb entstehenden Stäube über in den Windformen integrierte Lanzen wieder in den Kupolofen einzublasen und zu verschlacken [2 bis 5]. Prinzipiell gelang dies, jedoch war die Masse an Stäuben, die so eingeblasen werden konnte, sehr begrenzt. Durch das Einbringen des Blasgutes und durch die kalte Förderluft wird der Bereich vor der Blasform abgekühlt, so dass ohne Beeinträchtigung des Schmelzprozesses nur eine geringe Staubmenge über einen kurzen Zeitraum eingeblasen werden kann. Hier setzt die Idee an, die Staublanze mit einem Erdgas/Sauerstoff-Brenner zu ergänzen. Diese Maßnahme ermöglicht eine direkte Wärmezufuhr in den Bereich vor der Blasform, wodurch nicht nur eine deutlich höhere Staubmasse eingeblasen, sondern auch eine kontinuierliche Einblasung ermöglicht werden kann.

Bereits während erster orientierender Versuche wurde sehr schnell deutlich, dass diese Anwendung ein weitaus größeres Potential hatte als lediglich die Möglichkeit, Reststoffe in den Kupolofen einzublasen und so zu beseitigen. In der Folge wurden weitere Versuche mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt. Dabei wurden sowohl verschiedene Stäube (z. B. FeSi-, SiC- oder kohlenstoffhaltige Stäube) eingeblasen als auch die Brenner als alternative Energiequelle eingesetzt [6, 7]. Die einzelnen Versuche zeigten, dass durch Einsatz dieser Technologie ein breites Spektrum von Eingreifmaßnahmen zur Verfügung steht, um den Schmelzprozess schneller und flexibler zu gestalten. Während dieser kurzen Versuche konnten aber anstelle grundlegender Ergebnisse nur Trends beobachtet werden.

Mit diesem Hintergrundwissen wurde die Technologie Anfang 2000 dem BMBF in Bonn vorgestellt und in dem Förderprogramm „Inte-

VON OTHMAR FRIELINGS DORF, HATTINGEN, MICHAEL WILCZEK, OBERHAUSEN, TORSTEN WIETING, AACHEN, HOLGER STRÜNING, STADTALLENDORF, JOCHEN SCHÄFER UND MICHAEL LEMPERLE, ESSEN.

Das mit dem Kurznamen „KUPOLOPT“ bezeichnete Forschungsvorhaben befasst sich mit der ökonomischen und ökologischen Optimierung von Kupolöfen in Gießereien. Das Erschmelzen von Gusseisen in Kupolöfen ist ein Verfahren von erheblicher Bedeutung.

Damit dieses seine Position im Wettbewerb mit anderen Schmelzverfahren stärken kann, wurde das vorliegende Projekt in die Reihe der förderungswürdigen Projekte innerhalb des BMBF-Förderprogramms „Integrierter Umweltschutz in der Gießereindustrie“ mit dem Titel „Ökologische und Ökonomische Optimierung des Kupolofen-Schmelzprozesses durch den Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern bei gleichzeitig möglicher Feststoffinjektion“ aufgenommen.

Die dem Projekt zugrunde liegende Idee entstand bereits 1994 [1]. Wegen der damaligen hohen Deponiekosten wurden vielfältige Ver-

grierter Umweltschutz in der Gießereindustrie“ mit dem genannten Titel im September 2001 schließlich genehmigt. An dem Projekt sind folgende Firmen bzw. Institute beteiligt:

- > Fritz Winter GmbH & Co KG, Stadtallendorf,
- > Ruhrgas AG, Essen,
- > Air Products GmbH, Hattingen,
- > Küttner GmbH & Co KG, Essen,
- > Fraunhofer Institut UMSICHT, Oberhausen,
- > IEHK Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen.

Das Projekt ist in vier Arbeitsblöcke unterteilt und hat eine Laufzeit von drei Jahren.

In dem ersten bereits abgeschlossenen Arbeitsblock soll der Einfluss der Erdgas/Sauerstoff-Brenner als externer Energielieferant untersucht und bewertet werden. Zu diesem Zweck wurden an einem Ofen der Firma Fritz Winter alle sechs Blasformen mit entsprechenden Erdgas/Sauerstoff-Brennern ausgerüstet. Da der Ofen bereits vor Projektbeginn mit einer Sauerstoffinjektion von 600 m³/h betrieben worden ist, wurde dieser Zustand als Basiszustand des Kupolofens definiert und messtechnisch erfasst. Die Ergebnisse dieses abgeschlossenen Blockes werden hier vorgestellt.

In den zukünftigen drei Arbeitsblöcken sollen verschiedene staubförmige Stoffe eingeblasen werden: angefangen bei staubförmigen

Legierungsstoffen und staubförmigen Kohlenstoffträgern über Stäube und Reststoffe aus dem Gießereibetrieb bis hin zu Stäuben aus gießereifremden Bereichen. Hierzu wurde im November 2002 eine Staubeinblasanlage der Firma ESCH installiert und in Betrieb genommen. Drei Brenner sind mit Staubbläzen ausgerüstet, die unabhängig voneinander mit Staub versorgt werden können.

Im Folgenden wird zuerst die Anlagentechnik beschrieben. Dazu gehören der Kupolofen der Fritz Winter GmbH & Co. KG sowie die für das Projekt aufgebaute Messtechnik. Es schließt sich die Darstellung der theoretischen Grundlagen für den Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern an. Dabei werden zunächst aus den thermodynamischen Berechnungen Wirkungsgrade abgeleitet. Mit Hilfe der Verbrennungsenthalpien wird im Anschluss das Substitutionspotential von Koks durch Erdgas bestimmt, das in der abschließenden Diskussion den bei den Messungen gewonnenen Ergebnissen gegenübergestellt wird.

Kupolofen

Die Messreihen wurden an dem Kupolofen des Werkes 2 der Firma Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG durchgeführt. Hierbei handelt es sich um einen Langzeit-Heißwindkupolofen der Firma Küttner GmbH. Dieser hat bei einer Höhe von 14 m einen inneren Durchmesser von 1,70 m. Der Heißwind wird über sechs Blas-

formen mit einem Durchmesser von 140 mm in die Schmelzzone geleitet, die zu Beginn dieses Projektes mit Erdgas/Sauerstoff-Brennern ausgerüstet wurden (**Bild 1**). Diese sind im Zentrum der Blasform angeordnet und verdecken nur ca. 20 % der Blasformfläche. Alle Brenner sind so konstruiert, dass sie im Zentrum eine Lanze entweder zur Staubinjektion oder zur zusätzlichen Sauerstoffinjektion aufnehmen können. Die Leistungsbereiche der Brenner liegen bei max. 1000 kW pro Brenner (100 m³ Erdgas/h und 200 m³ O₂/h). Bisher sind die Brenner mit max. 60 % ihrer Leistung betrieben worden.

Der Ofen wird ausschließlich mit Stahlschrott und Kreislaufmaterial betrieben. Der Koks stammt aus der tschechischen Republik und aus China. Dabei werden in der Regel 80 % tschechischer und 20 % chinesischer Koks gattiert. Des Weiteren wird er mit SiC- und Manganpresslingen sowie mit Kalksteinen beschickt.

Das entstehende Gichtgas wird über eine aus Sättiger und Venturi bestehende Nasswäsche, der ein Zyklon zur Grobstaubabscheidung vorgeschaltet ist, gereinigt. Durch diese Nassreinigung fällt die Gastemperatur von ca. 400 auf ca. 70 °C ab.

In der anschließenden Nachbrennkammer werden Kohlenmonoxid und Wasserstoff, die aufgrund der Betriebsweise eines Kupolofens gebildet werden, mit zusätzlicher Verbrennungs-

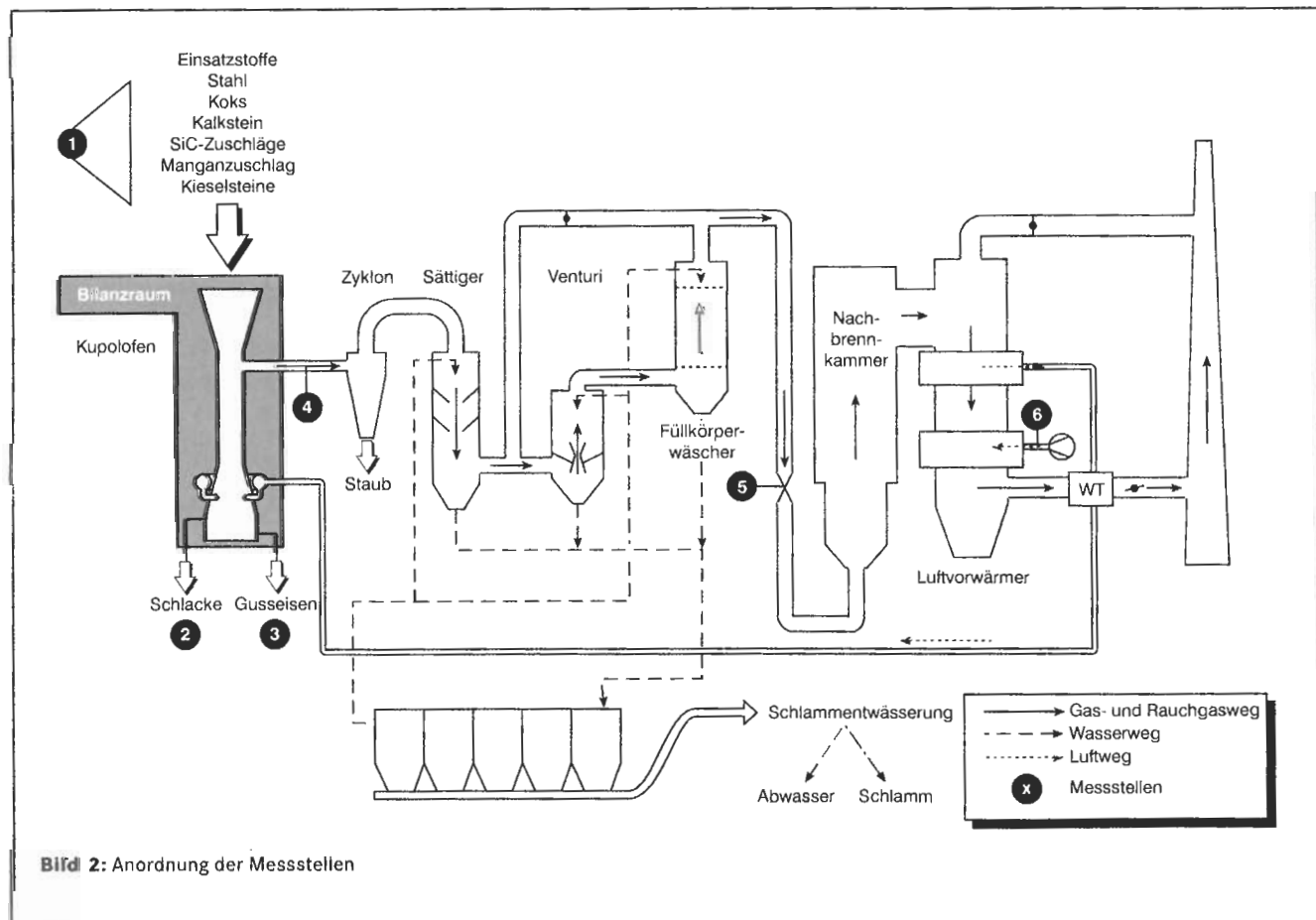


Bild 2: Anordnung der Messstellen

luft zu Kohlendioxid und Wasserdampf umgesetzt. Die frei gewordene Wärme wird zur Erzeugung des Heißwindes genutzt.

Messtechnik

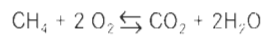
An dem Kupolofen wurden Messgeräte für eine umfangreiche Erfassung der erforderlichen Prozessgrößen installiert. Mit deren Hilfe werden sowohl die Messung der Gehalte an gasförmigen Gichtgaskomponenten als auch die Größen aus der Anlagensteuerung erfasst, wie z. B. Kaltwindvolumenstrom, Kühlwasservolumenströme, Erdgas- und Sauerstoffvolumenstrom sowie die Massen, die über die Gattierungsanlage in den Ofen eingebracht werden (Bild 2). Diese Größen werden zum einen benötigt, um die Stoff- und Energiebilanzen für den Kupolofen zu schließen, und zum anderen geben sie Aufschluss über die Umsetzungsgrade der in den Kupolofen eingebrachten Brennstoffe. Insbesondere die Gehalte an Methan und Wasserstoff zeigen, inwieweit die eingebrachte Erdgasenergie im Kupolofenprozess genutzt wird.

Über Gasanalysatoren werden die Gehalte an CO, CO₂, O₂, CH₄ und H₂ im Rohgas während der Versuchszeiträume kontinuierlich bestimmt und aufgezeichnet. Um dies durchführen zu können, ist die Messgasentnahme mit einer Rückspüleinheit ausgestattet, so dass sie den Bedingungen an der Messstelle mit sehr hohen Staubbelastungen und zeitweise extremen Temperaturen bis 1200°C standhält.

Neben diesen kontinuierlich aufgezeichneten Prozessdaten werden auch der Staubgehalt und die Feuchte im Rohgas bestimmt. Die Messungen erfolgen nach dem gravimetrischen Messverfahren bzw. nach der Psychrometernmethode und können nur stichprobenartig eingesetzt werden.

Theoretische Betrachtungen

Thermodynamische Berechnungen. Bei der vollständigen Verbrennung von Erdgas mit Sauerstoff entsteht am Austritt des Brenners als primäres Verbrennungsprodukt gasförmiges Wasser und Kohlendioxid gemäß folgender Reaktion:



Vereinfachend wird bei dieser Betrachtung das Erdgas als Methan gesehen.

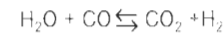
Bei den im Koksbett eines Kupolofens herrschenden hohen Temperaturen reagiert allerdings ein Teil des gebildeten Kohlendioxids und des Wasserdampfes mit dem Kohlenstoff des Koks zu CO und H₂ und mindert dadurch den Wirkungsgrad des Kupolofens. Auch ohne Erdgaseinsatz kommt es so zu einer teilweisen Vergasung des Koks durch CO₂ und H₂O, wobei hier Wasser durch die Luft- und Koksfeuchte eingetragen wird. Zur thermochemischen Beschreibung dieses Sachverhalts werden folgende Verbrennungsverhältnisse $\eta_{v,i}$ definiert [8]:

$$\eta_{v,Koks} = \frac{p_{CO_2}}{p_{CO_2} + p_{CO}}$$

$$\eta_{v,CH_4} = \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O} + p_{H_2}}$$

$$\eta_{v,total} = \frac{p_{CO_2} + p_{H_2O}}{p_{H_2O} + p_{CO_2} + p_{H_2} + p_{CO}}$$

Sind neben H₂O und CO₂ auch CO und H₂ im Ofengas enthalten, so sind deren Gehalte über das Wassergasgleichgewicht miteinander verknüpft:



mit

$$K(T) = \frac{p_{CO_2} \cdot p_{H_2}}{p_{H_2O} \cdot p_{CO}}$$

K(T) ist die Gleichgewichtskonstante und p_i sind die Partialdrücke der jeweiligen gasförmigen Komponenten. Dieses Gleichgewicht ist also insbesondere beim Einsatz von Erdgas zu berücksichtigen, da die Messungen einen Anstieg des H₂-Gehaltes im Gichtgas gezeigt haben.

Tabelle 1 zeigt den Vergleich der gemessenen Gehalte im Gichtgas mit den aus

Datum der Messung	23.04.2002 (ohne Brenner)		10.07.2002 (m. Brenner)		11.07.2002 (m. Brenner)		09.12.2002 (m. Brenner)	
	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung
Gichtgasvolumenstrom in m ³ /h	20535	14500	17491	16052	15508	16976	17714	17117
Falschluffvolumenstrom in m ³ /h		1600		2000		1700		2000
Gasanalyse (Volumenanteil in %)								
CO	13,51	13,62	18,1	18,4	17,74	17,69	13,63	13,6
CO ₂	15,18	15,22	12,84	12,9	13,71	13,7	15,45	15,4
H ₂	0,88	0,9	3,15	3	2,18	2,09	1,01	1,27
H ₂ O	5,7	1,69	5,7	3,5	4,8	2,73	3,72	2,45
O ₂	0,65	1,8	1,54	2,2	1,55	1,8	1,7	2,1
Einsatzstoffe für Verbrennung								
C aus Koks in kg/h	2128	2128	2478	2378	2568	2568	2395,5	2372
CaCO ₃ in kg/h	947	947	1110	1110	1128	1128	971	971
Windvolumenstrom in m ³ /h	15032	10600	14928	13000	13110	11800	15014	12100
O ₂ -Volumenstrom Brenner + Lanze in m ³ /h	700	700	1289,5	1289,5	1258	1258	1239	1100
Erdgasvolumenstrom (CH ₄) in m ³ /h	0	0	346,5	346,5	287	287	287	287
H ₂ O-Anteil im Wind in %	0,43	0,43	1	1	2,1	2,1	0,52	0,52
H ₂ O-Anteil im Koks in %		7	0,2 - 7	7	0,2 - 7	0,2	0,2 - 7	0,5
Kennzahlen								
CO/CO ₂	0,89	0,89	1,41	1,43	1,29	1,29	0,88	0,88
H ₂ /H ₂ O	0,15	0,53	0,55	0,86	0,45	0,77	0,27	0,52
CO ₂ /(CO ₂ +CO)	0,53	0,53	0,41	0,41	0,44	0,44	0,53	0,53
H ₂ O/(H ₂ +H ₂ O)	0,87	0,65	0,64	0,54	0,69	0,57	0,79	0,66
(CO ₂ +H ₂ O)/(CO ₂ +H ₂ O+CO+H ₂)	0,59	0,54	0,47	0,43	0,48	0,45	0,57	0,55

Tabelle 1. Thermodynamische Gleichgewichtsrechnung

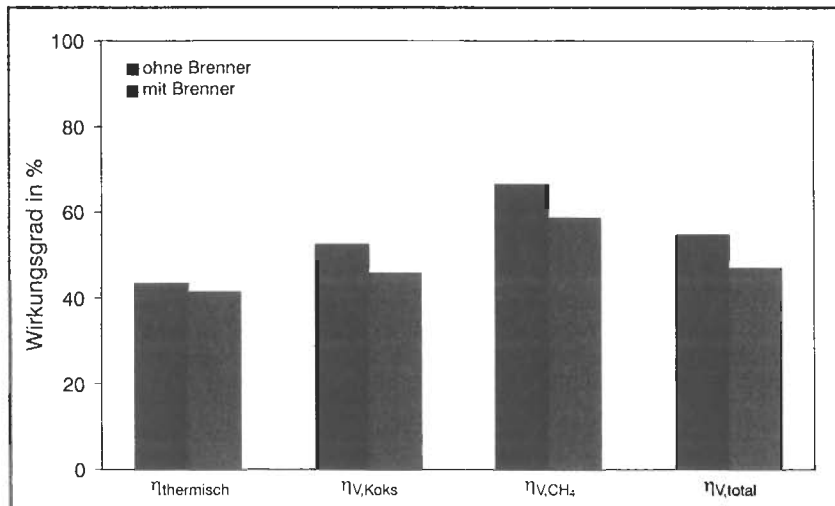


Bild 3: Verbrennungsverhältnisse und thermischer Wirkungsgrad

Datum	Zeitraum	Heißwind	gemess. Gichtgas	O ₂ über Lanze	O ₂ über Brenner	Erdgas	O ₂ -Gesamt
	h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h
ohne Brenner							
20. Feb 02	3	17015	20680	700	0	0	3916
21. Feb 02	3,5	17107	21409	700	0	0	3933
23. Apr 02	7	15003	18937	700	0	0	3536
10. Jul 02	4	14976	17194	684	0	0	3766
10. Dez 02	3	13075	14693	681	0	0	3372
mit Brenner							
11. Jul 02	2,5	13113	15595	665	358	176	3898
9. Dez 02	2	14901	17574	660	579	287	4593
10. Dez 02	5	13035	14220	679	580	287	4229
11. Dez 02	5	15082	16641	656	576	288	4624
12. Dez 02	3,5	15064	15682	591	699	346	4736

Tabelle 2. Eingestellte Betriebsparameter (Volumenströme)

einer Gleichgewichtsrechnung ermittelten Werten. Die letzten drei Spalten enthalten die Ergebnisse bei Einsatz der Erdgas/Sauerstoff-Brenner, die erste Spalte basiert auf den Ergebnissen ohne Erdgaseinsatz.

Aufgrund der Unsicherheiten bei der Bestimmung der Windverluste und des Wassereintrags durch Koks und Schrott wurde die Berechnung mit denjenigen Messgrößen durchgeführt, die mit relativ großer Genauigkeit bestimmt werden konnten. Dazu gehören der Sauerstoffgehalt im Gichtgas sowie die eingesetzten Mengen an Koks, Kohlenstoff, Erdgas und Sauerstoff. Für die Rechnungen wurde, wie bereits erwähnt, vereinfachend Methan anstelle von Erdgas eingesetzt.

Bei Variation der Gleichgewichtstemperaturen ergeben sich naturgemäß starke Änderungen in der gerechneten Zusammensetzung der Gasphase im Gleichgewicht. Es zeigt sich, dass für eine Gleichgewichtstemperatur von 1000 °C in den meisten Fällen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und Berechnung hergestellt werden kann (Tabelle 1). Es ist bekannt, dass die Boudouard-

Reaktion ($C + CO_2 \rightleftharpoons 2 CO$) unter 1100 °C kinetisch stark gehemmt ist und praktisch nicht mehr abläuft. Offenbar war unter den herrschenden Betriebsbedingungen auch das Wassergasgleichgewicht nahe 1000 °C schon „eingefroren“. Dass der gemessene Wassergehalt im Gichtgas immer höher als der errechnete ist, ist auf verdunstendes Oberflächenwasser der Charge zurückzuführen. Dieses Wasser hat jedoch aufgrund der geringen Temperatur im Oberofen keinen Einfluss auf das Wassergasgleichgewicht.

Der erhöhte Wasserdampfgehalt verfälscht aufgrund des verdunsteten Oberflächenwassers der Charge den Verbrennungswirkungsgrad η_{V,CH_4} bei Zugrundelegung der gemessenen Daten. Hier ist für Vergleichszwecke nur der errechnete Wert sinnvoll zu verwenden. Beim Vergleich der errechneten totalen Verbrennungsverhältnisse $\eta_{V,total}$ fällt auf, dass die Werte bei Erdgaseinsatz zwischen 43 % und 55 % schwanken; der Vergleichswert ohne Erdgas liegt hier bei 54 %.

Neben diesen Wirkungsgraden, die die Umsetzungsraten von Kohlenstoff und Was-

serstoff widerspiegeln, wird auch der thermische Wirkungsgrad betrachtet. Bei diesem Wirkungsgrad η_{therm} wird die für das Schmelzen des Gusseisens aufgewendete Energie auf die eingesetzte Energie bezogen [8]:

$$\eta_{therm} = \frac{\dot{Q}_{BE}}{\dot{Q}_{Koks} + \dot{Q}_{Abbr.} + \dot{Q}_{EG}}$$

mit

- \dot{Q}_{BE} = Energie des Basiseisens
- \dot{Q}_{Koks} = durch Koks eingetragene Energie
- $\dot{Q}_{Abbr.}$ = durch Abbrand von Silicium und Mangan bereitgestellte Energie
- \dot{Q}_{EG} = durch Erdgas eingetragene Energie

Bei der hier vorgenommenen Betrachtung wird die durch den Heißwind eingetragene Energie nicht in die Berechnung des Wirkungsgrades einbezogen, da diese durch die Verbrennung des Kohlenmonoxides und des Wasserstoffs im Gichtgas bereitgestellt wird und somit eine prozessinterne Wärmerückgewinnung darstellt.

In Bild 3 sind Mittelwerte der bei den Versuchen erzielten Wirkungsgrade für einen Betrieb mit und ohne Brenner-Einsatz gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass durch den Brennerbetrieb sowohl die Umsetzungsgrade als auch der thermische Wirkungsgrad abnehmen.

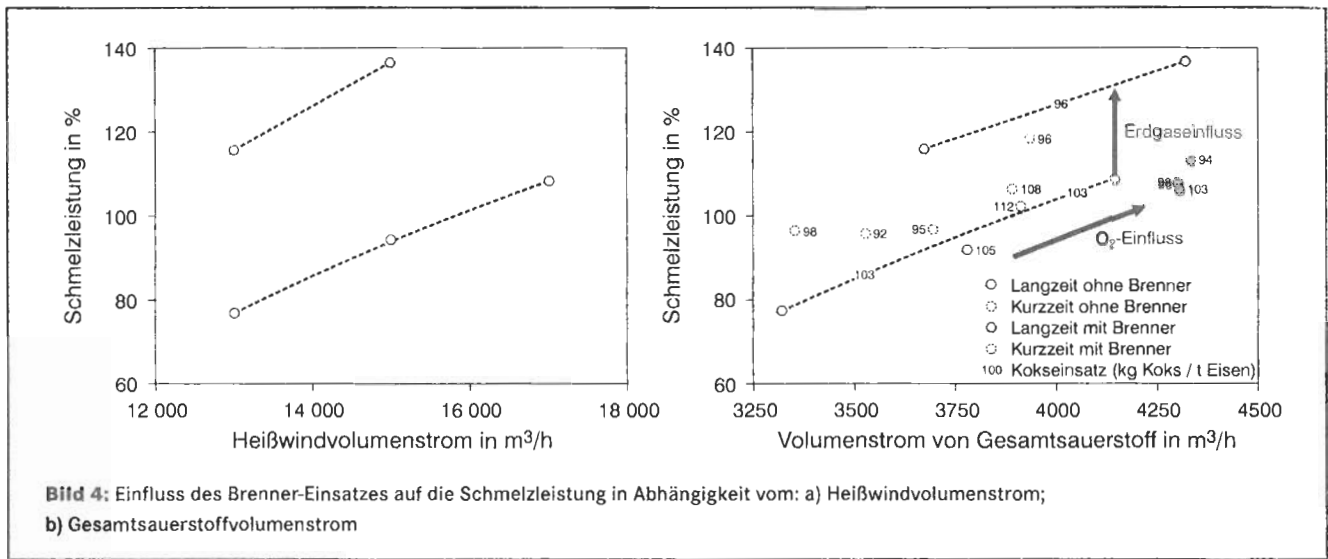
Verbrennungsenthalpien. Die dem Schmelzprozess zugeführten Verbrennungswärmen hängen linear von den Verbrennungsverhältnissen ab. Nach Neumann u. a. [8, 9] gelten die folgenden Beziehungen:

$$\Delta H_{Koks} = 8662 \frac{kJ}{kg_{Koks}} + 21250 \frac{kJ}{kg_{Koks}} \cdot \eta_{V,Koks}$$

$$\Delta H_{CH_4} = 1590 \frac{kJ}{m^3} + 34250 \frac{kJ}{m^3} \cdot \eta_{V,CH_4}$$

Dabei wird für den Koks einen Kohlenstoffgehalt von 90 % angenommen.

Unter Zugrundelegung eines aus den Messungen abgeleiteten mittleren η_{V,CH_4} -Wertes von 60 % beträgt die durch den Erdgaseinsatz nutzbare Verbrennungswärme 22 140 kJ/m³_{Erdgas} bzw. 6,35 GJ/h bei einem Erdgaseinsatz von 287 m³/h. Für die Koksverbrennung ergeben sich 18437 kJ/kg_{Koks} bei $\eta_{V,Koks} = 0,46$ bzw. 44,25 GJ/h bei einem Kokeinsatz von 2400 kg/h. Daraus ergibt sich ein Anteil des Erdgases am nutzbaren Energieeintrag von 12,6 %. Der Erdgasanteil ließ sich für die Messungen nicht beliebig erhöhen, da einerseits aufgrund der anwachsenden Schmelzleistung die installierte Gattierungsanlage der Firma Winter nicht Schritt halten konnte und andererseits eine Beschränkung des H₂-Volumenanteils im Gichtgas von 4 % eingehalten werden sollte.



Diskussion der Ergebnisse

Für die Ermittlung der Auswirkungen des Einsatzes der Brenner werden jeweils 5 Zustände ohne und mit Brenneinsatz betrachtet. Die wesentlichen Stellgrößen sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. Aufgrund der Einbindung des Ofens in einen laufenden Produktionsprozess war es in einigen Fällen nicht möglich, den eingestellten Betriebszustand über einen längeren Zeitraum aufrechtzuerhalten. Vor den in **Tabelle 2** genannten Messzeiträumen wurde eine Stunde lang ein stationärer Betriebszustand eingehalten, um in einen Gleichgewichtszustand zu gelangen.

Nach den ersten Messungen und deren Bilanzierung stellte sich heraus, dass die ermittelten Heißwindvolumenströme nicht den tatsächlich in den Ofen gelangten Windvolumenströmen entsprechen konnten. Die Windvolumenströme wurden, wie aus **Bild 2** hervorgeht, vor dem Rekuperator gemessen. Bei einer den ersten Messungen folgenden Revision wurde dort eine Leckage festgestellt und beseitigt. Für die Bilanzierung musste daher ein Faktor eingeführt werden, der die Verluste zwischen der Messstelle und der tatsächlichen Einblasstelle repräsentiert. Im Gegensatz zu den theoretischen Betrachtungen, bei denen der Heißwindvolumenstrom die Zielgröße einer Berechnung ist, wurde bei der Bilanzierung der Verlustfaktor konstant mit 10 % für die vor der Revision durchgeführten Messungen und mit 2 % für die Messungen nach der im Juni 2002 erfolgten Revision angepasst.

Neben der Bestimmung des Heißwindvolumenstroms ist auch die Bestimmung des Gichtgasvolumenstroms als unsicher einzustufen. Dieser wurde daher aus der Massenbilanz für Stickstoff errechnet und dem gemessenen gegenübergestellt. Anhand dieses Vergleiches ist zu erkennen, dass die genannte Revision im Juni auch zu einer Verbesserung der Bestimmung des Gichtgasvolumenstroms geführt hat.

Schmelzleistung. Durch Beobachtungen über den gesamten Messzeitraum konnte durchschnittlich der in **Bild 4** dargestellte Zusammenhang ermittelt werden. In **Bild 4a** ist dargestellt, wie sich die Schmelzleistung bei bestimmten Betriebszuständen mit und ohne den Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern verändert.

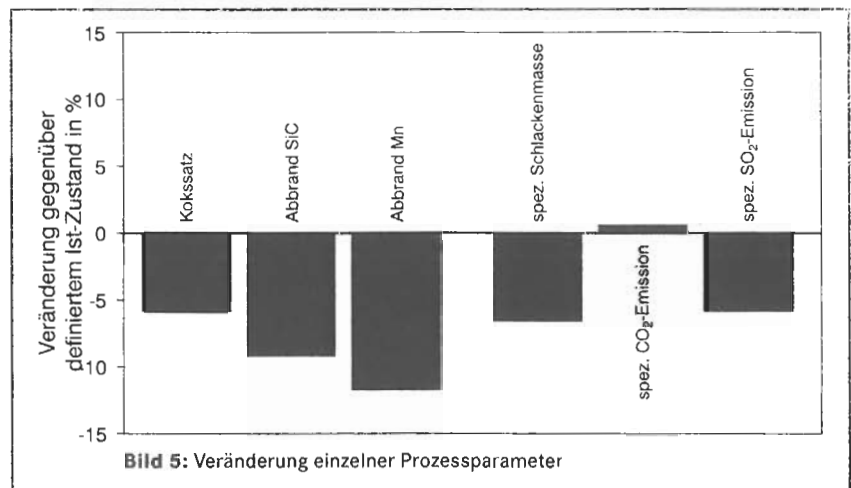
Die Schmelzleistung ist nicht allein von dem Heißwindvolumen, sondern vielmehr von dem gesamten eingetragenen Sauerstoffvolumen abhängig (**Bild 4b**). Dieser Zusammenhang wird auch durch Neumann [8] gestützt. Durch einen erhöhten Sauerstoffeintrag kann der spezifische Koksseinsatz nicht verändert werden. Die Schmelzleistung steigt entlang einer Geraden konstanten Koksseinsatzes an. Durch eine Erhöhung des Sauerstoffeintrages um ca. 15 % steigt die Schmelzleistung um ca. 20 % an.

Durch den Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern kann ein Teil der Koksenergie durch Erdgasenergie substituiert und damit der Koksseinsatz reduziert werden. Durch diese Reduktion steht in dem Ofen mehr Raum für metallischen Einsatz zur Verfügung, so dass die Schmelzleistung auch auf diese Weise gesteigert werden kann.

Nach den Langzeitbeobachtungen ist dadurch eine Steigerung der Schmelzleistung um 21 % möglich.

In den kurzen Messzeiträumen, die fast über ein Jahr verteilt durchgeführt worden sind, können diese Beobachtungen bezüglich der Schmelzleistung jedoch nur in Teilen bestätigt werden, was auf einen starken Einfluss von schwankenden Randbedingungen wie der Reizezeit des Ofens, der Einsatzstoffe oder der Feuchte des Kokes und der Luft zurückzuführen ist. Sie sind aber durch Langzeitaufnahmen der Firma Winter gestützt.

Spezifischer Koksseinsatz. Bei der Berechnung des spezifischen, auf die Schmelzleistung bezogenen Koksseinsatzes wurde auch durch eine Rückrechnung aus der im Gichtgas gemessenen Feuchte der Wassergehalt des Kokes bestimmt, der aufgrund der Witterungsbedingungen stark variierte. Für die Zustände ohne und mit Einsatz der Erdgas/Sauerstoff-Brenner wurde der so bestimmte spezifisch, wasserfrei (wf) gerechnete Koksseinsatz gegenübergestellt. Dabei konnte im Mittel eine Reduzierung des spezifischen Koksseinsatzes um 6 % oder ca. 6 kg/t Eisen erzielt werden (**Bild 5**).



Aus den in den theoretischen Betrachtungen ermittelten nutzbaren Verbrennungswärmen errechnet sich ein Koks/Erdgas-Energieäquivalent von

$$\frac{18437 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{Koks}}}}{22140 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3_{\text{Erdgas}}}} = 0,83 \frac{\text{m}^3_{\text{Erdgas}}}{\text{kg}_{\text{Koks}}}$$

Mit einer Schmelzleistung von 28,5 t/h bei 287 m³/h Erdgas ergibt sich ein spezifischer Erdgasverbrauch von rund 10 m³/t Eisen. Energetisch entspricht dies 12 kg Koks, die abgezogen werden könnten. Dieser Wert kann aber nicht erreicht werden, da der Kohlenstoffgehalt im Basiseisen zu stark absinkt.

Silicium- und Manganabbrand. Für die Bestimmung des Silicium- und des Manganabbrandes mussten vereinfachende Annahmen getroffen werden, da eine kontinuierliche Probenahme der gattierten Stoffe nicht möglich war. Es wird daher für diese Stoffe eine konstante Zusammensetzung angenommen. Lediglich die Silicium- und Mangangehalte des eingehenden Eisens wurden variabel gehalten und durch eine Rückrechnung aus der Massenbilanz bestimmt. Bei dieser Berechnung wird für die Umsetzung des Siliciums und des Mangans angenommen, dass beide entweder im Gusseisen gelöst oder mit Sauerstoff zu Oxiden umgesetzt werden. Anhand der durchgeführten Gusseisen- und Schlackeanalysen wurden die Ausgangsströme bestimmt.

Durch diese Annahmen konnten die Abbrände für Silicium und Mangan bestimmt werden. Bei der Auswertung zeigt sich, dass durch den Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern der Abbrand des Siliciums um ca. 9 % und der des Mangans sogar um 12 % gesenkt werden konnte. Diese Absenkungen der Abbrände entsprechen auch den Beobachtungen der Firma Fritz Winter über die bisherige Projektdauer.

Qualität des Basiseisens. Grundlegende Bedingung für den Einsatz der Erdgas/Sauerstoff-Brenner ist eine unveränderte Qualität des Basiseisens. Wie metallographische Untersuchungen des Basiseisens im Rahmen der Qualitätssicherung bei Fritz Winter zeigen, ist kein Unterschied in der Gefügeausbildung festzustellen.

Ein Kriterium für die Qualität des Gusseisens ist die Zellenzahl. Messungen des konventionell erzeugten Gusseisens ergaben eine Zellenzahl von 256 Zellen/cm². Beim Einsatz der Erdgas/Sauerstoff-Brenner wird ein minimaler Zuwachs auf 289 Zellen/cm² ermittelt, bedingt durch die Messmethode liegt die vorliegende Abweichung innerhalb der betriebsüblichen Toleranz und stellt daher keine Qualitätsveränderung dar.

Bild 6 zeigt die Graphitausscheidung bei Gusseisen mit Lamellengraphit, das ohne (Bild 6a) und mit Brenneinsatz (Bild 6b) erzeugt wurde. Auch hier ist kein Einfluss des Brenneinsatzes zu erkennen.

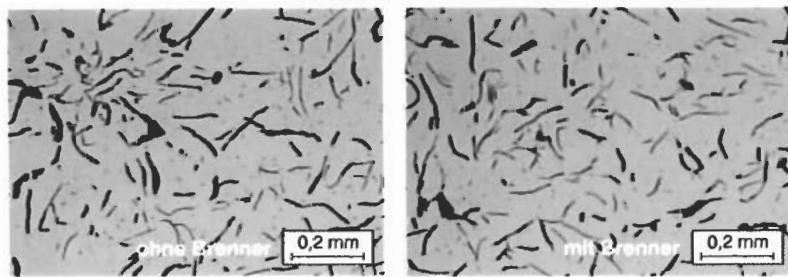


Bild 6: Graphitausscheidungen des Basiseisens

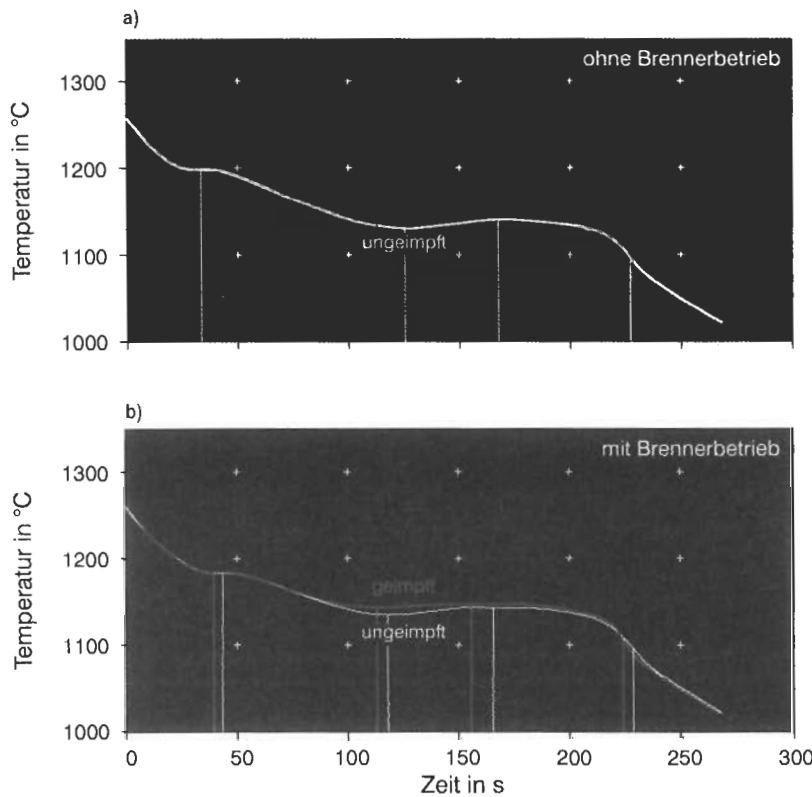


Bild 7: Abkühlkurven des Basiseisens:
a) ohne, b) mit Brennerbetrieb

Die ermittelte chemische Zusammensetzung des Basiseisens bei Brenneinsatz zeigt ebenfalls keinen signifikanten Einfluss. Die auftretenden Abweichungen liegen innerhalb der geforderten Toleranzen. Ergänzt wird die chemische Analyse durch eine thermische Analyse des Basiseisens, durch die anhand der ermittelten Temperaturintervalle Aussagen über die vorliegenden Gefügeformen getroffen werden können. In Bild 7 sind die Abkühlkurven der thermischen Analyse gezeigt. Die so ermittelten Umwandlungstemperaturen für die entsprechenden Gefüge des mit Brenneinsatz erzeugten Gusseisens entsprechen weitgehend denen des konventionell erzeugten Gusseisens (Tabelle 3).

Betriebsart	Umwandlungstemp. in °C		
	T _γ	T _α	T _β
konventionell	1199	1179	1105
mit Brennerbetrieb	1183	1168	1102

Tabelle 3. Umwandlungstemperaturen des Basiseisens

Anhand der im Gusseisen vorhandenen Oxide lassen sich Aussagen über die Neigung zum Auftreten von Gussfehlern machen.

Wie in **Bild 8** gezeigt ist, sind die Oxidspektren von konventionell und mit Brenner erzeugtem Basiseisen nahezu gleich. Bei konventionell erzeugtem Basiseisen wird ein Gesamtsauerstoffgehalt von 28 ppm ermittelt, mit Brenner liegt dieser Wert bei 24 ppm. Diese Werte weisen darauf hin, dass der mit den Erdgas/Sauerstoff-Brennern eingebrachte Sauerstoff nicht im Basiseisen gelöst wird und deshalb keine Beeinflussung des Basiseisens bewirkt.

Die auftretenden Abweichungen stellen keine Veränderung der Gussqualität dar und sind auf Streuungen der Untersuchungsverfahren zurückzuführen. Ein Einfluss der Erdgas/Sauerstoff-Brenner auf die Qualität des Basiseisens wurde nicht festgestellt.

Ökologische Auswirkungen. Durch die Reduzierung des Abbrandes von Silicium und Mangan sowie durch die Reduzierung des Koks-einsatzes wird auch der Eintrag an Schlackebildnern in den Ofen verringert. Bedingt durch diesen Mindereintrag, konnte auch die spezifische, auf die Masse des produzierten Basiseisens bezogene Schlackenmasse um 7 % reduziert werden (Bild 5).

Auch auf die Zusammensetzung der Schlacke hat der Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern keinen signifikanten Einfluss. In **Bild 9** ist die Zusammensetzung der Schlacke angegeben. Die Basizität der Schlacke betrug bei den Messungen bei konventioneller Fahrweise 0,71 und bei den Messungen mit Brenner-Einsatz 0,63, wobei diese Werte charakteristisch für saure Schlacken sind. Im weiteren Projektverlauf, bei dem Stäube eingeblasen werden, wird der Einfluss auf die Basizität zu beobachten sein. Für den Einsatz der Erdgas/Sauerstoffbrenner gilt, dass durch die nicht signifikant geänderte Zusammensetzung eine übliche Verwertung der Schlacke weiter-

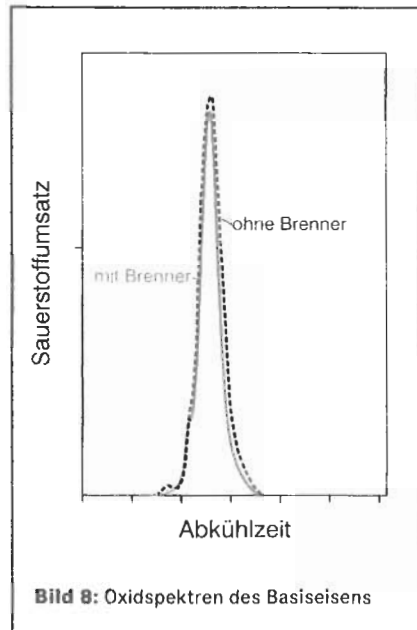


Bild 8: Oxidspektren des Basiseisens

hin gewährleistet ist. Ein weiterer positiver ökologischer Effekt, der mit der Reduzierung des Koks-einsatzes unmittelbar verknüpft ist, ist die Reduzierung der SO₂-Emissionen des Kupolofens. Koks bildet in der Regel die einzige Schwefelquelle. Bei einer Reduzierung des Eintrages von Koks wird demnach auch die Schwefelfracht reduziert. Der Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern führt zu einer Reduzierung der SO₂-Emissionen um 6 % (Bild 5).

Die spezifischen Kohlendioxid-Emissionen werden entgegen der Erwartungen jedoch nicht signifikant reduziert. Dies ist auf die leichte Verschlechterung des energetischen Wirkungsgrades durch den Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern zurückzuführen (Bild 5 und vgl. theoretische Betrachtungen).

Energetische Auswirkungen. Energie wird in den Ofen im Wesentlichen durch drei Komponenten (Koks, Heißwind und Siliciumcarbide)

eingebracht. Abgeführt wird die Energie durch das flüssige Basiseisen, durch die latente Wärme im Gichtgas, die durch die Komponenten CO und H₂ gekennzeichnet ist, sowie durch die fühlbare Wärme des Gichtgases und der Schlacke.

Durch den Einsatz der Erdgas-Brenner ändert sich der eingestellte energetische Haushalt des Ofens. In **Bild 10** sind diese Veränderungen, bezogen auf die produzierte Masse Basiseisen, dargestellt. Wie dort zu erkennen ist, wird der energetische Eintrag durch Koks und Silicium aufgrund der bereits beschriebenen Reduzierungen um 6 % bzw. 9 % vermindert. Wegen des stärkeren Einsatzes von Sauerstoff sinkt auch der Bedarf an spezifischem Heißwind um 6 %, wodurch auch weniger Heißwindenergie in den Ofen eingetragen wird. Den energetischen Einsparungen steht aber ein vermehrter Einsatz der Erdgasenergie gegenüber, so dass insgesamt 2,5 % mehr Energie zur Erschmelzung des Basiseisens in den Ofen eingetragen werden muss.

Diese zusätzlich eingetragene Energie wird als latente Wärme des Gichtgases ausgetragen, die letztendlich nicht vollständig im Heißwind zurückgewonnen werden kann. Dies deutet auf einen schlechteren Umsatz des Kohlenstoffs hin, was auch bereits bei der theoretischen Betrachtung gezeigt worden ist. Die spezifische Energie des Basiseisens bleibt wie erwartet konstant. Die thermische fühlbare Wärme des Gichtgases sinkt aufgrund eines geringeren Stickstoffvolumenstromes und die fühlbare Wärme der Schlacke aufgrund einer geringeren Schlackenmasse ab.

Zusammenfassung

Der Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern am Kupolofen wird im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundprojektes untersucht. Die Erdgas/Sauerstoff-Brenner sollen neben einer teilweisen Substitution des Kokses die Injektion großer Staubmassen in die Blasformebene des Kupolofens ohne ein Kalt-

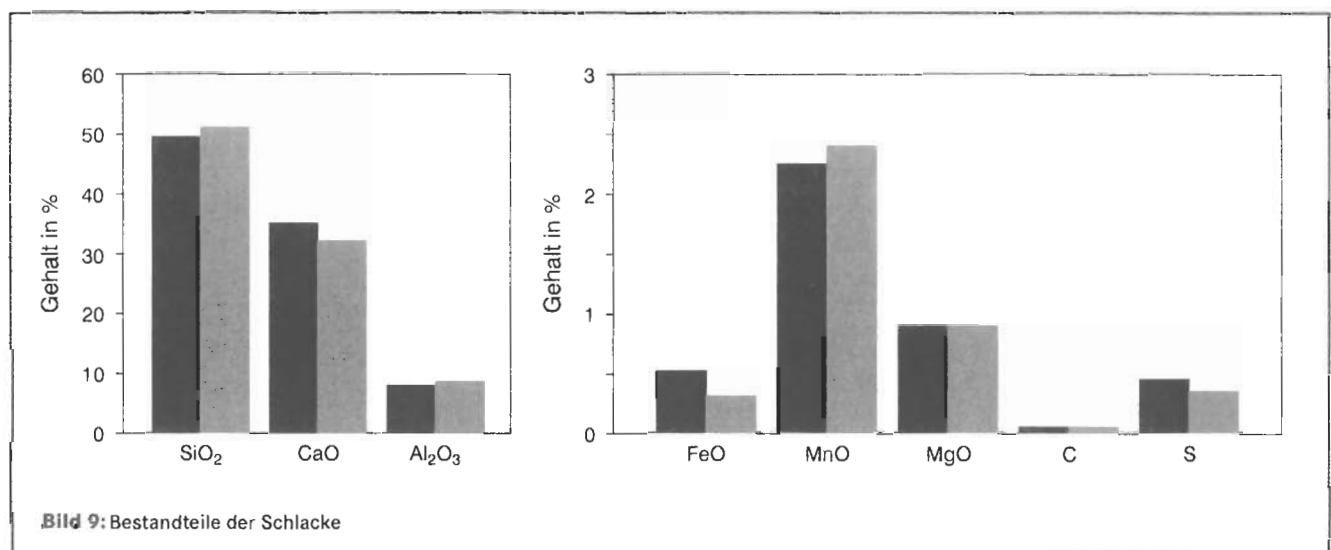
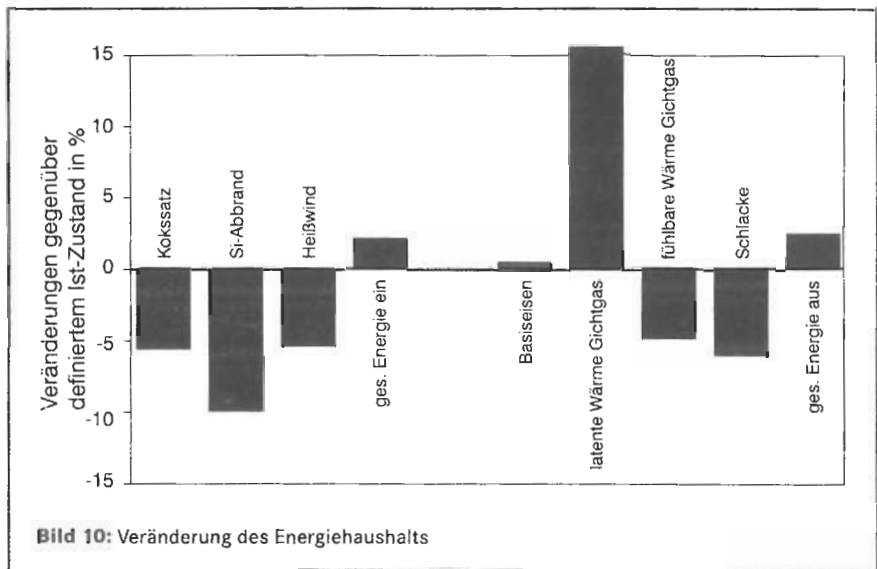


Bild 9: Bestandteile der Schlacke



blasen ermöglichen. Hierdurch werden eine Verbesserung des Umweltverhaltens und die Verwertung von gießereieigenen und gießereifremden Stäuben angestrebt. Im ersten Abschnitt des Projektes wurde der Einfluss der Erdgas/Sauerstoff-Brenner ohne Staubinjektion auf den Kupolofen untersucht.

Die Messungen zeigen eine Steigerung der Schmelzleistung um ca. 50 % bei einer Reduzierung des Kokssatzes und der damit verbundenen SO_2 -Emissionen um 6 %. Weiterhin konnten beim Einsatz der Erdgas/Sauerstoff-Brenner gegenüber der konventionellen Betriebsweise 12 % Mangan- und 9 % Siliciumpresslinge abgezogen werden. Durch diese Reduzierungen vermindert sich auch die Schlackenmasse. Dem steht ein leicht erhöhter spezifischer Energieeinsatz gegenüber. Die regelmäßigen Untersuchungen des Basiseisens mit der thermischen Analyse und chemischen Analyse, sowie die Ermittlung der Oxidverteilung zeigen keine Qualitätsveränderung. Die betriebsinternen Qualitätsanforderungen wurden in allen Fällen erfüllt. Ebenso wurde keine signifikante Änderung der Schlackenzusammensetzung festgestellt. Langfristige Erfahrungen des Betriebspersonals machen deutlich, dass durch Einsatz der Erdgas/Sauerstoff-Brenner die Flexibilität des Ofenbetriebs deutlich erhöht wird. Sowohl die Installation als auch der Betrieb der Brenner sind mit geringem Aufwand durchführbar.

Im ersten Abschnitt des Forschungsprojektes haben die Erdgas/Sauerstoff-Brenner hinsichtlich Schmelzleistung und Umweltverhalten überzeugt. In anschließenden Messreihen ist die Injektion von gießereieigenen Stäuben vorgesehen. Hierbei wird auch das Einblasen von kohlenstoffhaltigen Stäuben zur Aufkohlung des Basiseisens untersucht. Ziel ist dabei eine weitere Senkung des Kokssatzes bei Ausnutzung der bestehenden Leistungsreserven der Brenner.

Dipl.-Ing. Othmar Frielingsdorf, Air Products GmbH, Hattingen; Dipl.-Ing. Michael Wilczek, Fraunhofer Institut UMSICHT, Oberhausen; Dipl.-Ing. Torsten Wieting, Institut für Eisenhüttenkunde, Aachen; Dipl.-Ing. Holger Strüning, Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co KG, Stadtallendorf; Dr. Jochen Schäfer, Ruhrgas AG, Essen; Dr. Michael Lemperle, Küttner GmbH, Essen

Literatur:

- [1] Frielingsdorf, O.; Künze, M.: Vortrag in der Sitzung des VDG-Fachausschusses Schmelztechnik am 24.10.1995 in Hattingen.
- [2] Freunsch, F.; Rudolph, A.: Giesserei 76 (1989) Nr. 6, S. 328-335.
- [3] Kallsen, J.; Hunecke T.: Giesserei-Praxis (1991) Nr. 9/10, S. 149-154.
- [4] Wolf, K.: Giesserei 84 (1997) Nr. 3, S. 12-16.
- [5] Winterhalter, J.; Wolf, G.: Giesserei 86 (1998) Nr. 2, S. 27-31.
- [6] Künze, M.; Gador, R.; Frielingsdorf, O.; Mannek, H.: Gaswärme International, 46 (1997) Nr. 7/8, S. 348-353.
- [7] Niehoff, T.; Frielingsdorf, O.; Neumann, F.; Künze, M.: Giesserei 85 (1998) Nr. 2, S. 32-36.
- [8] Neumann, F.: Gusseisen. Expert Verlag. 2. Aufl. 1999.
- [9] Neumann, F.; Niehoff, T.; Frielingsdorf, O.; Künze, M.: Slevarentsvi (1998) Nr. 7/8; S. 253-258.