

# Verbesserte Technik zum Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen

*Improved pulverized coal injection technology for the blast furnace*

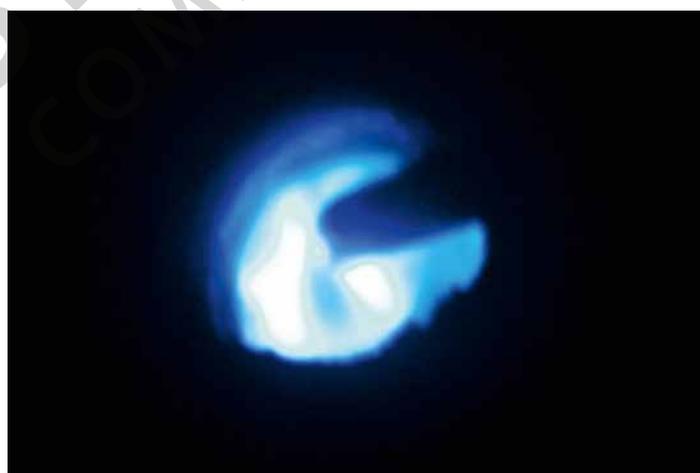
Robin Schott

Das Hochofenverfahren ist seit Jahrzehnten eines der wichtigsten Verfahren zur Roheisenerzeugung. Dabei wird die Prozessenergie hauptsächlich über Koks gedeckt. Eine bedeutende Maßnahme hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ist die Reduzierung des Kokssatzes durch das Einblasen von Ersatzbrennstoffen wie Kohlenstaub, Öl oder Gas über die Blasformen in die Wirbelzone des Hochofens. Nachfolgend werden fünf wichtige Entwicklungsschritte der Kohlenstaubeinblastechologie näher vorgestellt: die Minimierung des Transportgasbedarfs, die Entwicklung des Anlagendesigns, die Implementierung einer schnellen und genauen Regelung der Einblasrate, der Dichtstromtransport über lange Förderdistanzen und die Oxycoal<sup>+</sup>-Technik. Abschließend werden zukünftige Trends beim Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen betrachtet.

*The blast furnace process is the most important process to produce crude iron. The necessary process energy is mainly covered by coke. A decisive measure in improving cost effectiveness by reducing the blast furnace coke rate was the injection of auxiliary fuels like pulverized coal, oil or natural gas into the raceway of the blast furnace. This paper will focus primarily on five important steps of continuous improvements in pulverized coal injection technology including the reduction of transport and injection gas to a minimum, the development of PCI-plant design, the implementation of a fast and accurate injection rate control system, long-distance dense phase conveying and the Oxycoal<sup>+</sup> technology. Finally future trends concerning pulverized coal injection into the blast furnace are discussed.*

Die meisten Betreiber von Hochöfen blasen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch Minimierung des Kokssatzes feste, flüssige oder gasförmige Ersatzbrennstoffe in ihre Hochöfen ein. Bild 1 gibt einen Überblick über die Anzahl der Hochöfen in Abhängigkeit von dem jeweilig benutzten Ersatzbrennstoff und den Kontinenten der Erde. Fast die Hälfte aller Hochofenbetreiber (47,7 %) blasen Kohlenstaub ein, wohingegen 4,1 % Öl, 11,9 % Gas und 0,2 % Kunststoff einblasen [1]. In 35,9 % aller Hochöfen weltweit wird überhaupt kein Ersatzbrennstoff eingeblasen.

Aufgrund des billigen Ölpreises in den 60er-Jahren des letzten Jahrhunderts wurde oft Öl als Ersatzbrennstoff im Hochofen eingesetzt. Erst nach der zweiten Ölkrise in den frühen 80er-Jahren und der damit verbundenen Verteuerung des Öls wurde der Ruf nach einer preisgünstigeren Alternative immer lauter. Es wurde vorgeschlagen, Kohlenstaub als Ersatzbrennstoff zur Senkung der Koksrate im Hochofen zu verwenden, da der Preis von Kohle im Vergleich zu Öl und Gas fast überall auf der Welt signifikant geringer war und immer noch ist. Bedenkt man im Weiteren die ebenfalls deutliche Preisdifferenz zwischen Kohle und Koks, so wird deutlich, dass das Einblasen von Kohlenstaub in



Blick in die Wirbelzone des Hochofens: Optimale Vergasung des eingeblasenen Kohlenstaubs

View into the raceway of the blast furnace: optimal gasification of injected pulverized coal

Foto: rogesa

den Hochofen eine ausschlaggebende Maßnahme zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Hochofenbetriebs ist. Zu diesem Zweck musste jedoch eine Kohlemahltröcknungs- und Einblastechologie entwickelt werden.

Die Betrachtungen des Einblasens von Kohlenstaub in den Hochofen starten mit dem Prozess der Kohlenstaubvergasung innerhalb der Blasform und der Wirbelzone des Hochofens. Für einen optimalen Hochofenprozess muss möglichst der gesamte eingeblasene Kohlenstaub in der Flugphase vergast werden. Dazu stehen ca. 10 bis 20 ms zur Verfügung [2]. Dies ist der Zeitraum vom Eintritt der Kohlenstoffpartikel in den Heißgasstrom bis zum Ende der Wirbelzone bzw. in den Randbereich der Koksschüttung. In dieser kurzen Zeitspanne laufen folgende Reaktionsschritte ab: Zuerst werden die eingeblasenen Kohlenstaubkörner auf Zündtemperatur aufgeheizt. Dies erfolgt durch konvektiven Wärmeübergang vom heißen Wind und durch Strahlungswärmeübergang von der Blasformwand sowie durch Einstrahlung aus der Wirbelzone. Dabei werden zuerst die Randbereiche des eingeblasenen Kohlenstaubstrahls aufgeheizt, da hier noch keine Vermischung mit dem Wind stattgefunden hat und die äußeren Kohlenstaubkörner die Inneren gegen Strahlung abschirmen. In Abhängigkeit von der erreichten Temperatur wird zunächst die Restoberflächenfeuchte des Kohlenstaubkorns verdampft. Anschließend setzt die Pyrolyse der aufgeheizten Kohlenstaubkörner ein, wobei die Pyrolysegase aufgrund der hohen Geschwindigkeit der Gas-Gas-Reaktionen mit dem Sauerstoff des Windes zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O verbrannt werden. Die hierdurch entstehenden Reaktionswärmen helfen weitere Aufheißvorgänge schneller ablaufen zu lassen. Der noch im Wind vorhandene Sauerstoff und Wasserdampf sowie die Verbrennungsprodukte CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O stellen Vergasungsmittel für den gebildeten Semikoks dar, der nun in Abhängigkeit von der Temperatur vergast wird. Als Reaktionsprodukte werden CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO und H<sub>2</sub> gebildet, wobei CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O in Abhängigkeit von der Temperatur nur geringfügig dissoziieren, im Wesentlichen aber nach der Boudouard- und heterogenen Wassergasreaktion zu CO und H<sub>2</sub> umgesetzt werden. Da der eingeblasene Kohlenstaub nicht ideal im Wind verteilt, sondern eher als „kompakter“ Strahl vorliegt, laufen alle

Vorgänge parallel ab, sobald die Zündung der ersten Pyrolysegase eingesetzt hat. Das Austreten der Pyrolysegase aus dem Kohlekorn überträgt einen Impuls auf das Kohlekorn, wodurch sich seine Bewegungsrichtung ändern kann und es insgesamt zu einer Vermischung des eingeblasenen Kohlenstaubs mit dem Hochofenwind kommt. Ein Teil des gebildeten Semikokes tritt jedoch in die Koksschüttung des Hochofens ein und wird erst hier umgesetzt. Dieser Anteil sollte jedoch möglichst klein sein.

Die Grenze für das Einblasen von Kohlenstaub ist der beginnende, unvollständige Umsatz des Kohlenstaubs im Unterofen. Dieser macht sich dadurch bemerkbar, dass Semikoks aus nicht umgesetztem Kohlenstaub im Gichtstaub auftritt und/oder sich sogenannte „Birdnet-Zonen“ bilden (das sind Feinkohleablagerungen in den Randzonen des toten Mannes). Wenn diese „Birdnet-Zonen“ infolge des hier geringeren Partialdrucks der Vergasungsmittel nicht schnell genug vergast werden können, kann sich daraus eine Störung der Durchgasungsfähigkeit der Schüttsäule im Hochofen ergeben. Ein zu hoher Druckverlust, der von den Windgebläsen nicht mehr kompensiert werden kann, und eine Ablenkung des Formgases in die Randzonen des Hochofens oberhalb der Blasformen sind die Folge. Gleichzeitig wird die Flüssigkeitsdrainage von abtropfendem Eisen und Schlacke gestört.

Ziel beim Einblasen von Kohlenstaub in die Wirbelzone des Hochofens ist, möglichst viel „teuren“ Koks durch den „preiswerteren“ Ersatzbrennstoff Kohle bei gleichbleibendem Gesamtenergieaufwand des Hochofens zu ersetzen. Einblasraten von 180 bis 200 kg/t<sub>RE</sub> bei einem Gesamtbrennstoffverbrauch unter 500 kg/t<sub>RE</sub> können heute als Stand der Technik angesehen werden.

Aufbauend auf diesen Betrachtungen hat Küttner GmbH, Essen, seine Kohlenstaubeinblastechnik mit dem Ziel entwickelt, eine bestmögliche Vergasung der eingeblasenen Kohlenstaubpartikel innerhalb der Blasform und der Wirbelzone des Hochofens zu gewährleisten. Diese Entwicklungsziele lassen sich wie folgt zusammenfassen:

	Kohlenstaub			Öl		Gas		Kunststoff	keine
	Dichtstrom	Flugstrom	nicht bekannt	nur Öl	Öl und Gas	nur Gas	Gas und Kohlenstaub		
Europa	60	5	9	15	4	61	3	2	47
Asien	25	26	227	4	-	1	-	-	220
Amerika	23	6	7	3	7	11	17	-	26
Afrika	2	-	-	-	1	4	-	-	2
Australien	2	-	-	-	-	1	-	-	-
<b>Gesamt</b>	<b>112</b>	<b>37</b>	<b>243</b>	<b>22</b>	<b>12</b>	<b>78</b>	<b>20</b>	<b>2</b>	<b>295</b>
		47,7 %			4,1 %		11,9 %	0,2 %	35,9 %

**1**  
Anzahl der Hochöfen, die mit einer Einblasanlage für Ersatzbrennstoffe ausgerüstet sind [1]  
Number of blast furnaces in the world equipped with different auxiliary fuel injection systems [1]

Die Verweilzeit der eingeblasenen Kohlenstaubpartikel in der Blasform und Wirbelzone sollte maximiert werden. Dazu wird die Geschwindigkeit des in die Blasform eingeblasenen Kohlenstaubs minimiert.

Der Stickstoffeintrag in den Hochofen sollte minimiert werden, da dieser nicht zur Vergasung des eingeblasenen Kohlenstaubs oder zur Eisenoxidreduktion beiträgt. Zu diesem Zweck wird die Transportgasbelastung beim Einblasen von Kohlenstaub maximiert.

Zur schnellen Kohlenstaubvergasung wird Sauerstoff und eine möglichst große Reaktionsfläche benötigt. Dazu ist die Sauerstoffkonzentration unmittelbar am Kohlenstaubpartikel durch eine gute Vermischung von Heißwind und eingeblasenem Kohlenstaub zu maximieren. Eine große Reaktionsfläche wird durch einen kleinen mittleren Durchmesser der eingeblasenen Kohlenstaubpartikel realisiert.

Der Beginn der Kohlenstaubvergasung in der Blasform lässt sich durch eine hohe Sauerstoffkonzentration unmittelbar am eingeblasenen Kohlenstaub beschleunigen. Zu diesem Zweck wird Sauerstoff mithilfe der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik, auf die weiter unten eingegangen wird, direkt zu den eingeblasenen Kohlenstaubpartikeln befördert.

Die Stabilität des Einblasprozesses ist sehr wichtig. Aus diesem Grund wird der Kohlenstaub ohne Pulsationen und gleichverteilt auf alle Blasformen in den Hochofen eingeblasen.

Dem Autor ist bewusst, dass es weitere wichtige Faktoren gibt, die hohe Einblasraten von Kohlenstaub bei gleichzeitig geringem Koksverbrauch des Hochofens beeinflussen. An dieser Stelle sei die Qualität der Einsatzstoffe im Hochofenprozess genannt. Ein hoher CSR-Wert (CSR: Coke Strength after Reaction) des Koks hat beispielsweise einen positiven Einfluss auf die maximal vom Hochofenprozess „akzeptierte“ Einblasrate und den Gesamtbrennstoffverbrauch. Da aber mit der eingesetzten Einblasteknik auf die Qualität der Einsatzstoffe im Hochofenprozess kein Einfluss genommen werden kann, wird auf dieses Thema in dem vorliegenden Beitrag nicht eingegangen. Vielmehr sei hierzu z. B. auf [3] verwiesen.

Die größte Motivation, Kohlenstaub in den Hochofen einzublasen, ist sicherlich der wirtschaftliche Aspekt. Der wesentliche Hebel zur Kostensenkung besteht in der Substitution von Koks durch Einblaskohle im Vergleich zum Nur-Koks-Betrieb des Hochofens. Grund hierfür ist der signifikante Preisunterschied zwischen Koks und Einblaskohle frei Hochofen. Bild 2 zeigt beispielhaft die Effizienzsteigerung des Reduktionsmitteleinsatzes für einen Hochofen mit einer Tagesproduktion von 10 000 t<sub>RE</sub>

	Nur-Koks-Betrieb vs. Einblasen von Kohlenstaub
Steigerung der Einblasrate	178,2 kg/tRE (= 623 700 t/a)
Koksparsnis	194,3 kg/tRE (= 680 050 t/a)
CO <sub>2</sub> -Emissionsminderung (hauptsächlich in der Kokerei)	385,88 kg/tRE (= 1 350 580 t/a)
Mehrverbrauch an Sauerstoff	46,3 m <sup>3</sup> (S.T.P.)/tRE (= 162,05 · 106 m <sup>3</sup> (S.T.P.)/a)
Energieeinsparung Hochofenwind	-32,8 MJ/tRE (= -114 800 GJ/a)
Mengenabnahme Hochofenwind	300 m <sup>3</sup> (S.T.P.)/tRE (= 1,05 · 109 m <sup>3</sup> (S.T.P.)/a)
Energiegewinn Gichtgas	88,1 MJ/tRE (= 308 350 GJ/a)
Kostensparnis	40,08844 €/tRE (= 140 309 540,00 €/a)

## 2

Effizienzsteigerung des Reduktionsmitteleinsatzes am Hochofen beim Einblasen von Kohlenstaub [4]

Efficiency enhancement of reductants use in the BF using pulverized coal injection [4]

▪ Entwicklung eines eigenen Dichtstromförderverfahrens von Kohlenstaub	1983/84
▪ Einzelleitungsregelung von Kohlenstaubeinblasanlagen	1984/85
▪ Einblasen von Grobkohle (80 % Massenanteil < 200 µm)	1987
▪ keramische Regelventile (halbindustrielle Anwendung)	1987/88
▪ Einführung einer Sammelleitung mit statischem Verteiler	1989
▪ Einsatz von zwei Einblasanlagen pro Blasform	1990
▪ Entwicklung der Oxycoal-Technik mit Koaxiallanzen	1990
▪ Einsatz von Oxycoal mit zwei Koaxiallanzen pro Blasform	1993
▪ Entwicklung des „ultra high density / ultra low velocity“-Einblasverfahrens	1996/97
▪ Vorheizen von Kohlenstaub	1999
▪ keramische Regelventile (industrielle Anwendung)	2000
▪ Einsatz einer Kohlenstaubeinblasanlage zur simultanen Versorgung von drei Hochofen	2002
▪ Optimierte Stickstoffregelung	2003
▪ gemeinsame Entwicklung einer Massenstrommessung mit der Firma SWR	2003/04
▪ gemeinsame Einführung eines Einblassystems mit Zwischenförderung und Verteilgefäß mit der Firma E.S.C.H.	2007
▪ kontinuierliche Dichtstromförderung über 850 m Förderlänge	2007
▪ Umbau einer Flugstromeinblasanlage in eine Dichtstromeinblasanlage	2009
▪ Entwicklung eines physikalischen Vorhersagemodells zur Steigerung der Einblasrate mithilfe der Oxycoal <sup>+</sup> -Technik	2010

## 3

Entwicklungsschritte der Küttner-Kohlenstaubeinblasteknologie

Development of Küttner's PCI technology

[4]. Hierbei wurde der Nur-Koks-Betrieb des Hochofens mit dem Hochofenbetrieb beim Einblasen von Kohlenstaub anhand einer Beispielrechnung verglichen. Dabei fällt auf, dass die Koksparsnis höher als die Steigerung der Einblasrate ausfällt. Die Gründe hierfür sind: Neben der Koksparsnis durch den eingeblasenen Kohlenstaub wird ein Mehr an fühlbarer Wärme durch die höhere Windtemperatur in den Ofen eingebracht, die die

Verbrennung des sog. Heizkokes zur Erzeugung von Prozesswärme teilweise ersetzt.

Für die Berechnung der Kostenersparnis wurden Kosten für Koks von 350 €/t, für Einblaskohle von 175 €/t, für Sauerstoff von 40 €/1 000 m<sup>3</sup>(S.T.P.), für Winderhitzung von 9 €/GJ und für Windverdichtung von 6 €/1 000 m<sup>3</sup>(S.T.P.) sowie einer Gichtgasgutschrift von 6 €/GJ aus [5] zugrunde gelegt. Für eingesparte CO<sub>2</sub>-Emissionen wird eine Gutschrift von 8 €/t angesetzt. Tagesaktuelle Gutschriften für CO<sub>2</sub>-Zertifikate sind aus [6] zu entnehmen.

Die Ergebnisse der Beispielrechnung in Bild 2 zeigen, dass sich durch die Installation einer Kohlenstaubeinblasanlage für einen Hochofen mit einer Tagesproduktion von 10 000 t<sub>RE</sub> eine deutliche Senkung der Kosten von 40,09 €/t<sub>RE</sub> erzielen lassen. Es sei an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich auf den beispielhaften Charakter der obigen wirtschaftlichen Betrachtung hingewiesen. Insbesondere erscheint die Preisdifferenz aus [5] zwischen Koks und Einblaskohle von 175 €/t recht hoch. Doch selbst bei Halbierung der Preisdifferenz von Koks und Einblaskohle auf 87,50 €/t errechnet sich noch eine stattliche Kostensenkung von 23,09 €/t<sub>RE</sub> bei Installation einer Kohlenstaubeinblasanlage.

### Entwicklung der Einblastechnik

Die vorangegangene Betrachtung der Wirtschaftlichkeit zeigt, dass die Entwicklung einer Einblastechnik von Kohlenstaub in den Hochofen immer noch profitabel ist. Die Firma Küttner hat vor 28 Jahren angefangen, auf den Kunden zugeschnittene Kohlemahl- und Einblasanlagen zu bauen. Bild 3 gibt einen Überblick über die wesentlichen Entwicklungsschritte der Kohlenstaubeinblastechnik am Beispiel der Firma Küttner.

Der vorliegende Beitrag beschränkt sich jedoch auf fünf wichtige Entwicklungsschritte. Diese Schritte umfassen die Minimierung des Transportgasbedarfs, die Entwicklung des Anlagendesigns, die Implementierung einer schnellen und genauen Regelung der Einblasrate, der Dichtstromtransport

über lange Förderdistanzen und die Oxycoal<sup>+</sup>-Technik.

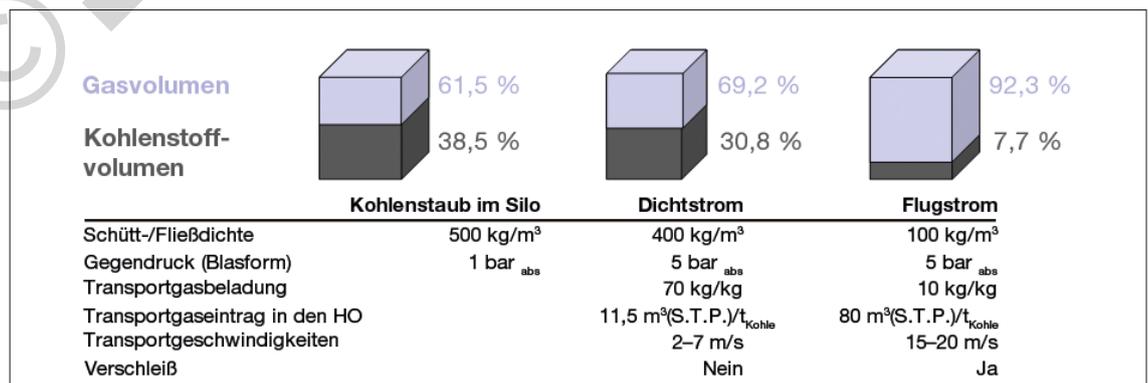
Küttners erste industrielle Kohlenstaubeinblasanlage wurde 1984/85 für Thyssens Hochofen 4 in Duisburg-Hamborn gebaut. Damals startete Küttner mit einem eigenen Dichtstromverfahren zum Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen, während andere Anlagenbauer ein Flugstromverfahren favorisierten. 1984 entschied sich Thyssen, den Hochofen 4 in Duisburg-Hamborn so auszustatten, dass die eine Hälfte aller Blasformen über eine Küttner-Dichtstrom-Einblasanlage und die andere Hälfte über eine Flugstrom-Einblasanlage mit Kohlenstaub versorgt wurden. Doch was ist der Unterschied zwischen Dichtstrom und Flugstrom? Bild 4 gibt eine Antwort auf diese Frage.

**Dichtstrom- und Flugstromverfahren.** Der wesentliche Unterschied zwischen dem Dichtstrom- und dem Flugstromverfahren ist die Menge an Transportgas, die zum Fördern und Einblasen des Kohlenstaubs benutzt wird. Als Transportgas wird aus Gründen des Explosionsschutzes in der Regel Stickstoff verwendet. Die Schüttdichte von Kohlenstaub in einem Silo beträgt ca. 500 kg/m<sup>3</sup>. Das bedeutet, dass nur 38,5 % des Silovolumens mit dem Feststoff Kohle und 61,5 % mit Gas, das sich zwischen den Kohlenstaubpartikeln befindet, gefüllt ist. Beim Dichtstromverfahren wird nun eine kleine Menge Transportgas in der Art hinzugefügt, dass sich eine sogenannte Fließdichte von 400 kg/m<sup>3</sup> ergibt. Das bedeutet, dass das Volumen im Förderrohr beim Dichtstromverfahren zu 30,8 % mit dem Feststoff Kohle und zu 69,2 % mit Transportgas gefüllt ist. Die Fließdichte beim Flugstromverfahren beträgt ca. 100 kg/m<sup>3</sup>. Das bedeutet, dass das Volumen im Förderrohr beim Flugstromverfahren zu 7,7 % mit dem Feststoff Kohle und zu 92,3 % mit Transportgas gefüllt ist. Wird ein Gegendruck des Hochofens von ca. 4 bar Überdruck zugrunde gelegt, können mit dem Dichtstromverfahren Transportgasbelastungen von ca. 70 kg<sub>Kohle</sub>/kg<sub>Transportgas</sub>

4

Vergleich von Dichtstrom- und Flugstromverfahren

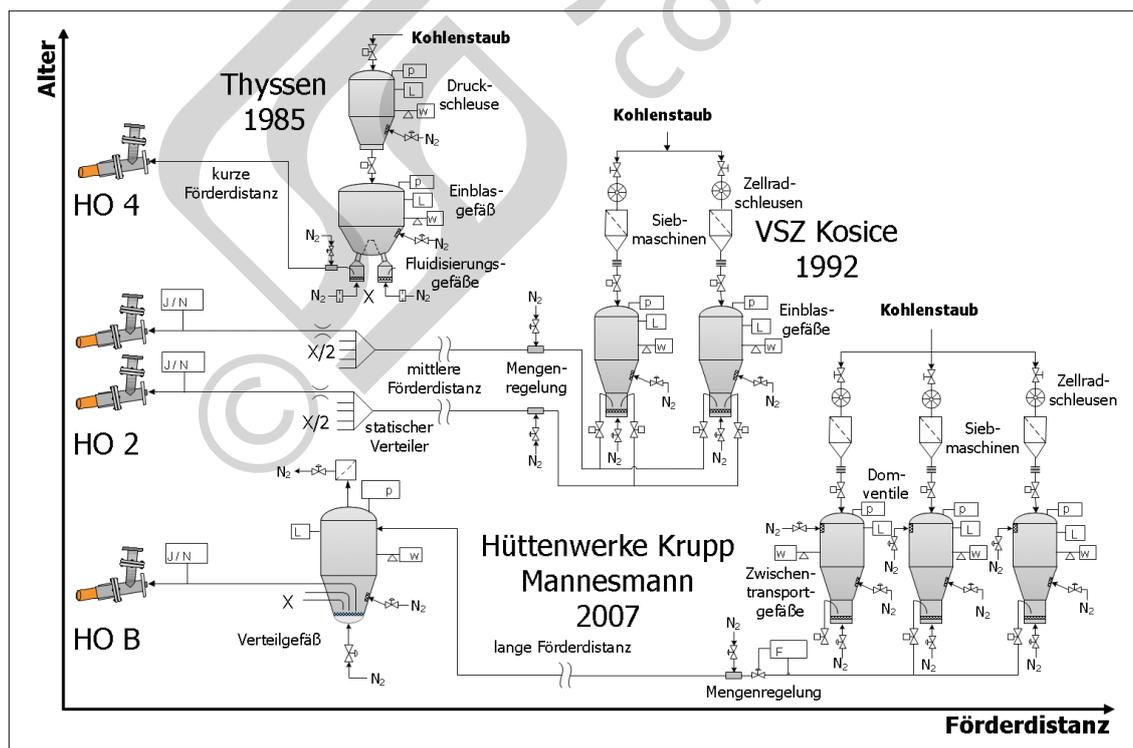
Comparison of dense phase and dilute phase conveying



erreicht werden, wohin gegen mit dem Flugstromverfahren lediglich Transportgasbelastungen von ca.  $10 \text{ kg}_{\text{Kohle}}/\text{kg}_{\text{Ttransportgas}}$  erreicht werden. Daraus folgt, dass der Stickstoffeintrag einer Einblasanlage in den Hochofen beim Dichtstromverfahren nur  $11,5 \text{ m}^3(\text{S.T.P.})/\text{t}_{\text{Kohlenstaub}}$ , beim Flugstromverfahren jedoch  $80 \text{ m}^3(\text{S.T.P.})/\text{t}_{\text{Kohlenstaub}}$  beträgt. Des Weiteren liegt die Transportgeschwindigkeit des Kohlenstaubs beim Dichtstromverfahren zwischen 2 und 7 m/s. Aufgrund dieser langsamen Geschwindigkeiten unterliegt die Transportleitung nahezu keinem Verschleiß. Beim Flugstromverfahren wird mit Transportgeschwindigkeiten des Kohlenstaubs zwischen 15 und 20 m/s gearbeitet. Bei diesen Geschwindigkeiten ist insbesondere in den Rohrbögen mit deutlichem Verschleiß der Förderleitung zu rechnen.

**Einblasanlage mit Schleuse.** Bild 5 zeigt die Entwicklung des Designs der Kohlenstaubeinblasanlagen und damit des Dichtstromverfahrens der Firma Küttner. Bei deren ersten industriellen Kohlenstaubeinblasanlage 1984/85 für Thyssens Hochofen 4 in Duisburg-Hamborn handelte es sich um eine sogenannte Doppelstock- oder Schleusenanlage, bei der eine Druckschleuse über einem Einblasgefäß angeordnet ist. Bei dieser Einblasanlagenkonfiguration ist jede Einblaslanze in der jeweiligen Blasform über eine eigene Einzelleitung mit einer diskreten Fluidisierungskammer verbunden. Diese diskreten

Fluidisierungskammern sind mit dem Einblasgefäß verbunden und unterhalb des Einblasgefäßes angeordnet. Das Einblasgefäß wird auf dem für das Einblasen der gewünschten Menge Kohlenstaub notwendigen Druck gehalten. Dieser Druck ist im Wesentlichen von der Einblasrate, dem Gegendruck des Hochofens, der Förderlänge und des Förderrohrdurchmessers abhängig. Die Einblasrate wird über den Druck im Einblasgefäß geregelt. Kleinere Änderungen der Einblasrate können auch mit der Zugabe von sogenanntem Bypassgas am Anfang der Förderleitung geregelt werden. Durch die Zugabe von Bypassgas wird der Druckverlust der Förderleitung in gewissen Grenzen beeinflusst. Als Bypassgas wird Stickstoff verwendet. Der Kohlenstaub wird aus dem Vorratssilo mithilfe der Schwerkraft in die dann drucklose Schleuse gefüllt. Ist die Schleuse voll, wird sie mithilfe von Stickstoff auf den notwendigen Einblasdruck bespannt. Danach wird der Kohlenstaub aus der Schleuse ebenfalls mithilfe der Schwerkraft in das Einblasgefäß befördert. Die Druckschleuse wird entspannt und kann erneut mit Kohlenstaub aus dem Vorratssilo gefüllt werden. Die Doppelstockanlage arbeitet sehr zuverlässig, sie hat aber zwei Schwachstellen. Erstens, die Förderentfernung ist limitiert, da die Einzelleitungen aufgrund des geringen Durchmessers im Dichtstrom einen hohen Druckverlust produzieren. Daher muss die Einblasanlage möglichst nah am Hochofen platziert werden. Dies ist aufgrund der baulichen



5 Entwicklung des Designs der Küttner-Kohlenstaubeinblasanlagen  
Development of Küttner's PCI-plant design

Gegebenheiten nicht immer möglich. Zweitens, die Druckschleusung von Kohlenstaub kann bei schlechter Fluidisierung zu Problemen in der Art führen, dass der Kohlenstaub beim Einfüllen in das Einblasgefäß in der Druckschleuse bleibt und nicht in das Einblasgefäß fällt. Darüber hinaus verursacht das Schleusen von Kohlenstaub innerhalb des Einblasgefäßes leichte Druckschwankungen und damit leichte Schwankungen der Einblasrate.

**Einblasanlage mit Sammelleitung.** Diese Schwachstellen führten zu der Entwicklung der Einblasanlagenkonfiguration mit Sammelleitung und statischem Verteiler. Als Beispiel dieser Einblasanlagenkonfiguration sei an dieser Stelle die Einblasanlage genannt, die Küttner 1992 für VSZ Kosice in Kosice, Slowakei, gebaut hat, Bild 5. Diese Anlagenkonfiguration arbeitet ohne Druckschleuse, benötigt aber für kontinuierliches Einblasen mindestens zwei Einblasgefäße. Der Kohlenstaub wird aus dem Feinkohlesilo über ein Sieb in eines der beiden Einblasgefäße gefüllt, während das andere Einblasgefäß in Betrieb ist. Danach wird das frisch gefüllte Einblasgefäß auf den notwendigen Einblasdruck bespannt. Ab jetzt kann das frisch gefüllte und bespannte Einblasgefäß den Einblasbetrieb von dem im Betrieb befindlichen Einblasgefäß übernehmen. Nach Übernahme des Einblasbetriebs wird das fast leere und außer Betrieb genommene Einblasgefäß entspannt. Danach wird dieses Einblasgefäß über das Sieb wieder neu mit Kohlenstaub gefüllt und so weiter. Mit den über den Einblasgefäßen

angeordneten Siebmaschinen werden zwei Ziele verfolgt. Zum Einen soll das Überkorn vor dem Einblasen abgeschieden werden, um mögliche Verstopfungen der Förder- und Einblasleitungen zu verhindern. Zum Anderen soll der Kohlenstaub aus dem Feinkohlesilo vor Befüllung des Einblasgefäßes aufgelockert und fluidisiert werden. Eine gute Fluidisierung ist eine notwendige Voraussetzung für einen ruhigen und pulsationsfreien Einblasbetrieb im Dichtstrom. Von jedem Einblasgefäß führen zwei Sammelleitungen zu zwei statischen Verteilern, die auf der Blasformebene am Hochofen angeordnet sind. Ein statischer Verteiler ist mit den geraden Blasformnummern und der andere statische Verteiler mit den ungeraden Blasformnummern über individuelle Einzelleitungen und Einblaslanzen verbunden. Diese Anlagenkonfiguration wird oft für mittlere Förderdistanzen bis ca. 500 m eingesetzt. Die Regelung der Einblasrate wurde anhand einer Druckregelung an den Einblasgefäßen realisiert. Kleinere Änderungen der Einblasrate können auch hier zusätzlich über die Zugabe von sogenanntem Bypassgas am Anfang der Sammelleitungen geregelt werden.

**Einblasanlage mit Verteilgefäß.** Kundenseitige Anforderungen eines minimalen Stickstoffeintrags in den Hochofen bei gleichzeitig langer Förderdistanz führte zu der Entwicklung der Einblasanlagenkonfiguration mit Verteilgefäß. Beispielhaft seien die Einblasanlagen genannt, die Küttner im Jahre 2007 bei den Hüttenwerken Krupp Mannesmann in Duisburg realisiert hat. Hierbei wird der Kohlenstaub aus den Kohlemahl- und Trocknungsanlagen in Zwischentransportanlagen gefüllt. Dieser Zwischentransport fördert den Kohlenstaub für den Hochofen B über 850 m und für den Hochofen A über 450 m im Dichtstrom in jeweils ein Verteilgefäß, das sich in unmittelbarer Nähe zum betreffenden Hochofen befindet. Die Fördermengenregelung ist mit einem Regelsystem, bestehend aus Massstrommessgerät und einem keramischen Regelventil, ausgeführt. Dieses Regelsystem wird weiter unten detailliert beschrieben. Das Verteilgefäß ist über diskrete Einzelleitungen und Einblaslanzen mit jeder Blasform des Hochofens verbunden.

Das Verteilgefäß bietet drei wesentliche Vorteile. Erstens, der Druckverlust und damit auch der Transportgasbedarf der Förderung in den diskreten Einzelleitungen zwischen Verteilgefäß und Blasformen sind aufgrund der geringen Förderentfernung entsprechend niedrig. Daraus folgt, dass der größte Teil des Transportgases des langen Zwischentransportes zwischen der Kohlemahl- und Trocknungsanlage und dem Verteilgefäß vom Verteilgefäß abgeschieden werden kann und somit nicht in den Hochofen



6 Rohkohleentladung, Kohlemahl- und Einblasanlage bei den Hüttenwerken Krupp Mannesmann in Duisburg  
Raw coal unloading, GAD, PCI with distribution vessel at Hüttenwerke Krupp Mannesmann, Duisburg, Germany

gelangt. Insgesamt kann so eine maximale Transportgasbelastung bzw. ein minimaler Stickstoffeintrag in den Hochofen realisiert werden. Zweitens wird der Kohlenstaub im Verteilgefäß neu fluidisiert. Damit wird ein stabiles, pulsationsfreies und gleichverteiltes Einblasen von Kohlenstaub in alle Blasformen des Hochofens sichergestellt. Drittens ermöglicht das Verteilgefäß eine hohe Flexibilität, da es auch mit nur einer Einzelleitung betrieben werden kann.

Drei Punkte sind bei allen beschriebenen Anlagenkonfigurationen von besonderer Wichtigkeit: Fluidisierung, Fluidisierung und nochmal Fluidisierung. Die Bereitstellung der richtigen Menge an Fluidisierungsgas an der richtigen Stelle zur richtigen Zeit ermöglicht ein ruhiges, sehr dichtes und stabiles Fördern und Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen.

**Regelung der Einblasrate.** Die Regelung der Einblasmenge wurde ursprünglich über eine Druckregelung im Einblasgefäß realisiert. Der benötigte Druck im Einblasgefäß setzt sich aus dem Gegendruck des Hochofens und dem Druckverlust der gesamten Förderleitung zusammen. Der Druckverlust der Förderleitung wiederum ist abhängig von der Kohlenstaubfördermenge, der Menge an Transportgas, der Förderlänge und dem Durchmesser der Förderrohrleitung. Insgesamt ist also die Förder- bzw. Einblasmenge im Wesentlichen abhängig vom Druck im Einblasgefäß. Kleinere Änderungen der Fördermenge lassen sich auch durch die eingesetzte Menge an Transportgas regeln, da die Menge an Transportgas den Druckverlust der Förderleitung in gewissen Grenzen beeinflusst. Die Druckregelung ist jedoch insbesondere für größere Einblasgefäße träge, da der Volumenstrom zur Beanspruchung nicht beliebig gesteigert werden kann, ohne die Stabilität des Förderns und Einblasens aus diesem Einblasgefäß zu gefährden. Aus diesem Grund wurde ein schnelleres System zur Regelung der Einblasrate entwickelt. Dieses System besteht aus einem keramischen Regelventil und einer kapazitiven Dichtstromdurchflussmessung. Es wird auf einen vorgegebenen Sollwert geregelt, wobei der Istwert von der Dichtstromdurchflussmessung gemessen wird. Das ganze System wird am Anfang der Sammelleitung kurz hinter den Einblasgefäßen positioniert.

Der Clou beim Regelventil ist die spezielle Kontur der Bohrung in der keramischen Regelkugel, die für jede Einblasanlage individuell ausgelegt wird. Mögliche Änderungen der physikalischen Eigenschaften der Kohle, die von der kapazitiven Dichtstromdurchflussmessung nicht erfasst werden kann, werden mittels eines durch Wägung

ermittelten Korrekturfaktors korrigiert. Um nun eine schnelle Regelung der Einblasrate zu gewährleisten, wird der Druck im Einblasgefäß ca. 2 bar höher eingestellt, als resultierend aus Gegendruck des Hochofens und mengenabhängigem Druckverlust der Förderleitungen notwendig wäre. Gleichzeitig wird das Regelventil so gefahren, dass es einen Druckverlust von den besagten 2 bar erzeugt. Durch Stellungsänderungen des Regelventils wird der Differenzdruck über das Regelventil und damit der Druckverlust der gesamten Förderung beeinflusst. Der Druckverlust der gesamten Förderung bei konstantem Druck im Einblasgefäß bestimmt wiederum die Förder- bzw. Einblasrate. Die Schnelligkeit dieser Regelung begründet sich dadurch, dass es nicht nötig ist, den Druck im Einblasgefäß entsprechend der gewünschten Fördermenge anzupassen. Diese Druckanpassung wäre insbesondere bei großen und auch nahezu leeren Einblasgefäßen im Vergleich zur Anpassung des Differenzdrucks über das Regelventil recht langsam und träge.

**Dichtstrom über lange Förderdistanzen.** Lange Förderdistanz zwischen Einblasanlage und Hochofen ist häufig eine kundenseitige Anforderung an den Anlagenbauer. Aufgrund baulicher Gegebenheiten in der Nähe des Hochofens ist oft kein Platz für eine Kohlemahl- und Einblasanlage vorhanden. Beispielhaft seien die oben schon angesprochenen Kohlemahl- und Einblasanlagen bei den Hüttenwerken Krupp Mannesmann in Duisburg angeführt. Die beiden Fotos in Bild 6 zeigen die baulichen Gegebenheiten dieses Projektes. Die Kohlemahl- und Zwischentransportanlagen befinden sich direkt neben der Hafeneinfahrt. Die Rohkohle-Entladeeinrichtung inklusive der großen Rohkohlebunker wurde auf der anderen Seite der Hafeneinfahrt realisiert. Die Rohkohle wird von dort über eine Brücke zu den Kohlemahlanlagen (eine für jeden Hochofen) mittels Förderbändern transportiert. Hier wird die Rohkohle gemahlen und anschließend pneumatisch über eine Zwischentransportanlage zu jeweils einem Verteilgefäß an jedem Hochofen gefördert. Die Förderdistanz zum Verteilgefäß von Hochofen B beträgt 850 m und zum Verteilgefäß von Hochofen A 450 m. Der Zwischentransport wird im Dichtstromverfahren betrieben. Vom jeweiligen Verteilgefäß wird der Kohlenstaub über diskrete Einzelleitungen zu jeder Blasform der Hochofen gefördert und dort in den Hochofen eingeblasen.

In Bild 7 sind die Reduktionsmittelverbräuche vor und nach der Inbetriebnahme der Einblasanlagen bei den Hüttenwerken Krupp Mannesmann in Duisburg dargestellt [7]. Die Diagramme in Bild 7 zeigen, dass bereits kurz nach der Inbetriebnahme

hohe Einblasraten von durchschnittlich 165 kg/t<sub>RE</sub> für den Hochofen A und 170 kg/t<sub>RE</sub> für den Hochofen B erreicht werden konnten. Der Gesamtbrennstoffverbrauch lag für Hochofen A bei knapp über 500 kg/t<sub>RE</sub> bei einer Heißwindtemperatur zwischen 1 125 und 1 200 °C und für Hochofen B bei knapp unter 500 kg/t<sub>RE</sub> bei einer Heißwindtemperatur zwischen 1 200 und 1 275 °C. Vor der Nutzung von Kohlenstaub haben die Hüttenwerke Krupp Mannesmann Öl und Gas als Ersatzbrennstoff zur Optimierung des Koksverbrauchs genutzt. Insgesamt konnte der Koksverbrauch durch den Einsatz der Kohlenstaubeinblasanlagen weiter reduziert werden.

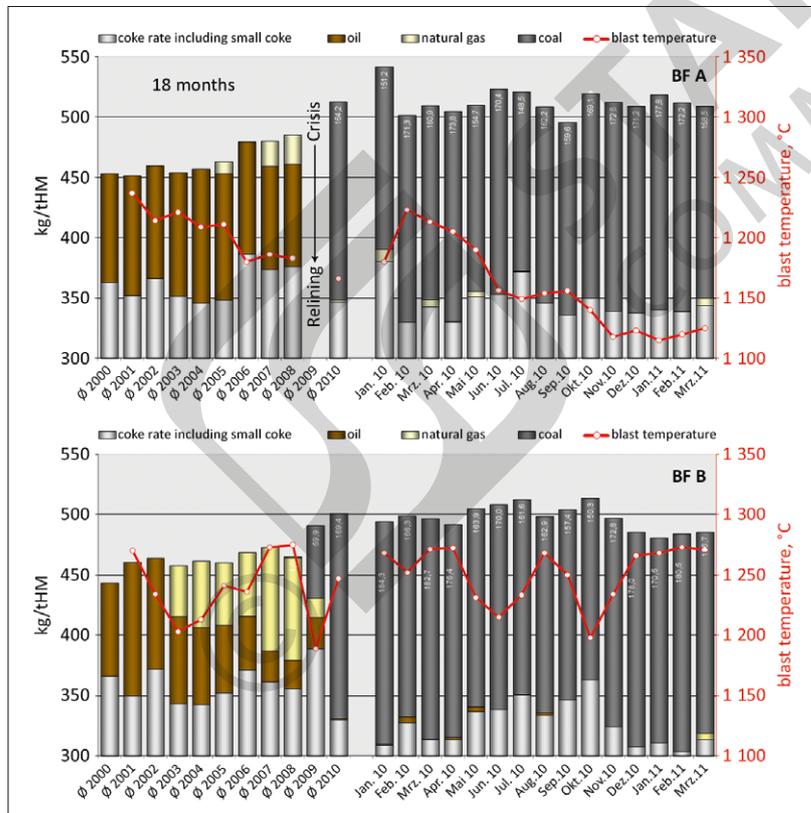
### Oxycoal<sup>+</sup>-Technik

Eine Weiterentwicklung der Kohlenstaubeinblas-technologie stellt die Oxycoal<sup>+</sup>-Technik dar. Bild 8 zeigt beispielhaft eine Einblasanlage, die mit dieser Technik ausgerüstet ist. Hierbei wird ein Teil des zur Anreicherung des Hochofenwindes notwendigen Sauerstoffs über sogenannte Koaxiallanzen direkt zusammen mit dem Kohlenstaub in die Blasformen und die Wirbelzone des Hochofens eingeblasen. Bei einer Koaxiallanze, die im Wesentlichen

aus zwei ineinander gesteckten geraden Rohren besteht, wird der Kohlenstaub mithilfe von Stickstoff als Trägergas durch das innere Rohr gefördert. Im koaxialen Spalt zwischen Innen- und Außenrohr wird der Sauerstoff gefördert. Wichtig ist, dass der Sauerstoff erst unmittelbar nach Verlassen der Koaxiallanze in der Blasform im Heißwindstrom mit dem im Innenrohr geförderten Kohlenstaub in Berührung kommt, Bild 8.

Die Idee hinter der Ummantelung des eingeblasenen Kohlenstaubstrahles mit Sauerstoff ist es, den Sauerstoffpartialdruck in unmittelbarer Nähe der Kohlenstaubkörner im für die Zündung wichtigen Randbereich des Kohlenstaubstrahls zu maximieren. Hierbei ist zu bedenken, dass unmittelbar nach Austritt des „kalten“ Sauerstoffs aus der Koaxiallanze sich keine spontane Vermischung des heißen Hochofenwindes mit dem kalten Sauerstoff einstellt, da sich die von der Temperatur abhängenden Viskositäten (Hochofenwind:  $5,36 \cdot 10^{-5}$  Pas, Sauerstoff:  $2,66 \cdot 10^{-5}$  Pas) signifikant unterscheiden. Auf diese Weise wird der Kohlenstaubstrahl quasi mit einem Sauerstoffmantel umhüllt. Als Folge ergibt sich eine beschleunigte Umsatzgeschwindigkeit des eingeblasenen Kohlenstaubes. Darüber hinaus bewirkt die „Ummantelung“ der Kohlenstaubkörner mit Sauerstoff eine Absenkung der Zündtemperatur der Einblaskohlen, also eine Verbesserung der lokalen Zündbedingungen, wodurch der Startzeitpunkt der Kohlenstaubumsetzung verkürzt wird [8]. Die Umsetzung des eingeblasenen Kohlenstaubes beginnt nach der Zündung bereits innerhalb der Blasform. Damit einhergehend wird eine Temperatursteigerung in den Blasformen erwartet.

Dieser Temperaturanstieg lässt sich in der Realität beobachten. In Bild 9 sind vier Fotos abgebildet, die durch das Schauglas der Blasform Nr. 8 des Hochofens 5 der Dillinger Hütte gemacht worden sind, die Küttner mit der Dichtstrom- und Oxycoal<sup>+</sup>-Technik ausgerüstet hat. Dabei ist das Schauglas so angeordnet, dass sich quasi mit dem Hochofenwind durch die Blasform in die Wirbelzone des Hochofens blicken lässt. Die Fotos auf der linken Seite zeigen den in die Blasform eingeblasenen Kohlenstaub bei einer Einblasrate von 800 kg/h (links oben) und bei einer Einblasrate von 2 000 kg/h (links unten). Auf beiden Fotos ist gut eine schwarze Kohlenstaubwolke zu erkennen, die noch nicht in der Blasform gezündet hat. Auf der rechten Seite sind zwei Fotos abgebildet, die die gleiche Blasform bei gleicher Einblasrate zeigen und bei denen zusätzlich 280 m<sup>3</sup>(S.T.P.)/h Sauerstoff mithilfe der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik eingeblasen wird. Direkt an der Lanzenspitze ist die Verbrennung der aus der Einblaskohle ausgetretenen Flüchtigen nach Eintritt in den Heißwindstrom deutlich zu erkennen. Das be-



7 Reduktionsmittelverbräuche vor und nach der Inbetriebnahme der Kohlenstaubeinblasanlage bei den Hüttenwerken Krupp Mannesmann in Duisburg [7]  
 Reductants consumption & development at Hüttenwerke Krupp Mannesmann, Duisburg, Germany [7]

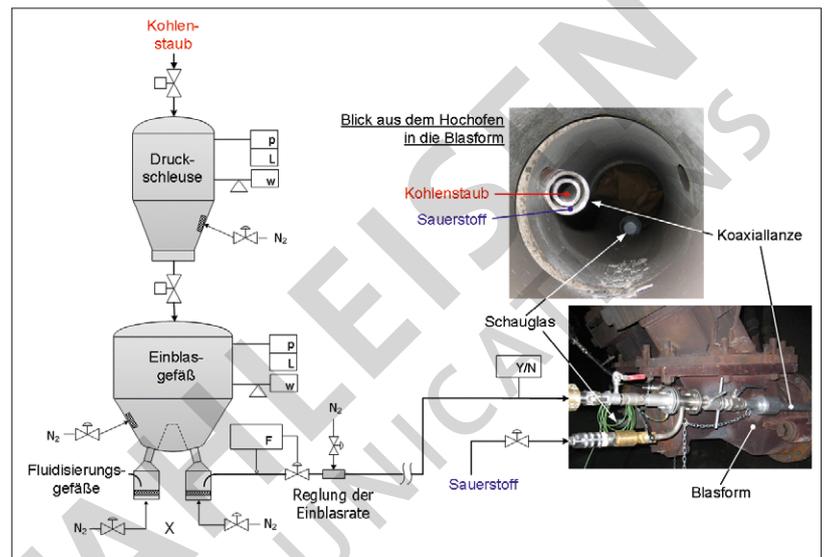
deutet, dass der eingeblasene Kohlenstaub bereits in der Blasform zündet und die Kohlenstoffumsetzung einsetzt. Aus Kundenmessungen und eigenen Berechnungen geht hervor, dass bei Anwendung der neuen Verfahrensweise in der Blasform Temperaturen größer 2400 °C auftreten können. Im Dichtstrombetrieb und bei Sauerstoffanreicherung des Windes zündet der eingeblasene Kohlenstaub in der Blasform nicht, sondern verbrennt/vergast erst in der Wirbelzone. Wie in Bild 9 in den linken Fotos gezeigt, wird die Zündtemperatur des Kohlestrahles auch in Randbereichen auf dem ca. 300 mm langen Weg innerhalb der Blasform von der Lanzenspitze bis in die Wirbelzone nicht erreicht.

Insgesamt wird bei der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik weniger Zeit zur Kohlenstoffumsetzung benötigt. Somit kann eine weitere Steigerung der Einblasrate mit einhergehender Substitution von Koks durch den zusätzlich eingeblasenen Kohlenstaub erreicht werden. Die Schwierigkeit liegt nun in der Quantifizierung der durch den Einsatz der neuen Technik möglichen Steigerung der Einblasrate mit einhergehender Senkung des Koksverbrauchs bzw. der Quantifizierung des wirtschaftlichen Vorteils. Zu diesem Zweck wurde ein eigenes physikalisches Modell entwickelt, das die komplexen Vorgänge und Prozesse beim Einblasen von mit Sauerstoff ummantelten Kohlenstaub in die Blasform und Wirbelzone des Hochofens beschreibt.

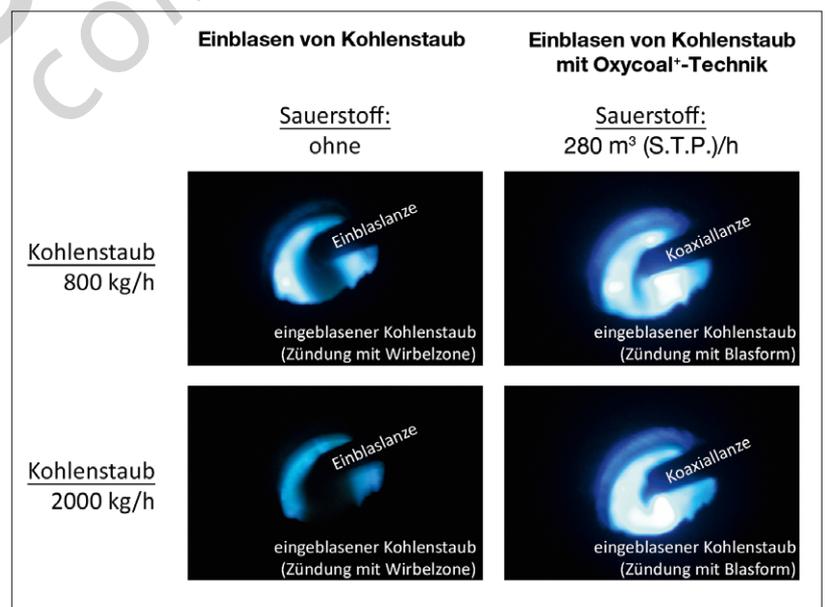
Die Herausforderung bei diesem physikalischen Modell liegt in der simultanen Lösung der dreidimensionalen Zweiphasenströmung, die von den Kohlenstaubvergasungsreaktionen und der Wärmetönung aus Strahlung und Konvektion überlagert wird. Die Geschwindigkeit der Kohlenstaubvergasung ist hierbei abhängig von der Temperatur. Sie wird entweder durch die Kinetik der Vergasungsreaktionen, die Porendiffusion oder die Grenzschichtdiffusion bestimmt. Zur Lösung des sich ergebenden komplexen Gleichungssystems wird an dieser Stelle auf Näherungslösungen im Rahmen der numerischen Strömungssimulation zurückgegriffen. Hierzu wurde die Firma Aixprocess, Aachen, beauftragt, ein dem physikalischen Modell entsprechendes Computational Fluid Dynamic (CFD)-Simulationsmodell zu entwickeln. Auf eine genaue Beschreibung des gesamten Modells wird im Rahmen dieses Beitrags nicht eingegangen, da sie Gegenstand einer in Vorbereitung befindlichen Veröffentlichung ist.

An dieser Stelle seien jedoch die Ergebnisse von zwei Simulationsläufen gezeigt. Bild 10 vergleicht die Zündung des eingeblasenen Kohlenstaubs zum Einen ohne die Oxycoal<sup>+</sup>-Technik und zum Anderen mit der neuen Verfahrensweise bei sonst gleichen Randbedingungen. Wichtig hierbei ist, dass die

gesamte in den Hochofen eingebrachte Sauerstoffmenge in beiden Fällen gleich ist, d. h. bei Einsatz der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik wurde der Sauerstoff, der über die Koaxiallanzen in den Hochofen geblasen wird, aus der Sauerstoffanreicherung des Heißwindes entnommen. Die in Bild 10 dargestellten „gelben Wolken“ sind die simulierten, sichtbaren und den Kohlenstaubstrahl umgebenden Flam-



8 Mit der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik ausgerüstete Kohlenstaubeinblasanlage  
PCI-plant equipped with the Oxycoal<sup>+</sup> technology



9 Einfluss der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik auf die Kohlenstaubumsetzung in der Blasform und Wirbelzone des Hochofens  
Influence of Oxycoal<sup>+</sup> technology on coal gasification within the tuyère and the raceway of the blast furnace

men. Diese Ergebnisse zeigen, dass bei Einsatz der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik die Zündung des eingeblasenen Kohlenstaubs bereits in der Blasform stattfindet, wohingegen die Zündung des eingeblasenen Kohlenstaubs ohne die Oxycoal<sup>+</sup>-Technik erst in der Wirbelzone beginnt. Diese auf unserem physikalischen Modell basierenden berechneten Ergebnisse passen exakt zu den realen Beobachtungen am Hochofen, Bild 9.

In Bild 11 sind weitere Ergebnisse der beiden Simulationsläufe bzgl. der Temperaturverteilung und der axialen Geschwindigkeiten in der Blasform und Wirbelzone dargestellt. Hierbei wurden die numerischen Simulationsergebnisse auf einer zweidimensionalen Fläche dargestellt, die den Reaktionsraum in der Mitte teilt. Die Ergebnisse der Temperaturverteilung zeigen korrespondierend zu den Ergebnissen in Bild 10, dass es beim Einsatz der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik bereits zu einer Temperaturerhöhung innerhalb der Blasform kommt, während ohne den Einsatz der neuen Verfahrensweise die Temperaturerhöhung erst in der Wirbelzone stattfindet. Daraus folgt, dass die Zündung des eingeblasenen Kohlenstaubs beim Einsatz der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik früher einsetzt und dadurch die Vergasung des Kohlenstaubs beschleunigt wird.

Sehr interessant sind die Simulationsergebnisse der axialen Geschwindigkeitsverteilung, rechte Seite von Bild 11. Wird Kohlenstaub ohne den Einsatz der neuen Technik eingeblasen, zeigt die axiale Geschwindigkeitsverteilung eine gerichtete Gasbewegung von links nach rechts durch die Blasform in und durch den unteren Teil der Wirbelzone. Erst in der oberen Ausbuchtung

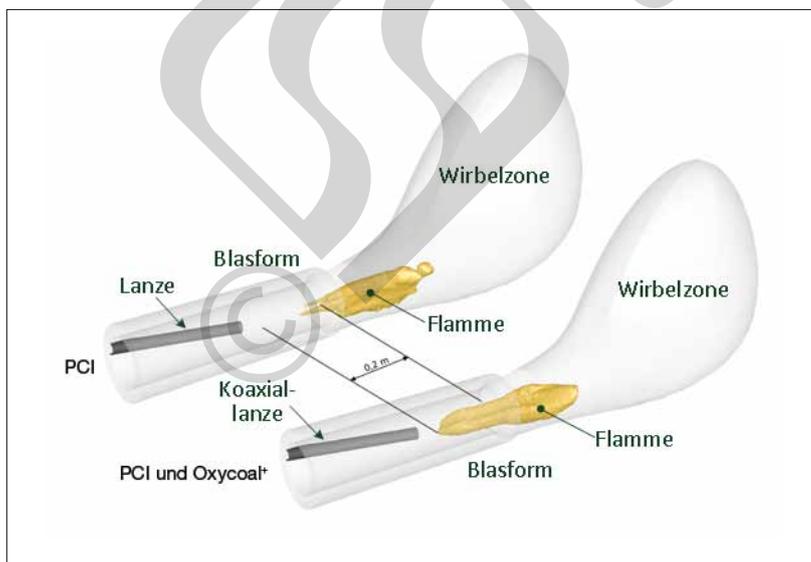
der Wirbelzone ist eine Rückströmung der Gase zurück in Richtung Blasform zu sehen. Bei den Simulationsergebnissen unter Berücksichtigung der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik fällt auf, dass sich direkt vor der Blasform im unteren Teil der Wirbelzone ein zusätzliches Rückströmgebiet gebildet hat, in dem Gas aus dem unteren Teil der Wirbelzone in Richtung Blasform zurückströmt. Die Ursache für dieses Rückströmgebiet liegt in der frühen Zündung der aus dem eingeblasenen Kohlenstaub austretenden Flüchtigen an der Grenzfläche zwischen eingeblasenem Kohlenstaubstrahl und Sauerstoffumantelung innerhalb der Blasform. Mit der durch die Umsetzung der Flüchtigen freigesetzten Wärme geht eine axiale Geschwindigkeitserhöhung des den einblasenden Kohlenstaubstrahls umgebende Gashülle einher. Der „kalte“ Kern des eingeblasenen Kohlenstaubstrahls wird jedoch nicht zusätzlich beschleunigt. Zur Gewährleistung der Kontinuitätsgleichung ergibt sich daher das auf dem Simulationsergebnis zu sehende Rückströmgebiet. Bezogen auf den Umsatz des eingeblasenen Kohlenstaubs ist dieses Rückströmgebiet sehr erwünscht, da sich der Hochofenwind mit dem eingeblasenen Kohlenstaub mischt und die durchschnittliche Verweilzeit der eingeblasenen Kohlenstaubpartikel innerhalb der Blasform und Wirbelzone leicht verlängert.

Insgesamt zeigen die Simulationsergebnisse, dass sich die Vergasung des eingeblasenen Kohlenstaubs durch den Einsatz der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik um ca. 10 % beschleunigen lässt. Daraus folgt, dass sich mit dieser Technik die Kohlenstaubeinblasrate ebenfalls um ca. 10 % steigern lässt bei gleichzeitiger Reduktion der Koksrate gemäß dem Austauschfaktor Koks/Kohle.

Die Wirtschaftlichkeit und die Effizienzsteigerung des Reduktionsmitteleinsatzes der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik, verglichen mit dem Einblasen von Kohlenstaub ohne diese Technik, ist in Bild 12 zusammengefasst [4]. Hierfür wurden zur Berechnung der Kostenersparnis die gleichen Preise wie für Bild 2 sowie ein Hochofen mit einer Tagesproduktion von 10 000 t<sub>RE</sub> zugrunde gelegt. Die Ergebnisse der Beispielrechnung in Bild 12 zeigen, dass sich durch die Ausrüstung einer bestehenden Kohlenstaubeinblasanlage mit der neuen Technik die Effizienz des Reduktionsmitteleinsatzes weiter steigern lässt. Es ergibt sich für diesen Fall eine weitere Kostenersparnis von 3,01 €/t<sub>RE</sub>.

### Zukünftige Trends beim Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen

In den letzten 28 Jahren hat Küttner die eigene Einblasttechnologie von Kohlenstaub in den Hochofen kontinuierlich weiterentwickelt. Während die-



10

Zündung des eingeblasenen Kohlenstaubs mit und ohne Oxycoal<sup>+</sup>-Technik  
Ignition of PC with and without using the Oxycoal<sup>+</sup> technology

ser Zeit hat das Unternehmen weltweit 77 Kohlenstaubeinblasanlagen gebaut. Dies zeigt, dass diese Einblastechnologie wirtschaftlich und wettbewerbsfähig ist. Küttner ist davon überzeugt, dass eine wesentliche Voraussetzung dafür die kontinuierliche Weiterentwicklung der eigenen Technik ist.

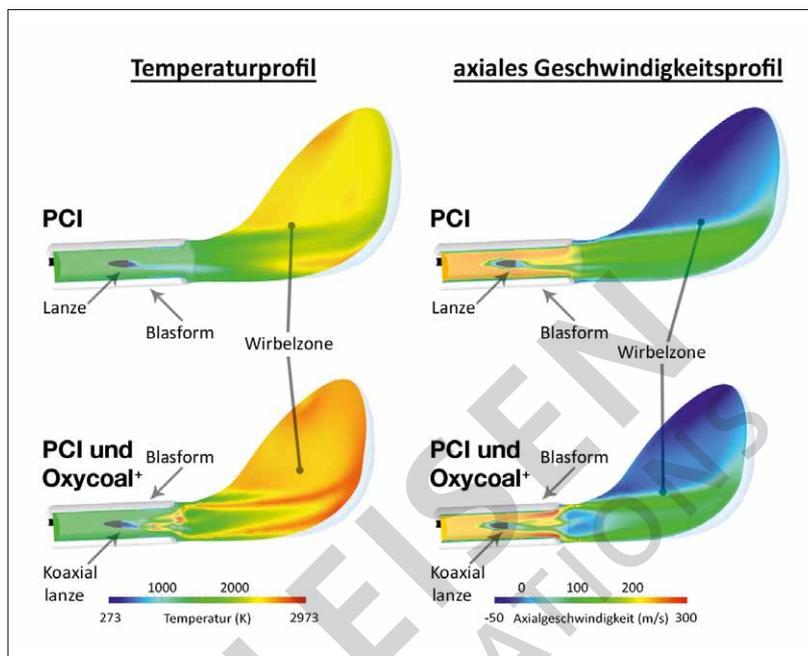
Für die Zukunft erwartet Küttner, dass folgende Themen eine größere Rolle im Bereich des Einblasens von Kohlenstaub in den Hochofen spielen werden:

- Nachrüstung auf den Stand der Technik von ineffizienten Kohlenstaubeinblssystemen
- Oxycoal<sup>+</sup>-Technik
- Vorwärmen von Kohlenstaub vor dem Einblasen in den Hochofen
- Optimierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz
- kombiniertes Einblasen von Kohlenstaub und gasförmigen Ersatzbrennstoffen.

Aus Bild 11 geht hervor, dass 47,7 % aller Hochofen weltweit mit einer Kohlenstaubeinblasanlage ausgerüstet sind. Einige dieser Anlagen sind nicht mehr auf dem Stand der Technik. Darüber hinaus sind die maximalen Einblasraten von manchen bestehenden Kohlenstaubeinblasanlagen aufgrund von Hochofenkapazitätserweiterungen nicht mehr groß genug. Dies hat zur Folge, dass die Nachfrage von Nachrüstungen von ineffizienten Einblssystemen auf den Stand der Technik wachsen wird. Beispielsweise hat Küttner die bestehenden nach dem Flugstromverfahren arbeitenden Kohlenstaubeinblasanlage der Hochofen 1, 3 und 4 bei China Steel Corporation, Taiwan, mit dem Küttner-Dichtstromverfahren nachgerüstet [9]. Diese Nachrüstung war erfolgreich, da dadurch die Einblasrate bei gleichzeitiger Koksersparnis signifikant gesteigert werden konnte.

Man geht daher davon aus, dass die Preise für Rohstoffe und hier insbesondere für die Energieträger zukünftig weiter steigen werden. Dies wird für die Hochofenbetreiber den Druck erhöhen, die Wirtschaftlichkeit des Hochofenbetriebs weiter zu optimieren. Aus diesem Grund wird Küttner sich weiter auf die eigene Oxycoal<sup>+</sup>-Technik fokussieren, da sich durch den Einsatz dieser Technologie die Kohlenstaubeinblasrate bis zu 10 % bei gleichzeitiger Reduktion der Koksrate gemäß Austauschfaktor Koks/Kohle steigern lässt. Insgesamt ergibt sich daraus für den Hochofenbetreiber die in Bild 12 exemplarisch dargestellte Kostenersparnis. Ein weiterer Vorteil der neuen Verfahrensweise ergibt sich daraus, dass bei sich verschlechternder Qualität der Rohstoffe trotzdem eine hohe Einblasrate aufrechterhalten werden kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Einblasrate bei gleichzeitiger Reduktion des Koksatzes besteht in der Vorwärmung des Kohlenstaubs vor dem Einblasen in den Hochofen. Dadurch



11

Ergebnisse der numerischen Simulationsrechnungen: Temperaturprofil und axiales Geschwindigkeitsprofil

CFD simulation results: temperature profile and profile of axial velocities

wird die notwendige Aufheizzeit der Kohlenstaubpartikel in der Blasform des Hochofens weiter verkürzt. Darüber hinaus wird der einzublasende Kohlenstaub beim Vorwärmen teilweise entgast, wobei diese Gase und hier insbesondere der Wasserdampf noch vor dem Einblasen in die Blasform und die Wirbelzone des Hochofens abgeschieden werden können. Insgesamt lässt sich die Kohlenstaubvergasung in der Blasform und in der Wirbelzone des Hochofens durch das Vorwärmen der Einblaskohle weiter beschleunigen. Küttner hat eine Anlage zum Vorwärmen von Einblaskohle für den Hochofen 1 von ThyssenKrupp Steel Europe AG, Duisburg, gebaut, die nunmehr seit elf Jahren in Betrieb ist. Die Vorwärmtechnik in Zusammenhang mit der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik ist für maximale Einblasraten entwickelt worden. Aufgrund von höheren Investitionskosten einer Anlage zum Vorwärmen von Kohlenstaub und einer geringeren Steigerung der Einblasrate im Vergleich zur neuen Technik dauert der Return on Investment allerdings länger als bei der Investition in die Oxycoal<sup>+</sup>-Technik.

In der letzten Zeit sind vermehrt Anstrengungen unternommen worden, um die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Hochofenprozesses zu verbessern. Bedenkt man, dass die effizientesten Hochofen, bezogen auf den Reduktionsmittelverbrauch, nahe am thermodynamischen Minimum betrieben werden [10], ist es schwierig, den Energieverbrauch und

damit die Emissionen des Hochofens weiter zu reduzieren. Ein Ansatz ist es, den Hochofen stickstofffrei zu betreiben, das Gichtgas aufzufangen, Kohlendioxid abzutrennen und das verbleibende Kohlenmonoxid über die Blasform oder in den Schacht zurück in den Hochofen zu blasen. Das abgetrennte Kohlendioxid kann gemäß der CCS (Carbon Capture and Storage)-Technik eingelagert werden und würde so die Atmosphäre nicht weiter belasten. Dieser Ansatz ist Gegenstand intensiver Untersuchungen im Rahmen des ULCOS-Forschungsprogramms [11]. Ein ähnlicher Ansatz zur Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz des Hochofenprozesses ist das Einblasen von heißen Reduktionsgasen aus externen Quellen in Kombination mit dem Einblasen von Kohlenstaub und der Anreicherung des Hochofenwindes mit Sauerstoff [12]. Darüber hinaus wird ebenfalls ein teilweises Ersetzen von fossilen eingeblasenen Ersatzbrennstoffen mit Biomasse diskutiert [13].

Die Reduzierung des Koksatzes im Hochofen, die durch das Einblasen von Kohlenstaub erzielt werden kann, führt ebenfalls zu einer Minderung der Kohlendioxidemissionen. Diese fällt hauptsächlich in der Kokerei an, da auf den betreffenden Hochofen bezogen weniger Koks produziert werden muss. Pro Tonne Koks müssen ca. 1,3 t Koks kohle verkocht werden. Zur Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Einsparung in den Bildern 2 und 12 wird eine Kohlenstoffbilanz um den Hochofen und die Kokerei erstellt, bei der der gesamte Kohlenstoff der zur Herstellung der festgelegten Roheisenmenge benötigten Kohlenstoffträger zu CO<sub>2</sub> umgesetzt werden. Dabei ist nicht berücksichtigt, dass ein Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung von Koksofengas und Hochofengas resultieren, die bei Herstellung der festgelegten Roheisenmenge im betrachteten Bilanzraum anfallen, aber au-

ßerhalb des Bilanzraums genutzt werden [14]. Bei der Berechnung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen wurden der veränderte Bedarf an elektrischer Energie für die zusätzliche Sauerstofferzeugung und die verminderte Windverdichtung jedoch nicht berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang, aber auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, untersucht Küttner derzeit die physikalischen Prozesse und die technischen Konsequenzen eines kombinierten Einblasens von Kohlenstaub mit gasförmigen Ersatzbrennstoffen in die Blasform und die Wirbelzone des Hochofens.

*Aktualisierte Version eines Vortrags auf der AISTech 2012 Conference vom 7. – 9. Mai 2012 in Atlanta, USA.  
Dr.-Ing. Robin Schott, Leiter Verfahrenstechnik-Verfahrensentwicklung, Küttner GmbH & Co. KG, Essen.*

r.schott@kueettner.com

Literatur

- [1] Plantfacts-Datenbank, Ausgabe 2009, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf.
- [2] Schott, R.; Schott, H.-K.; Malek, C.: Effizienzsteigerung des Hochofenbetriebs durch den Einsatz der Küttner-Oxycoal-Technik, Jubiläumssitzung des VDI-GVC Fachausschusses „Hochtemperaturtechnik“, Düsseldorf, Februar 2008.
- [3] Peters, M.; Korthas, B.; Schmöle, P.: The past, present and future of pulverized coal injection at ThyssenKrupp Steel AG, Proc. 36th McMaster University Symp. on Iron and Steelmaking, 23.-25. Sept. 2008, Hamilton, Canada, S. 14/29.
- [4] Schott, R.; Malek, C.; Schott, H.-K.: Chemie Ing. Tech. 84 (2012) Nr. 7, S. 1076/84.
- [5] Schmöle, P.; Peters, M.: Injection of auxiliary reducing agents into the blast furnace – Effects on metallurgy and costs, Intern. STE Technologies Symposium, Kaohsiung, Taiwan, 3.-5. Nov. 2008.
- [6] <http://www.co2-handel.de/>
- [7] Gertz, J.: The new unloading, drying, grinding and injection equipment for blast furnaces at Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH in Duisburg, Germany, IAS 8th Ironmaking Conf., Rosario, Santa Fe, Argentinien, 1.-3. Nov. 2011.
- [8] Joksch, M.: Thermische Vorgänge beim Einblasen von Kohle in den Hochofen – Strömungs- und verfahrenstechnische Optimierung von Einblasanlagen, RWTH Aachen, 1993 (Diss.).
- [9] Liang, N.-W.; Chang, C.-T.: Practice of promoting pulverized coal injection rate at blast furnace No. 4 of China Steel Corp., Proc. 36th McMaster University Sympos. on Iron and Steelmaking, 23.-25. Sept. 2008, Hamilton, Canada, S. 47/61.
- [10] Lungen, H. B.; Schmöle, P.: stahl u. eisen 124 (2004) Nr. 11, S. 63/72.
- [11] Danloy, G.; Berthelement, A.; Grant, M.; Borlee, J.; Sert, D.; van der Stel, J.; Jak, H.; Dimastromatteo, V.; Hallin, M.; Eklund, N.; Sundqvist, L.; Sköld, B.-E.; Lin, R.; Feiterna, A.; Korthas, B.; Müller, F.; Feilmayr, C.; Habermann, A.: ULCOS – pilot testing of low CO<sub>2</sub> blast furnace process at the experimental BF in Lulea, Rev. de Met. 106 (2009) Nr. 1, S. 1/8.
- [12] Babich, A.; Gudenu, H. W.; Formoso, A.; Mavrommatis, K.; Froehling, G.; Garcia, L.: Choice of technological regimes of a blast furnace operation with injection of hot reducing gases, Revista de la Metalurgia 38 (2002) Nr. 4, S. 288/305.
- [13] Helle, H.; Helle, M.; Saxen, H.; Pettersson, F.: ISIJ Intern. 49 (2009) Nr. 9, S. 1316/24.
- [14] Petela, R.; Hutny, W.; Price, J. T.: Adv. Environm. Res. (2002) Nr. 6, S. 157/70.

	Einblasen von Kohlenstaub vs. Oxycoal <sup>+</sup> -Technik
Steigerung der Einblasrate	16,8 kg/tRE (= 58 800 t/a)
Koksersparnis	13,7 kg/tRE (= 47 900 t/a)
CO <sub>2</sub> -Emissionsminderung (hauptsächlich in der Kokerei)	14,37 kg/tRE (= 50 295 t/a)
Mehrverbrauch an Sauerstoff	17,5 m <sup>3</sup> (S.T.P.)/tRE (= 61,25 · 106 m <sup>3</sup> (S.T.P.)/a)
Energieeinsparung Hochofenwind	179,0 MJ/tRE (= 626 500 GJ/a)
Mengenabnahme Hochofenwind	77,0 m <sup>3</sup> (S.T.P.)/tRE (= 269,5 · 106 m <sup>3</sup> (S.T.P.)/a)
Energiegewinn Gichtgas	-55,1 MJ/tRE (= -192 850 GJ/a)
Kostensparnis	3,01236 €/tRE (= 10 543 260,00 €/a)

12

Effizienzsteigerung des Reduktionsmitteleinsatzes am Hochofen bei Einsatz der Oxycoal<sup>+</sup>-Technik [4]

Efficiency enhancement of reductants use in the BF using the Oxycoal<sup>+</sup> technology [4]