Modellierung von effizientem Kohlenstaubeinblasen in den Hochofen mittels der Oxycoal-Technik

Modelling of efficient pulverized coal injection into the blast furnace by means of the Oxycoal technology

Das Einblasen von festem Kohlenstaub über die Blasformen in die Wirbelzonen des Hochofens ist eine wichtige Maßnahme zur Reduzierung des Kokssatzes und damit der Kosten des Hochofenverfahrens. Die Oxycoal-Technik ermöglicht eine weitere Optimierung der Wirtschaftlichkeit. Dabei wird reiner Sauerstoff und Kohlenstaub gleichzeitig über Koaxiallanzen in die Blasform und Wirbelzone des Hochofens eingeblasen. Für Vorhersagen dieses Prozesses wurden ein physikalisches Prozessmodell und ein numerisches CFD-Modell entwickelt, die die komplexen Vorgänge unter Einsatz der Oxycoal-Technik quantitativ beschreiben können.

The pulverized coal injection (PCI) via the tuyères into the raceway of the blast furnace constitutes an important means in order to reduce the coke rate and accordingly the costs of the blast furnace process. The use of the Oxycoal technology involving the simultaneous injection of pure oxygen and pulverized coal via coaxial lances into the tuyère and the raceway of the blast furnace enables further optimization of the economic efficiency. For the prediction of this process a physical process model and subsequently a numerical CFD model have been developed that are able to quantify the outcomes of these complex processes using the Oxycoal technology in quantitative terms.

m traditionellen Hochofenprozess wird die notwendige Energie zur Erzeugung von Roheisen über die Zufuhr von Koks und Heißwind gedeckt. Da die Herstellung von Koks jedoch mit erheblichen Kosten verbunden ist, stellt die Reduzierung des Kokssatzes im Hochofen durch das Einblasen von Kohlenstaub in die Blasform und Wirbelzone des Hochofens eine bedeutende wirtschaftliche Maßnahme des Hochofenprozesses dar.

Die physikalischen Grenzen der Substitution von Koks durch Kohlenstaub sind der Stoffumsatz des Kohlenstaubs in der Blasform und der Wirbelzone sowie die bei nicht vollständigem Stoffumsatz bedingte Verstopfungsneigung der Schüttung mit einhergehender Störung der Durchgasung im Hochofen. Um die Durchgasungsfähigkeit der Schüttung zu gewährleisten, ist ein minimaler Kokssatz aufrechtzuerhalten. Die eingeblasene Kohlenstaubmenge kann daher nur so lange gesteigert und parallel die Koksmenge gemäß dem Ersatzfaktor Koks/Kohle verringert werden, bis sich ein deutlicher Druckverlustanstieg zeigt oder im Gichtgas größere Mengen von ungenutztem Einblaskohlenstaub enthalten Robin Schott und Matthias Schumacher



Anlagentechnik

sind. Das zusätzliche Kohlenstaubangebot in der Wirbelzone erfordert eine Sauerstoffanreicherung im Hochofenwind, um einerseits die Formgastemperatur aufrechtzuerhalten und um andererseits das eingebrachte Ersatzreduktionsmittel möglichst vollständig zu vergasen. Ziel beim Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen ist, möglichst viel "teuren" Koks durch den "preiswerteren" Kohlenstaub zu ersetzen, ohne dabei den Gesamtbrennstoffverbrauch signifikant zu erhöhen. Einblasraten von 180 bis 200 kg/t Roheisen (RE) bei einem Gesamtbrennstoffverbrauch von unter 500 kg/t RE können heute als Stand der Technik angesehen werden.

Eine zusätzliche Steigerung der Kohlenstaubeinblasrate mit einhergehender Verringerung des Kokssatzes kann durch den Einsatz der Oxycoal-Technik erreicht werden. Hierbei wird ein Teil des zur Anreicherung des Hochofenwindes zugeführten Sauerstoffs über Koaxiallanzen direkt zusammen mit dem Kohlenstaub in die Blasformen und die Wirbelzone des Hochofens eingeblasen. Aufgrund der messtechnischen Unzugänglichkeit sowie der komplexen Zusammenhänge zwischen Fluiddynamik, Physik der Wärmeübertragung und Chemie der Verbrennung/Vergasung lässt sich die mit der Oxycoal-Technik zusätzlich erreichbare Steigerung der Kohlenstaubeinblasrate nicht ohne Weiteres vorhersagen. Zu diesem Zweck wurden ein vereinfachtes physikalisches Prozessmodell und darauf aufbauend ein numerisches CFD-Modell entwickelt, die die komplexen Strömungs-, Wärme- und Stofftransportvorgänge unter Berücksichtigung der wesentlichen homogenen und heterogenen Reaktionen (Wassergas-, Boudouard- und Knallgasreaktionen) beim Einblasen von Kohlenstaub in die Blasform und die Wirbelzone des Hochofens unter Einsatz der neuen Technik beschreiben.

Was ist die Oxycoal-Technik?

Bild 1 zeigt schematisch eine Kohlenstaubeinblasanlage, die mit der Oxycoal-Technik ausgerüstet ist. Hierbei wird der Kohlenstaub pneumatisch im Dichtstromverfahren aus einem unter Druck stehenden Einblasgefäß über längere Distanzen zu einem Verteiler in der Nähe des Hochofens gefördert. Die Fördermenge wird dabei über eine Mengenstrommessung und ein keramisches Regelventil eingestellt. Im Verteiler wird der Kohlenstaub gleichmäßig auf mehrere Einzelleitungen gleicher Länge aufgeteilt, die zu jeder einzelnen Blasform führen. Dort wird der Kohlenstaub mittels Koaxiallanzen zusammen mit reinem Sauerstoff in die Blasform und die Wirbelzone des Hochofens eingeblasen. Eine Koaxiallanze besteht im Wesentlichen aus zwei ineinander gesteckten geraden Rohren, wobei durch das innere Rohr der Kohlenstaub mithilfe von Stickstoff als Transportgas und im koaxialen Spalt zwischen Innen- und Außenrohr der Sauerstoff gefördert wird. Wichtig ist, dass der Sauerstoff erst unmittelbar nach dem Verlassen der Koaxiallanze im Heißwindstrom in der Blasform mit dem im Innenrohr geförderten Kohlenstaub in Berührung kommt.

Die Idee hinter der Ummantelung des eingeblasenen Kohlenstaubstrahls mit Sauerstoff ist, den Sauerstoffpartialdruck in unmittelbarer Nähe der Kohlenstaubkörner im für die Zündung wichtigen Randbereich des Kohlenstaubstrahls zu maximieren. Hierbei ist zu bedenken, dass sich unmittelbar nach Austritt des "kalten" Sauerstoffs aus der Koaxiallanze keine spontane Vermischung des heißen Hochofenwinds mit dem kalten Sauerstoff einstellt, da sich die von der Temperatur abhängenden Viskositäten (Hochofenwind: 53,6 µPas, Sauerstoff: 26,6 µPas) signifikant unterscheiden. Auf diese Weise wird der



Kohlenstaubstrahl mit einem Sauerstoffmantel umhüllt. 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 [1]. Als Folge ergibt sich eine beschleunigte Umsatzgeschwindigkeit des eingeblasenen Kohlenstaubs. Die Umsetzung des Kohlenstaubs 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 2 sind vier Fotos abgebildet, die durch das Schauglas der Blasform Nr. 8 des Hochofens 5 der AG der Dillinger Hüttenwerke aufgenommen wurden, die die Firma Küttner mit der Dichtstrom- und Oxycoal-Technik ausgerüstet hat. Dabei ist das Schauglas so angeordnet, dass sich mit dem Hochofenwind durch die Blasform in die Wirbelzone des Hochofens blicken lässt.

Die Teilbilder auf der linken Seite in Bild 2 zeigen den konventionell 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 eine schwarze Kohlenstaubwolke gut zu erkennen, die noch nicht in der Blasform gezündet hat. Auf der rechten Seite sind zwei Fotos abgebildet, die die gleiche Blasform bei identischer Einblasrate zeigen und bei denen zusätzlich 280 m³(S.T.P.)/h Sauerstoff mithilfe der Oxycoal-Technik eingeblasen werden. Direkt an der Lanzenspitze ist die Verbrennung der aus der Einblaskohle ausgetreten Flüchtigen nach Eintritt in den Heißwindstrom deutlich zu erkennen. Das bedeutet, dass der eingeblasene Kohlenstaub bereits in der Blasform zündet und die Kohlenstoffumsetzung einsetzt. Wie die linken Fotos in Bild 2 zeigen, wird die Zündtemperatur des Kohlenstaubstrahles ohne Verwendung der Oxycoal-Technik auch in den Randbereichen auf dem ca. 300 mm langen Weg innerhalb der Blasform von der Lanzenspitze bis in die Wirbelzone nicht erreicht.

Modellierung der Kohlenstaubumsetzung unter Berücksichtigung der Oxycoal-Technik

Das zugrunde gelegte physikalische Modell der Blasform und der Wirbelzone ist in Bild 3 schematisch dargestellt. Umgebungsluft wird in den Winderhitzern auf 1000 bis 1200 °C erhitzt und mit einer Geschwindigkeit von 150 bis 220 m/s über die Blasformen in den Hochofen eingeblasen. Es bildet sich ein schlauchförmiger, nach oben und zur Hochofenmitte ausgebeulter Hohlraum: die Wirbelzone. Der Raum der Wirbelzone teilt sich in eine Oxidations- und eine Reduktionszone auf. Die Oxidationszone zeichnet sich durch die exotherme Oxidation von Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid und Kohlendioxid aus, die hier für den starken Temperaturanstieg verantwortlich ist. Die



Influence of the Oxycoal technology on coal gasification within the tuyère and the raceway of the blast furnace



Oxidationszone endet an der Stelle, an der der Sauerstoff des Windes fast vollständig verbraucht ist. Die sich anschließende Reduktionszone ist durch die dort ablaufende Boudouard-Reaktion bestimmt. Da diese Reaktion endotherm ist, sinkt die Temperatur in der Reduktionszone. Der Hauptgasfluss strömt durch die Wirbelzone und verlässt sie über die obere Begrenzung. Für die Eindringtiefe des Windes hat Peters [2] eine semi-empirische Abhängigkeitsfunktion von der kinetischen Energie des Heißwindes an der Blasform ermittelt. Die Form der Wirbelzone geht auf die endoskopischen Untersuchungen von Greuel et al. [3] zurück.

Beim Einblasen von Kohlenstaub in den Hochofen sollte möglichst der gesamte Kohlenstaub in der Flugphase innerhalb der Oxidationszone umgesetzt werAnlagentechnik

den. Dazu stehen ca. 10 bis 20 ms zur Verfügung. Dies ist der Zeitraum vom Eintritt der Kohlenstoffpartikel in den Heißgasstrom bis zum Ende der Oxidationszone (bzw. Eintritt 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. Während der Aufheizphase wird in Abhängigkeit der erreichten Temperatur die Restoberflächenfeuchte des Kohlenstaubkorns verdampft. Anschließend setzt die Pyrolyse der aufgeheizten Kohlenstaubkörner ein, wobei die Pyrolysegase wegen der hohen Geschwindigkeit der Gas-Gas-Reaktionen mit dem Sauerstoff aus der Koaxiallanze bzw. aus dem Wind zu CO₂ und H₂O oxidiert werden. Die hierdurch entstehenden Reaktionswärmen helfen, weitere Aufheizvorgänge schneller ablaufen zu lassen. Der noch vorhandene Sauerstoff und Wasserdampf des Windes sowie die Verbrennungsprodukte CO2 und H2O stellen Vergasungsmittel für den

| Oxidation der Flüchtigen (homogen): | $Vol + O_2 \rightarrow CO + H_2 + N_2$ | |
|---|--|--|
| Partieller Koksausbrand: | $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$ | |
| CO-Oxidation (homogen) / Dissoziation von CO ₂ : | $2 \text{ CO} + \text{O}_2 \Leftrightarrow 2 \text{ CO}_2$ | |
| Boudouard-Reaktion: | $C + CO_2 \rightarrow 2 CO$ | |
| Wassergasreaktion (heterogen): | $C + H_2 O \rightarrow CO + H_2$ | |
| Wassergasreaktion (homogen): | $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ | |
| Knallgasreaktion / Dissoziation von H ₂ O: | $2 H_2 + O_2 \Leftrightarrow 2 H_2O$ | |
| | | |

4

Berücksichtigte Kohlenstaubvergasungsreaktionen

Considered coal gasification reactions

| | | PCI | PCI |
|-------------------------------------|-----------------|-------|-------------|
| | | | mit Oxycoal |
| Heißwind | | | |
| Temperatur | °C | 1 195 | 1 195 |
| Druck | bar a | 4,5 | 4,5 |
| Menge | m³ (S.T.P.)/h | 10435 | 10188 |
| Sauerstoffgehalt | % Volumenanteil | 25,48 | 23,68 |
| Stickstoffgehalt | % Volumenanteil | 72,72 | 74,49 |
| Wasserdampfgehalt | % Volumenanteil | 1,79 | 1,83 |
| Kohlenstaub (PCI) | | | |
| Menge | t/h | 2,05 | 2,05 |
| Transportgasmenge (N ₂) | m³ (S.T.P.)/h | 31,9 | 31,9 |
| Sauerstoff (Oxycoal) | | | |
| Menge | m³ (S.T.P.)/h | 247 | _ |
| Temperatur | °C | 20 | _ |
| | | | |

5

Randbedingungen der Simulationsläufe

Boundary conditions of simulation runs

der Temperatur vergast wird. Als Reaktionsprodukte werden CO_2 , H_2O , CO und H_2 gebildet, wobei CO_2 und H₂O in Abhängigkeit von der Temperatur dissoziieren. 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 Semikokses tritt jedoch in die Koksschüttung des Hochofens ein und wird erst hier umgesetzt. Dieser Anteil sollte möglichst klein sein. Das Einblasen von Kohlenstaub über die Blasformen in die Wirbelzone des Hochofens erfordert eine

gebildeten Semikoks dar, der nun in Abhängigkeit von

men in die Wirbelzone des Hochofens erfordert eine Sauerstoffanreicherung im Wind in Abhängigkeit vom Anteil an flüchtigen Bestandteilen der Kohle zur Einstellung der Formgastemperatur (RAFT) in der Wirbelzone auf das gewünschte Niveau. Ohne Zugabe von Anreicherungssauerstoff würde die Formgastemperatur wegen der zur Spaltung nötigen Energien einbrechen. Normalerweise wird der gesamte Anreicherungssauerstoff dem kalten Wind vor den Winderhitzern zugegeben. Dabei wird die Windmenge um die Menge reduziert, deren Sauerstoffanteil der Menge des Anreicherungssauerstoffs entspricht. Bei Beibehaltung der Windmenge würde bei Zugabe von Anreicherungssauerstoff ansonsten eine Leistungssteigerung des Hochofens erfolgen.

Die Grenze für das Einblasen von Kohlenstaub ist der beginnende unvollständige Umsatz des Kohlenstaubs im Unterofen. Dieser macht sich bemerkbar, wenn Semikoks aus nicht umgesetztem Kohlenstaub im Gichtstaub auftritt und/oder sich sogenannte "Birdnetzonen" (Feinkohleablagerungen in den Randzonen des toten Mannes) bilden. Wenn diese "Birdnetzonen" 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 Formengases in die Randzonen des Hochofens oberhalb der Blasformen sind die Folge. Gleichzeitig wird die Flüssigkeitsdrainage von abtropfendem Eisen und Schlacke gestört.

Das Modell berücksichtigt die in Bild 4 aufgeführten Kohlenstaubvergasungsreaktionen. Die Schwierigkeit einer physikalisch-mathematischen Modellierung liegt in der simultanen Lösung der mit den Kohlenstaubvergasungsreaktionen überlagerten Formulierung der dreidimensionalen Zweiphasenströmung unter Berücksichtigung von Wärmestrahlung und Konvektion. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Kohlenstaubumsetzung hängt von der Temperatur ab und wird entsprechend entweder von der Reaktionskinetik, der Porendiffusion oder der Grenzschichtdiffusion bestimmt. Zur Lösung des sich ergebenden komplexen Gleichungssystems wird an dieser Stelle auf die Hilfe von Näherungslösungen im Rahmen der numerischen Strömungssimulation (CFD) zurückgegriffen.

Basis des CFD-Modells bildet die Festlegung des Strömungshohlraumes, der zwar innerhalb der Blasform konstruktiv eindeutig festgelegt ist, dessen Kontur und Ausdehnung aber im Bereich der Wirbelzone nur abgeschätzt werden können. Form und Lage der Grenzflächen zur umgebenden Koksschicht werden sich während des Prozesses dynamisch verhalten, sodass diese im Modell als Freiformflächen unter Berücksichtigung der prinzipiellen Form nach [3] willkürlich festgelegt sind. Der Hohlraum der Wirbelzone ist von einem Ausschnitt der Schüttung umgeben. Der Widerstandskoeffizient wird aus typischen Lückengraden von Hochofenschüttungen berechnet [4]. Diese Vorgehensweise erlaubt auch einen Gastransport innerhalb des Schüttguts, der insbesondere in der Nähe des Blasformaustritts zu erwarten ist. In das Berechnungsgebiet wurde ein hybrides Hexaeder- und Tetraedergitter mit ca. 1 Million Volumenelementen implementiert.

Die dreidimensionale Strömung der Gasphase wird über die stationären, Reynolds-gemittelten Erhaltungsgleichungen für Masse, Stoffart, Impuls und Energie beschrieben und mithilfe des Realizable-k-&-Turbulenzmodells [5] geschlossen. Dieses Modell ist besonders für Freistrahlströmungen geeignet und damit in der Lage, die charakteristischen Strömungsverhältnisse innerhalb der Wirbelzone gut abzubilden. Die Gasdichte ist stark von den lokalen Druckverhältnissen abhängig. Da bei frühzeitig einsetzender Verbrennung in der Blasform Mach-Zahlen von mehr als 0,1 erwartet werden, ist es sinnvoll, Kompressionseffekte des Gases im Modell zu berücksichtigen.

Der in dieser Anwendung dominierende Wärmetransport durch Strahlung wird mithilfe des Discrete-Ordinates-Modells [6] mit einem nach dem Weighted-sum-of-grey-gases (wsggm)-Modell [7] berechneten Absorptionskoeffizienten für die Gasphase modelliert. Dieser berücksichtigt den Einfluss der strahlungsaktiven Komponenten CO₂ und H₂O. Andere zweiatomige Gaskomponenten sind in diesem Modell zwar nicht enthalten, da aber der Einfluss der Kohlenstaubpartikel die Absorptionseigenschaften der Gasphase dominiert, spielt diese Vereinfachung nur eine untergeordnete Rolle. Der strahlungsgetriebene Wärmetransport an die Oberfläche der Kohlenstaubpartikel und deren Einfluss auf den lokalen mittleren Absorptionskoeffizienten der Gasphase sind explizit im Modell berücksichtigt. Für die Kühlung der Blasform sind Konvektion an den wassergekühlten Blasformwänden und Wärmeleitung in der keramischen Hülse und in der Kupferblasform vorgesehen.

Die Kohlenstaubpartikel werden als disperse Phase nach der Lagrange-Methode behandelt. Die Umsetzung der Partikel wird mittels Pyrolyse und





anschließendem Abbrand des Semikokses (C_{fix}) berechnet, wobei die heterogenen Oberflächenreaktionen neben der partiellen Oxidation des C_{fix} um die Boudouard-Reaktion und die heterogene Wassergasreaktion erweitert wurden. Die Pyrolyse wird nach Kobayashi [8] gemäß zweier konkurrierender Raten nach Ubhayakar [9] modelliert. Zur Berücksichtigung des Drucks in der Wirbelzone (etwa 4,5 bar absolut) sind die druck- und temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten [10] in der Partikelgrenzschicht, die die Umsatzraten der diffusionslimitierten Oberflächenreaktionen bestimmen, angepasst worden.

In der Gasphase ist der Transport von sieben Einzelspezies (O₂, N₂, CO₂, H₂O, CO, H₂ und flüchtige Bestandteile der Kohle) und deren Reaktionen untereinander (Oxidation der flüchtigen Bestandteile, COund H₂-Oxidation, Dissoziation von Wasser und CO₂ sowie die homogene Wassergasreaktion) betrachtet. Für Gasphasenreaktionen in heißen Umgebungen überwiegt der Einfluss der Turbulenz auf die chemischen Reaktionsraten den der Temperatur deutlich. Insbesondere für die Berechnung von Verbrennungszwischenprodukten wie H_2 oder CO ist es wichtig, dass ein Modell mit Turbulenz-Chemie-Interaktion (Eddy Dissipation Concept) zum Einsatz kommt, das die Reaktionsraten auf Basis der Mikrovermischung auf molekularer Ebene berechnet [11].

Ergebnisse

Beispielhaft wurde für die Simulationen der Blasform und der Wirbelzone bzw. der Oxidationszone ein Hochofen mit einer Kapazität von 10000 t RE/Tag für das Einblasen von Kohlenstaub zum Einen ohne und zum anderen mit Berücksichtigung der Oxycoal-Technik miteinander verglichen. Wichtig ist, dass sich diese Simulationsläufe nur dadurch unterscheiden, dass beim Einblasen von Kohlenstaub mit Oxycoal-Technik 247 m³(S.T.P.)/h reiner Sauerstoff durch die Koaxiallanze eingeblasen wird. Diese Sauerstoffmenge wird beim Einblasen von Kohlenstaub ohne Berücksichtigung der Oxycoal-Technik der Sauerstoffanreicherung des Hochofenwindes zugeschlagen. Die absolute Menge an zugeführtem Sauerstoff ist bei beiden Simulationsläufen demzufolge gleich. Die Randbedingungen beider Simulationsläufe sind in Bild 5 zusammengefasst.

In Bild **6** sind die mit dem CFD-Modell berechneten Konturen der sichtbaren Flamme und damit auch der Ort der Zündung des eingeblasenen Kohlenstaubs für den reinen PCI-Betrieb und für den PCI-Betrieb unter Verwendung von Oxycoal vergleichend gegenübergestellt. Die Flammkontur ist hier über die Einhüllende eines zündfähigen Gemisches mit einer Konzentration der Kohleflüchtigen von 5 % Volumenanteil genähert und in Bild **6** als "gelbe Wolken" dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen, dass bei Einsatz der Oxycoal-Technik die Zündung des eingeblasenen Kohlenstaubs bereits in der Blasform stattfindet, wohingegen diese ohne Oxycoal erst in der Wirbelzone beginnt. Diese Ergebnisse des physikalischen Modells passen exakt zu den realen Beobachtungen am Hochofen, Bild **2**.

In Bild 7 sind weitere Ergebnisse der beiden Simulationsläufe bzgl. der Temperaturverteilung dargestellt. Hierbei wurden die numerischen Simulati-



onsergebnisse auf einer zweidimensionalen Fläche dargestellt, die den Reaktionsraum in der Mitte teilt. Die Ergebnisse der Temperaturverteilung zeigen, dass es bei dem Einsatz der Oxycoal-Technik bereits zu einer signifikanten Temperaturerhöhung innerhalb der Blasform kommt, während ohne Oxycoal-Einsatz die Temperaturerhöhung erst in der Wirbelzone stattfindet. Insgesamt folgt, dass durch die früher einsetzende Zündung des eingeblasenen Kohlenstaubs mithilfe der Oxycoal-Technik die Vergasung des Kohlenstaubs beschleunigt bzw. verbessert wird.

Sehr interessant sind die Simulationsergebnisse der axialen Geschwindigkeitsverteilung, die Bild 8 zeigt. Wird Kohlenstaub ohne Oxycoal-Einsatz eingeblasen, zeigt die axiale Geschwindigkeitsverteilung eine gerichtete Gasbewegung von der Blasform durch den unteren Teil der Wirbelzone in Richtung Hochofeninneres. Erst in der oberen Ausbuchtung der Wirbelzone ist eine Rückströmung der Gase zurück in Richtung Blasform zu erkennen. Bei den Simulationsergebnissen unter Berücksichtigung der Oxycoal-Technik fällt auf, dass sich direkt vor der Blasform im unteren Teil der Wirbelzone ein zusätzlicher Gaswirbel gebildet hat, in dem Gas aus dem unteren Teil der Wirbelzone in Richtung Blasform zurück gewirbelt wird. Die Ursache für diesen zusätzlichen Gaswirbel liegt in der frühen Zündung der aus dem eingeblasenen Kohlenstaub austretenden Flüchtigen an der Grenzfläche zwischen eingeblasenem Kohlenstaubstrahl und Sauerstoffummantelung innerhalb der Blasform. Mit der durch die Umsetzung der flüchtigen Bestandteile freigesetzten Wärme geht eine axiale Geschwindigkeitserhöhung der den einblasenden Kohlenstaubstrahl umgebenden Gashülle einher. Der "kalte" Kern des eingeblasenen Kohlenstaubstrahls wird jedoch nicht zusätzlich beschleunigt. Zur Gewährleistung der Kontinuitätsgleichung ergibt sich daher der auf dem Simulationsergebnis zu sehende Gaswirbel. Bezogen auf den Umsatz des eingeblasenen Kohlenstaubs ist dieser Gaswirbel sehr erwünscht, da hierbei der Hochofenwind mit dem eingeblasenen Kohlenstaub stärker durchmischt und damit die durchschnittliche Verweilzeit der eingeblasenen Kohlenstaubpartikel innerhalb der Blasform und Wirbelzone leicht verlängert wird. Dies wirkt sich positiv auf die Vergasungsrate des eingeblasenen Kohlenstaubs aus.

In Bild 9 sind die mit beiden Simulationen berechneten Konzentrationsverläufe der Gaskomponenten sowie der Verlauf der Gastemperatur entlang der Blasform und der Wirbelzone (Oxidationszone) dargestellt. Die Daten wurden dabei als volumenstromgewichtete Mittelwerte über den gesamten Querschnitt des Hohlraums an diskreten Positionen in der Oxidationszone bestimmt. Der Verlauf der Kurven für den konventionellen PCI-Betrieb zeigt dabei eine qualitativ gute Übereinstimmung mit veröffentlichten Daten aus der Literatur, z. B. [12].

TECHNIK + TRENDS

Anlagentechnik



9

Konzentrationsverläufe der Haupt- (oben) und der Nebenkomponenten (unten) sowie der Gastemperatur entlang der Oxidationszone

Composition profile of main (top) and auxiliary (bottom) components and gas temperature profile along the oxidation zone

Aus dem Vergleich des Oxycoal-Betriebs mit dem konventionellen PCI-Betrieb in Bild 9 wird der bereits beschriebene Effekt der intensiveren Reaktionsabläufe verdeutlicht. Der Anstieg der Gastemperatur setzt bereits vor Ende der Blasform ein. Die signifikante Abnahme der Sauerstoffkonzentration und das Auftreten von Vergasungsprodukten vor Eintritt in die Wirbelzone bzw. Oxidationszone weisen zusätzlich auf ein Einsetzen der exothermen Oxidationsreaktionen innerhalb der Blasform hin. Am Ende der Oxidationszone sind die Konzentrationen der Reaktionsprodukte im Oxycoal-Betrieb gegenüber konventionellem PCI-Betrieb erhöht, die Gastemperatur ist höher und die Sauerstoffkonzentration niedriger. Daraus kann bereits geschlossen werden, dass durch den Einsatz der Oxycoal-Technik der Abbau des Semikokses schneller und vollständiger abläuft als im konventionellen PCI-Betrieb.

Der bessere Konversionsgrad des Kohlenstaubs während der Flugphase bildet das Steigerungspotenzial der Kohlenstaubeinblasrate durch den Einsatz der OxycoalTechnik. Unvollständig oxidierte Kohlenstaubpartikel, die am Ende der Oxidationszone auf die Koksschüttung treffen, können sich dort ansammeln und die beschriebenen "Birdnetzonen" bilden. Dadurch kann die Durchgasung der Schüttung erschwert werden. Die Kenntnis der Kohlenstaubeinblasrate im konventionellen PCI-Betrieb, die die Durchgasung des Hochofens soeben noch nicht negativ beeinträchtigt, bildet die Basis für die Methodik, anhand der sich mithilfe des hier entwickelten Modells die erreichbare Steigerung der Kohlenstaubeinblasrate mithilfe der Oxycoal-Technik a priori quantifizieren lässt. Im Gegensatz zu experimentellen Untersuchungen kann der am Ende der Oxidationszone verbliebene Massenstrom der Feinkohle (C_{fix} und Asche) beim ersten Kontakt mit den Randflächen der Oxidationszone (Koksschüttung im Hochofen) in den CFD-Simulationen explizit ausgewertet werden, Bild 10. Aus der Simulation des konventionellen und bei gegebener Einblasrate als stabil bekannten PCI-Betriebszustandes lassen sich also die unvollständig oxidierten Kohlenstaubpartikel quantifizieren, die am Ende der Oxidationszone auf die Koksschüttung treffen. Dieser Wert kann als Maß der von dem jeweiligen Hochofen bei akzeptabler Durchgasung noch in der Koksschüttung umsetzbaren Kohlenstaubrestmenge interpretiert werden. Aus einer weiteren Simulation bei gleichen Randbedingungen, aber unter zusätzlicher Berücksichtigung der Oxycoal-Technik lässt sich die Verbesserung der Vergasung des eingeblasenen Kohlenstaubs ermitteln.

In Bild 10 ist das Ergebnis eines solchen Vergleichs dargestellt. Es zeigt sich, dass die Vergasung des eingeblasenen Kohlenstaubs bei Verwendung der Oxycoal-Technik etwa um 10 % schneller bzw. besser abläuft. Daraus lässt sich folgern, dass sich die Einblasrate beim Oxycoal-Betrieb um etwa 10 % steigern lässt, ohne dass dabei die Menge an noch nicht umgesetzten und in die Koksschüttung am Ende der Oxidationszone eintretenden Kohlenstaubpartikel im Vergleich zum konventionellen PCI-Betrieb gesteigert werden würde. Somit würde die Durchgasung des Hochofens trotz Steigerung der Kohlenstaubeinblasrate nicht negativ beeinträchtigt werden.

Fazit

Insgesamt lässt sich mit der oben beschriebenen Modellierungsmethode eine mögliche Steigerung der Kohlenstaubeinblasrate und damit eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Hochofenprozesses durch den Einsatz der Oxycoal-Technik ermitteln. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die Vergasung des eingeblasenen Kohlenstaubs im Oxycoal-Betrieb um ca. 10 % beschleunigen bzw. verbessern lässt. Es folgt, dass sich mit Oxycoal die Kohlenstaubeinblasrate ebenfalls um ca. 10 % bei gleichzeitiger Reduktion der Koksrate gemäß dem Austauschfaktor Koks/Kohle steigern lässt, da die Durchgasung des Hochofens nicht negativ beeinflusst wird.

In Bild 11 sind die Wirtschaftlichkeit und die Effizienzsteigerung des Reduktionsmitteleinsatzes im Hochofen für beide Varianten zum Einblasen von Kohlenstaub zusammengefasst. Die hierfür notwendigen Berechnungen des Hochofenprozesses für einen Beispielhochofen mit einer Tagesproduktion von 10000 t RE wurden mit einem eigenen Hochofenmodell [13] durchgeführt, das auf einer zweistufigen Wärme-, Stoff- und Reduktionsbilanz basiert [14; 15]. Der wesentliche Hebel zur Kostensenkung besteht in der Substitution von Koks durch Einblaskohle. Grund hierfür ist der signifikante Preisunterschied zwischen Koks und Einblaskohle frei Hochofen. Zu bedenken ist, dass die Kostensituation für jedes Hochofenwerk verschieden und abhängig von der konjunkturellen Lage ist. Beispielhaft soll an dieser Stelle mit den aus [16] entnommenen Kosten für Koks von 350 €/t, für Einblaskohle von 175 €/t, für Sauerstoff von 40 €/1 000 m³(S.T.P.), für Winderhitzung von 9 €/GJ und für Windverdichtung



mit den Randflächen der Oxidationszone (Koksschüttung im Hochofen)

Mass flow of injected PC at first contact with the boundary of the oxidation zone (coke layers in blast furnace)

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

11

Effizienzsteigerung des Reduktionsmitteleinsatzes im Hochofen durch die Oxycoal-Technik [13]

Efficiency enhancement of reductants use in the BF using the Oxycoal technology [13]

von 6 \notin /1 000 m³(S.T.P.) sowie einer Gichtgasgutschrift von 6 \notin /GJ gerechnet werden. Für eingesparte CO₂-Emissionen wird eine Gutschrift von 8 \notin /t angesetzt.

Die Ergebnisse der Beispielrechnung in Bild 11 zeigen, dass sich durch die Ausrüstung einer bestehenden Kohlenstaubeinblasanlage mit der Oxycoal-Technik die Effizienz des Reduktionsmitteleinsatzes im Hochofen steigern lässt. Es ergibt sich für diesen Fall eine zusätzliche Kostenersparnis von 3,01 €/t RE. Es sei an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich auf den beispielhaften Charakter der obigen wirtschaftlichen Betrachtung hingewiesen. Insbesondere erscheint die Preisdifferenz aus [16] 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 1,81 €/t RE bei Anwendung der Oxycoal-Technik.

In Bild 11 sind nur die wesentlichen Einflussparameter verallgemeinert dargestellt und allgemeine Tendenzen erkennbar. Jeder Hüttenbetrieb hat andere Randbedingungen, die die Wirtschaftlichkeit beeinflussen. Darüber hinaus zeigt die Erfahrung der letzten 27 Jahre und mit bereits 33 mit der Oxycoal-Technik ausgerüsteten PCI-Anlagen, dass diese Variante sowohl ein bewährtes als auch ein gewinnbringendes Verfahren ist.

Erweiterte Version eines Vortrags vom 26. Deutschen Flammentag am 12. September 2013 in Duisburg. Dr.-Ing. Robin Schott, Leiter Verfahrenstechnik – Verfahrensentwicklung Eisenhüttenindustrie, Küttner GmbH & Co. KG, Essen; Dipl.-Ing. Matthias Schumacher, Project Manager, Aixprocess GmbH, Aachen. r.schott@kuettner.com

LITERATUR

- Joksch, M.: Thermische Vorgänge beim Einblasen von Kohle in den Hochofen — Strömungs- und verfahrenstechnische Optimierung von Einblaslanzen, RWTH Aachen, 1993 (Diss.).
- [2] Peters, M.: Untersuchung zu den physikalischen Vorgängen im Unterofen des Hochofens unter besonderer Berücksichtigung des Koksverhaltens vor den Blasformen, RWTH Aachen, 1988 (Diss.).
- [3] Greuel, M.; Hillmitter, F. W.; Kister, H.; Krüger, B.: stahl u. eisen 94 (1974) Nr. 12, S. 533/39.
- [4] Jeschar, R.; Pötke, W.; Dombrowski, G.: Ermitteln des örtlichen Lückengrades in der Schüttung des mit Stickstoff abgekühlten Hochofens der Mannesmann-Röhrenwerke AG, Forschungsbericht, Europäische Kommission, 1998.
- [5] Shih, T.-H.; Liou, W. W.; Shabbir, A.; Zhu, J.: Computers Fluids 24 (1995) Nr. 3, S. 227/38.
- [6] Carlson, B. G.: Lathrop, K. D.: Argonne National Laboratory, [Hrsg.:] Greenspan, H.; Kelber, C. N.; Okrent, D., Gordon and Breach Science Publ., New York, London, Paris, 1968.
 - Denison, M. K.; Webb, B. W.: J. Heat Transfer 115 (1993), S. 1002/12.
- [8] Kobayashi, H.; Howard, J. B.; Sarofim, A. F.: Coal devolatilization at high temperatures, Int. Symp. on Combustion, 1977, 16,1, S. 411/25.
 [9] Ubhayakar, S. K.; Stickler, D. B.; Rosenberg, C. W.; Gannon, R. E.: Rapid
- devolatilization of pulverized coal in hot combustion gases. Int. Symp. on Combustion, 1977, 16,1, S. 427/36.
- [10] Fuller, E. N.; Schettler, P. D.; Giddings, J. C.: Ind. Eng. Chem. 58 (1966) Nr. 19, S.18/27.
- [11] Magnussen, B. E.: On the structure of turbulence and a generalized Eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow, 19th AIAA Meeting, St. Louis, USA, 12. – 15. Jan. 1981.
- [12] Gudenau, H. W.; Ariyama, T.; Korthas, B.; Yang, T.: stahl u. eisen 105 (1985) Nr. 4, S. 211/20.
- [13] Schott, R.; Malek, C.; Schott, H.-K.: Chemie Ing. Tech. 84 (2012) Nr. 7, S. 1076/84.
- [14] Schürmann, E.; Bülter, D.; Arch. Eisenhüttenw. 6 (1964) Nr. 698, S. 475/86.
 [15] Schürmann, E.; Bülter, D.; stahl u. eisen 81 (1961) Nr. 24, S. 1565/74.
- [16] Schmöle, P.; Peters, M.: Injection of auxiliary reducing agents into the blast furnace — effects on metallurgy and costs, International STE Technologie Symposium, Kaohsiung, Taiwan, 3. – 5. Nov. 2008.