

Zeitschrift  
für die Herstellung  
und  
Verarbeitung von  
Eisen und Stahl



2/2009

16. Februar 2009

ISSN 0340-4803

# stahl und eisen



# Akustische Gastemperaturmessung an der Hochofengicht

*Acoustic gas temperature measurements at the blast furnace top*

Hans-Peter Domels, Manfred Deuster und Fritz Reinitzhuber

Die komplexen metallurgischen, wärme- und strömungstechnischen Vorgänge im Inneren des Hochofenschachtes lassen sich in ihrer Gesamtheit durch Messungen nicht unmittelbar erfassen. Deshalb muss auf bestimmte periphere Messinformationen zurückgegriffen werden, um diese in Verbindung mit verschiedenen empirischen und mathematischen Modellen so auszuwerten, dass dennoch das eigentliche Prozessgeschehen in Erfahrung gebracht und gegebenenfalls beeinflusst werden kann. Allerdings hat es nicht an Bemühungen gefehlt, den einen oder anderen Teilprozess auf messtechnischem Wege eingehender zu erforschen. Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens war es das Ziel, ein neues Gastemperatur-Messverfahren an der Gicht eines Hochofens zu erproben, um das Temperaturfeld oberhalb der Beschickungsoberfläche ständig zu erfassen. Damit sollen Rückschlüsse auf eine verbesserte Ofenführung ermöglicht werden.

*The complex metallurgical heat and flow influenced processes in the interior of the blast furnace shaft cannot be detected in their entirety by direct measurements. Therefore, specific peripherally measured information must be used in order to evaluate these with different empirical and mathematical models so that the process as such can be analysed and, if necessary, modified. However, no effort was spared in researching the one or other partial process in more detail by technical measuring means. Within the framework of this R+D project, the objective was to test a new gas temperature measurement procedure at the top of a blast furnace in order to continuously record the temperature field above the charging surface. In this way, it should be possible to draw conclusions for an improved furnace operation.*



Der neue Hochofen 8 von ThyssenKrupp Steel wurde am 13. Dezember 2007 in Duisburg in Betrieb genommen  
Start-up for the new blast furnace No 8 of ThyssenKrupp Steel was in December 2007

Foto: tks

Zur Messung der Gastemperatur kommen in der Praxis Berührungsmethoden (wie Thermoelemente, Widerstands- und Absaugethermometer) und berührungslose Verfahren (wie Strahlungspyrometer und Schallpyrometrie) zum Einsatz. Bei hohen Temperaturen und großen Temperaturunterschieden im Feuerraum sowie bei unbekanntem Emissionsgrad der strahlenden Körper ist allerdings die Verwendung aller genannten Messmethoden außer der Schallpyrometrie problematisch.

## Akustische Gastemperaturmessung

Akustische Messsysteme erfassen dagegen die Gastemperatur ohne Strahlungsanteil. Darüber hinaus ist diese auch in staubbeladenen, korrosiven und aggressiven Atmosphären einsetzbar, die Messung erfolgt verzögerungs- und driftfrei. Sie unterliegt praktisch keiner Alterung.

**Messprinzip.** Das Phänomen der temperaturabhängigen Schallausbreitung in Gasen und die Nutzung desselben zur messtechnischen Erfassung der Gastemperatur ist bereits 1873 beschrieben worden [1]. Die akustische Gastemperaturmessung oder Schallpyrometrie verwendet hierbei den in Gleichung (1)

herausgestellten physikalischen Zusammenhang, wonach die Quadratwurzel der absoluten Gastemperatur proportional zur Schallgeschwindigkeit ist:

$$c = (K \cdot R \cdot T / M)^{1/2} \tag{1}$$

Hierin bedeuten:

- c Schallgeschwindigkeit
- K Adiabatenkoeffizient
- R allgemeine Gaskonstante
- T absolute Gastemperatur
- M Molekulargewicht des Gases.

In der praktischen Anwendung wird die Schalllaufzeit zwischen einem Sender und einem Empfänger entlang einer in ihrer Länge bekannten Messstrecke (Pfad) ermittelt [2]. Über die Schalllaufzeit ergibt sich somit der integrale Temperaturmittelwert längs der Strecke gemäß Gleichung (2):

$$\vartheta = (10^6 \cdot D^2 / B \cdot \tau^2) - 273,16 \tag{2}$$

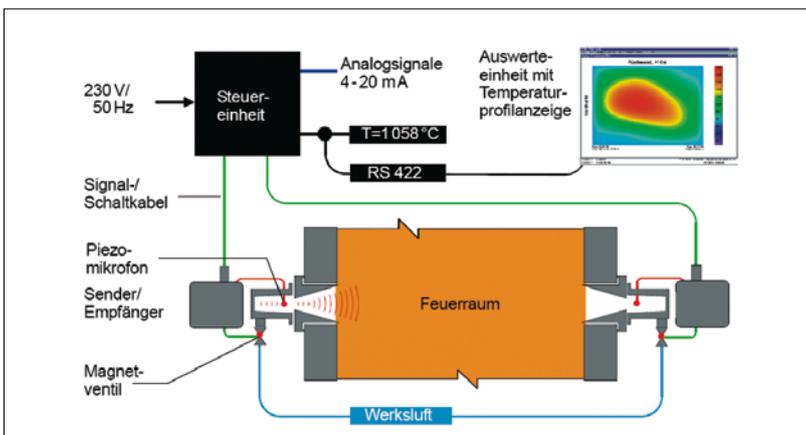
Hierin bedeuten:

- $\vartheta$ : mittlere Pfadtemperatur in °C
- D: Abstand zwischen Sender und Empfänger in m
- B: akustische Konstante  $K \cdot R / M$  in  $m^2/s^2 \cdot K$
- $\tau$ : Schalllaufzeit in ms.

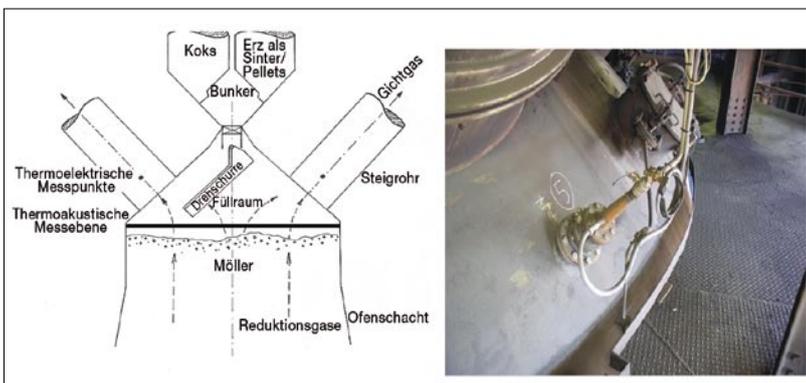
Messungenauigkeiten ergeben sich durch betriebsbedingte Änderungen der Gaszusammensetzung, der Staubkonzentration, der Temperatur- und Geschwindigkeitsgradienten sowie durch falsche Vermessung der Sensoranordnung. Die dadurch entstehenden Messfehler sind fallweise zu ermitteln. Der Gesamt-messfehler beträgt bei sorgfältiger Ermittlung der Basisdaten in der Regel jedoch weniger als 2 %.

**Aufbau und Funktion.** Das Messsystem ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Es besteht in seiner einfachsten Konfiguration aus zwei baugleichen Sender/Empfänger (S/E)-Einheiten am Feuerraum sowie aus einem externen Steuergerät. Zur Schallerzeugung dient üblicherweise werkseitige Druckluft. Das Steuergerät schaltet zunächst das Magnetventil einer als Sender wirkenden Einheit, wodurch ein breitbandiges Rauschen zwischen 500 und 3 000 Hz erzeugt wird. Diese Signale werden gleichzeitig über Piezomikrofone der Sender- und Empfängerseite erfasst. Die Steuereinheit verarbeitet schließlich die digitalisierten Signale mithilfe spezieller Korrelationstechniken und stellt die jeweilige Pfadtemperatur zur Anzeige oder zur weiteren Verarbeitung bereit. Durch wechselseitige Hin- und Rückmessung zwischen beiden S/E-Einheiten lassen sich somit die mittleren Gastemperaturen über der gegebenen Verbindungsstrecke aus beiden Richtungen erfassen.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den Feuerraum mit weiteren kombinierten wirkenden



1 Aufbau des akustischen Gastemperaturmesssystems  
Setup of the acoustic gas temperature measuring system



2 Einpfadanordnung am Hochofen 9  
Single path arrangement at blast furnace No 9

S/E-Einheiten so zu bestücken, dass sich die Anzahl der konfigurierbaren Pfade überproportional erhöht. Dabei sind die Anzahl und insbesondere die Anordnung der Einheiten im Vorfeld sorgfältig zu planen. Mithilfe solcher Mehrpfadkombinationen wird über ein nachgeschaltetes rechnerunterstütztes Auswertesystem die Temperaturverteilung über die Gesetzmäßigkeiten der Tomografie [3] ermittelt und als Isothermengrafik veranschaulicht. Somit liefert diese Messtechnik Werte für bislang in Hochtemperaturprozessen nur theoretisch bekannte physikalische Größen: die Gastemperatur und dessen Verteilung.

**Betrieblicher Einsatz.** Die Schallpyrometrie hat seit den 80er-Jahren überwiegend in der Kraftwerks- und

Müllverbrennungstechnik Anwendung gefunden, wo sie sich zur Überwachung von kritischen Feuerungskenngrößen entsprechend der 17. BImSchV, zur Steuerung von Entstickungsanlagen sowie zur Feuerungsleistungs- und Feuerlageregelung bewährt hat [4 ... 11].

Der Einsatz der Schallpyrometrie in metallurgischen Prozessen ist bis heute lediglich an einem japanischen Hochofen bekannt geworden, wo während einer Stillstandsphase die Temperaturverteilung im Bereich des „Toten Mannes“ erfasst wurde [12; 13].

Deshalb sind zunächst grundlegende Überlegungen angestellt worden, um weitere geeignete Einsatzmöglichkeiten für dieses an sich erprobte Messverfahren in der Stahlindustrie ausfindig zu machen. Es wurde

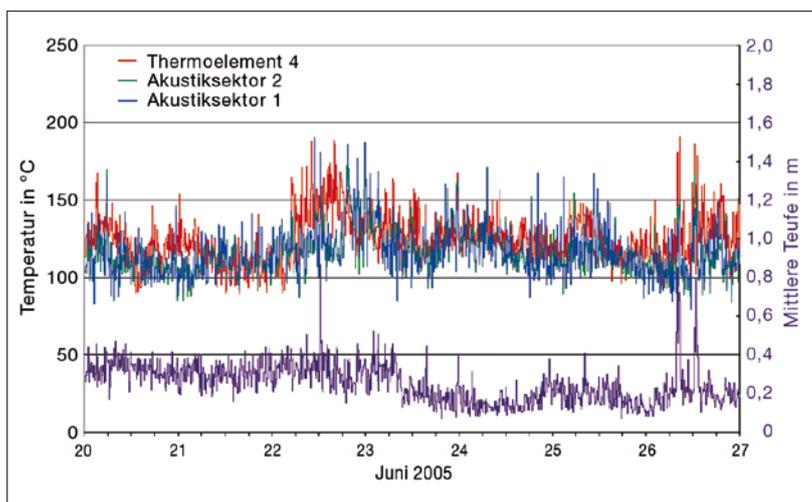
entschieden, in einem ersten Schritt die betriebliche Anwendbarkeit des neuen Messverfahrens über längere Dauer unter realen Betriebsbedingungen zu prüfen. Als besonders geeigneter Anwendungsfall wurde die Erfassung der Gastemperaturverteilung in der Gicht eines Hochofens erachtet. Bei positivem Erfolg sollten dann in einem nächsten Schritt andere Anwendungen in Angriff genommen werden.

### Anwendung am Hochofen

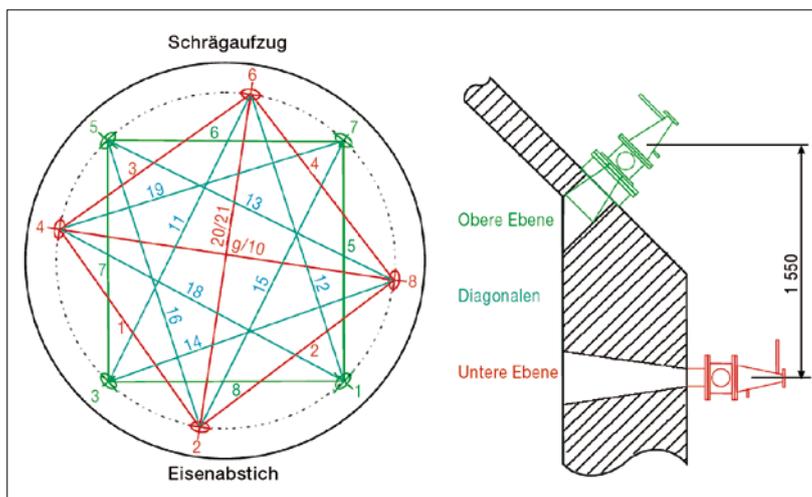
Für die Betriebsversuche wurde der Großhochofen 9 im ThyssenKrupp-Werk Hamborn ausgewählt. Dieser war von seiner Anlagentechnik im Bereich der Gicht besonders geeignet.

**Vorgänge an der Gicht.** Im Gichtraum des Hochofens befindet sich als Beschickungseinrichtung eine Drehschurre, über die gezielt Möller, bestehend aus Sinter, Pellets, Koks und verschiedenen Zuschlägen, lagenweise in den Schacht eingefüllt wird. Im Gegenstrom zu den festen Einsatzstoffen steigt Prozessgas durch die Möllersäule nach oben, tritt an der Beschickungsoberfläche, verbunden mit hohen Staubmengen, in den freien Gichtraum aus und wird dann oben im Ofenkopf über vier Steigrohre einer Sammelleitung zugeführt. Dieses Gichtgas weist im Normalfall Temperaturen von 120 bis 160 °C auf, ist mit hoher Feuchte belastet, steht unter einem Überdruck von bis zu 2 bar und setzt sich aus etwa 22 % Kohlenmonoxid, 22 % Kohlendioxid, 5 % Wasserstoff und einem beträchtlichen Rest Stickstoff zusammen.

Bei abnormalen Betriebszuständen kann es zu sogenannten „Durchbläsern“ kommen. Hierbei handelt es sich um Kaminbildungen in der Möllersäule, in denen das Prozessgas durch lokal gebildete erhöhte Gasdurchlässigkeit der Schüttung zum Teil nur unvollständig mit dem Erz reagiert. Solche Durchbläser entstehen beispielsweise durch Entmischung des Möllers bei dessen Aufgabe. Dies hat zur Folge, dass dann das Gas mit erhöhter Temperatur und fallweise sogar mit geringen Sauerstoffbestandteilen den Prozess verlässt. Die Komponenten des Gichtgases sind brennbar, sodass in Kombination mit Sauerstoff ein explosives Gemisch entstehen kann. Auch der mitgerissene kohlenstoffhaltige Staub ist in Verbindung mit Sauerstoff als explosiv anzusehen. Während der Anstieg des Sauerstoffgehaltes schnell über eine vor der Gasreinigung angeordnete Analysenstation erkannt wird, ist die Bestimmung örtlicher Gebiete mit erhöhter Gasdurchlässigkeit bzw. erhöhter Gastemperatur an der Beschickungsoberfläche problematisch. Für die mechanischen Anlagenteile der Schurre stellt der Anstieg der Gastemperatur ebenfalls eine Gefahr dar, weil eine gesicherte Funktion dann nicht immer gewährleistet ist.



3  
Verlauf der elektrisch und akustisch gemessenen Temperaturen  
Graph of the electrically and acoustically measured temperatures



4  
Endgültige Messpfadanordnung am Hochofen  
Final measuring path arrangement at the blast furnace

**Temperaturmessungen an der Gicht.** Aus den erwähnten Gründen ist die ständige Überwachung der Temperatur an der Hochofengicht unerlässlich. Dies erfolgt mithilfe von Thermoelementen, die in den vier Steigrohren installiert sind. Wegen des Messverfahrens an sich, aber auch wegen des großen Abstandes dieser Messstellen ist allerdings ein unmittelbarer Rückschluss auf die Temperaturverteilung im Bereich der Beschickungsoberfläche nicht eindeutig möglich.

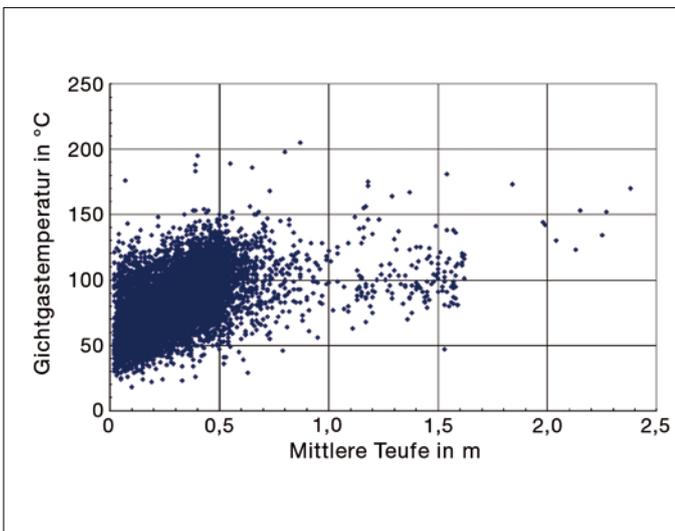
Darüber hinaus sind fallweise Messsysteme im Einsatz, um thermische Veränderungen der Beschickungsoberfläche direkt zu erfassen. Bekannt geworden sind Strahlungspyrometer mit spiralförmig bewegtem Messfleck, wobei dieser periodisch über die Beschickungsoberfläche kreist und versucht, Durchbläserbereiche über erhöhte Staubtemperaturen zu ermitteln [14]. In ähnlicher Weise arbeitet ein Infrarotgerät, das in der Lage ist, etwa 80 % der Beschickungsoberfläche im 4-Sekunden-Rhythmus abzutasten [15]. Allerdings haben diese Systeme den Nachteil, dass wegen der ständigen Verschmutzung der Optik ein sicherer Dauerbetrieb nur mit intensiver Wartung möglich ist.

Darüber hinaus sind Quermesssonden im Einsatz, die hydraulisch bewegt, etwa 3 m unter der Beschickungsoberfläche in den Möller eingefahren werden, um örtliche Temperaturen, Drücke und Gaszusammensetzungen zu erfassen [16]. Das System arbeitet relativ zuverlässig, ist jedoch wegen der Fahrmechanik sowie wegen der erosiven und korrosiven Belastungen einem hohen Verschleiß unterworfen und erfordert damit erhebliche Wartungskosten. Auch dürften die einseitig radial ermittelten Messergebnisse für einen rotationssymmetrischen Prozess nicht unbedingt als repräsentativ gelten.

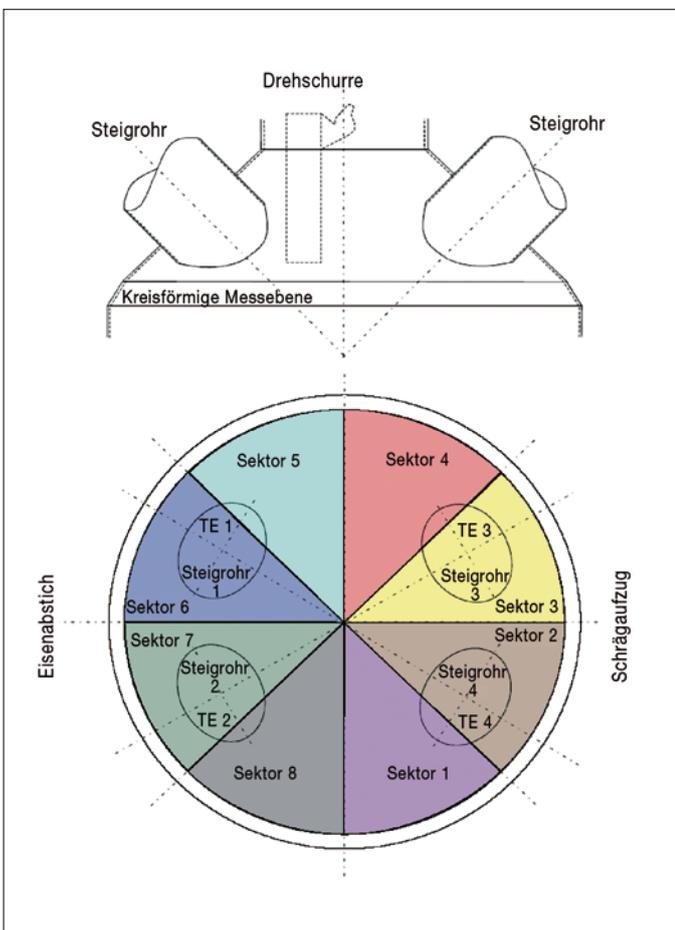
Die genannten Messsysteme zur Erkennung von Durchbläsern sind unbefriedigend, sodass hier mittels der Schallpyrometrie eine wesentliche Verbesserung erwartet werden kann.

**Durchführung von Betriebsversuchen**

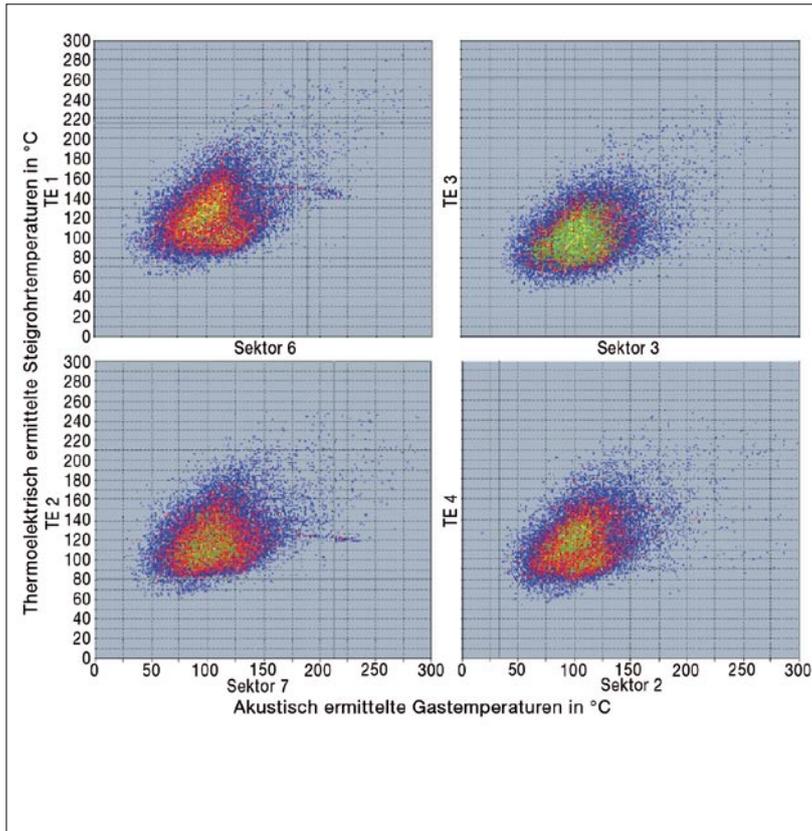
**Vorbereitende Maßnahmen.** In Tastversuchen war erst einmal die prinzipielle Einsatztauglichkeit der Schallpyrometrie als neuartige Messtechnik sowie die günstigste Lage der Messebene vor Ort in Erfahrung zu bringen. Dazu sollte zunächst lediglich ein einziges Einpfadsystem mit zwei S/E-Einheiten zur Probe an der Gicht integriert werden. Die Einbausituation ist in Bild 2 verdeutlicht. Die konischen Bohrungen durch die Ofenwände aus Stahlpanzer und Feuerfestbesatz konnten nur während eines längeren Produktionsstillstandes eingebracht werden. Dabei wurden auch die notwendigen Medienversorgungsleitungen sowie Strom- und Signalanschlüsse verlegt. Wegen der hohen Betriebsdrücke im Inneren des Hochofens sind die Schallhörner in druckfester Edelstahlausführung ausgelegt worden. Aus Gründen



5 Zusammenhang zwischen Gastemperatur und Teufe (Teufenwerte = 0 wurden unterdrückt)  
 Interrelationship between gas temperature and charge level (charge level values = 0 were suppressed)



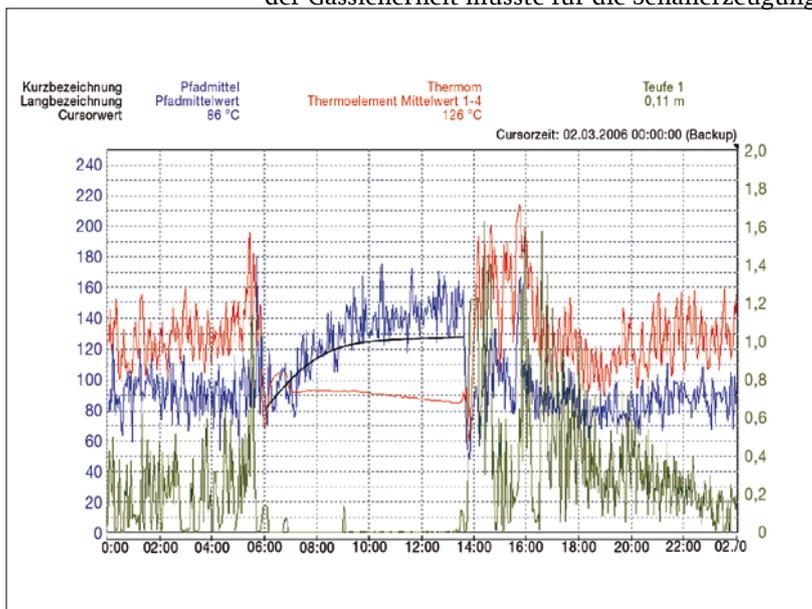
6 Anordnung der Steigrohre und Sektoren am Hochofen  
 Arrangement of the ascension pipes and sectors at the blast furnace



7

Zusammenhang zwischen Gichtgas- und Steigrohrtemperatur  
Interrelationship between blast furnace gas and ascension pipe temperature

der Gassicherheit musste für die Schallerzeugung



8

Gichtgas- und Steigrohrtemperatur sowie Teufe vor, während und nach einem Hochofenstillstand  
Blast furnace gas temperature, ascension pipe temperature and charge level before, during and after a blast furnace stand-still

ein sauerstofffreies Medium zum Einsatz gelangen. Deshalb wurde Stickstoff aus dem 14-bar-Werksnetz herangezogen.

Nach der schrittweisen Inbetriebnahme und Parametrierung des Einpfadsystems konnten die Gas-temperaturen erstmalig aufgezeichnet und einer kritischen Begutachtung unterzogen werden.

**Erkenntnisse aus den betrieblichen Tastversuchen.** Die Verläufe der Pfadtemperatur im Gichtraum im Vergleich mit den vier thermoelektrisch gemessenen Temperaturen in den Steigrohren ergeben eine weitgehende Übereinstimmung bezüglich des Temperaturniveaus, Bild 3. Tendenziell reagiert die schallpyrometrische Messung deutlich schneller auf Temperaturänderungen. Dies trotz der herrschenden staubhaltigen, feuchten, aggressiven Atmosphäre, verbunden mit ständig ändernden Strömungs-, Temperatur- und Druckschwankungen.

Bei den Messungen gab es auch längere Phasen mit ausgeprägten Temperaturspitzen, die zunächst nicht zu erklären waren. Eine weiterführende Auswertung zeigte, dass die unplausiblen Werte immer nach dem periodischen Befüllen mit Möller auftreten. Bei Teufen unter 0,5 m ist der direkte Schallweg wegen eines erhöhten Schüttprofils zeitweise versperrt, weshalb kein signifikantes Schallsignal am Empfänger erkannt werden kann. Daraufhin wurde versuchsweise die Beschickungsfläche tiefer gehalten und es zeigten sich bei Teufen über 0,5 m Temperaturverläufe ohne Ausfälle.

Aus diesen Erkenntnissen kann gefolgert werden, dass die Schallpyrometrie an der Gicht des Hochofens nur dann dauerhaft und zuverlässig arbeiten kann, wenn entweder die Beschickungsfläche auf größerer Teufe gefahren wird oder aber bei einem der nächsten Reparaturstillstände die Schalltrichter auf einer höheren Ebene neu installiert werden. Aus verschiedenen betrieblichen Gründen war während der Projektdauer eine Hochofenfahrweise mit ständig abgesenkter Möllersäule nicht möglich. Deshalb blieb als Lösung nur der nach oben versetzte Ausbau eines erweiterten akustischen Messsystems übrig.

Als weitere wichtige Erkenntnis aus den Tastversuchen ist festzuhalten, dass sich die akustische Gastemperaturmessung auch nach vielmonatigem Einsatz unter extremen Betriebsbedingungen bewährt hat. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen standen deshalb weniger die Messtechnik im Vordergrund als vielmehr die betrieblichen Restriktionen bei der Anwendung derselben. Um in diesem Zusammenhang mehr Einblick in die komplizierten wärme- und strömungstechnischen Abläufe zu erhalten, sind umfassende Betriebsuntersuchungen unabdingbar gewesen.

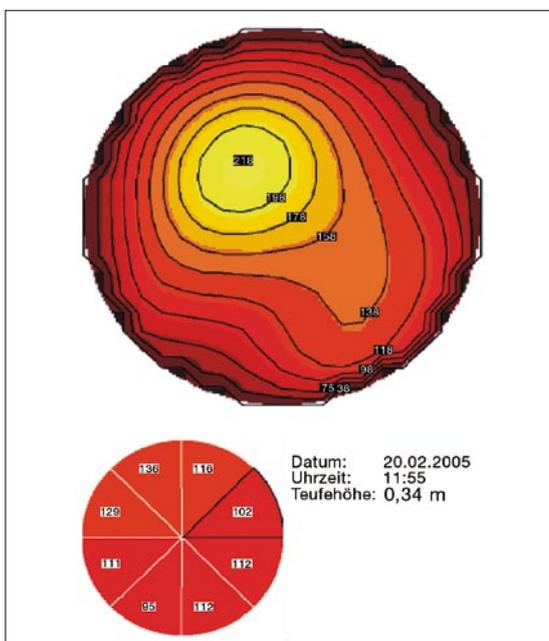
**Ergebnisse aus den betrieblichen Hauptversuchen.** Die endgültige Lage und Anordnung aller akustischen S/E-Einheiten in der Schachtwand an der Gicht des Hochofens ist aus Bild 4 ersichtlich. Zusätzlich eingetragen sind die 18 verwendbaren Messpfade, wobei die rot bzw. schwarz angelegten Linien in der unteren bzw. oberen 1 m darüber angeordneten Messebene liegen und die blauen Linien die schrägen Verbindungen zwischen beiden Ebenen darstellen. Die gegenüber dem Tastversuch wesentlich erweiterte Anzahl von S/E-Einheiten erbringt nunmehr bei jeder Schütthöhe und jedem Schüttprofil stets signifikante Schallsignale und damit eindeutige Messergebnisse. Aus der Fülle der verschiedenen Auswertungen sollen einige Ergebnisse näher herausgestellt werden.

**Teufe und Gichtgastemperatur.** Auch bei einer Hochofenfahrweise mit niedrigen Teufen werden nunmehr die Gastemperaturen ohne Störeinflüsse erfasst. In Bild 5 ist der Zusammenhang zwischen der mittleren Teufe und der mittleren Gastemperatur zu erkennen. Der ausgeprägte Punktehaufen im Teufenbereich unter 0,6 m zeigt, dass der Hochofen im Wesentlichen mit hoher Möllersäule gefahren wurde. Dadurch werden in erheblichem Maße die Abwärmeverluste des Hochofens vermindert. Des Weiteren geht aus Bild 5 hervor, dass mit Erhöhung der Teufe bzw. mit dem Absenken der Beschickungsoberfläche die Gichtgastemperatur ansteigen muss.

**Gastemperatur an der Hochofengicht.** Wie erwähnt, wird das Gichtgas aus dem Ofenkopf über Steigrohre einer Sammelleitung zugeführt. In Bild 6 ist die Anordnung der vier Steigrohre mit den installierten Thermoelementen ersichtlich. Ein Vergleich soll zeigen, inwieweit die thermoelektrisch und die thermoakustische gefundenen Messwerte tendenziell übereinstimmen. Dazu wurde der kreisförmige Ofenquerschnitt in acht identische Flächensektoren aufgeteilt und die mittlere Gichtgastemperatur für jeden Sektor berechnet. Somit bestand die Möglichkeit, die Steigrohr- und die zugeordneten Sektortemperaturen entsprechend gegenüberzustellen. Aus Bild 7 wird zunächst grundsätzlich deutlich, dass die Gastemperaturen an der Gicht bei üblicher Hochofenfahrweise zwischen 50 und 150 °C liegen. Es treten bedingt durch die diskontinuierliche Zugabe von kaltem Möller zeitweise unterschiedliche Temperaturschichtungen über der Beschickungsoberfläche auf. Alle Teilbilder zeigen: Je tiefer die Sektortemperatur ist, desto höher ist die Differenz derselben zur jeweils zugeordneten Steigrohrtemperatur. Bei höheren Sektortemperaturen stellen sich diese Differenzen nicht ein.

**Gichtgastemperatur bei Ofenstillstand.** Um Anschluss über das thermische Verhalten des Hochofens zu erhalten, wurden die mittleren Gichtgastemperaturen an der Beschickungsoberfläche und in den Steigrohren zusammen mit der Teufe vor, während und nach einem achtstündigen Stillstand erfasst. Bild 8 zeigt die Veränderungen dieser Verläufe: bei Teufen von 0 m stellen sich die Steigrohrtemperaturen auf etwa 90 °C ein, während die Pfadtemperaturen wegen der allmählich durch die Möllersäule aufsteigenden Wärme auf etwa 130 °C ansteigen. Wegen der dann höheren CO-Gehalte des Gichtgases mussten die Pfadtemperaturen entsprechend korrigiert werden (schwarze Linie).

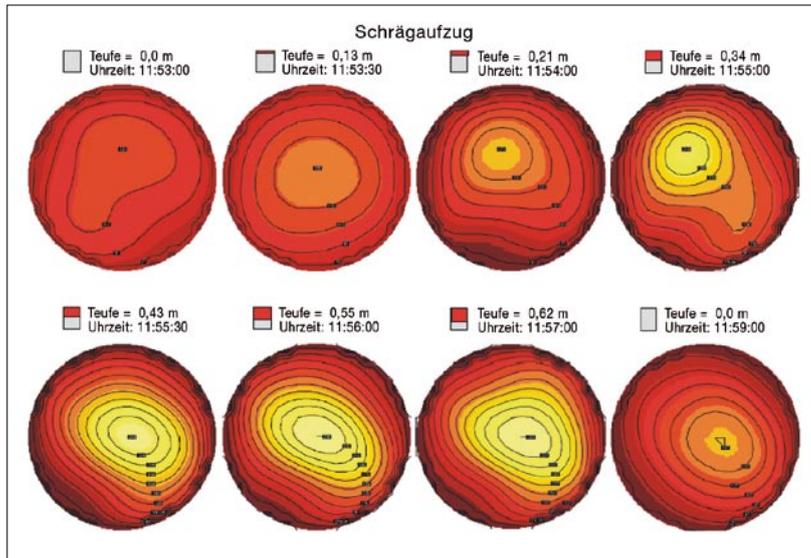
**Beobachtung der Begichtungs Oberfläche.** Aus den 18 verwendbaren mittleren Pfadtemperaturen kann die zweidimensionale Gichtgastemperaturverteilung in der Messebene berechnet werden. Bild 9 verdeutlicht ein solches Ergebnis: Oben ist das Isothermenfeld über der



9 Isothermenfeld über der Beschickungsoberfläche  
Isotherm field above the charging surface



10 Anzeige des aktuellen Isothermenfeldes in der Hochofenwarte  
Display of the current isotherm field in the furnace control station



11

Isothermenfelder über einen Begichtungszyklus  
Isotherm fields over a top-charging cycle

Begichtungsoberfläche und unten die entsprechenden flächengewichteten mittleren Sektorentemperaturen dargestellt. Unterschiedliche Farben in Verbindung mit Isothermenlinien und Zahlenangaben sollen die räumliche Temperaturverteilung optisch noch verstärken. Auf diese Weise werden Temperatur- und damit Strömungsschiefen leichter erkennbar.

Bild 10 gibt die Situation in der Hochofensteuerwarte mit der Anzeige eines aktuellen Isothermenfeldes wieder. Die Anzahl der Pfade bestimmt die Abfolge, aber auch die Güte eines solchen Bildes. Je weniger Pfade zur Auswertung herangezogen werden, desto häufiger lassen sich wohl Bilder nacheinander aber mit immer minderer Auflösung erstellen. Durch Aneinanderreihung von mehreren Isothermenbildern können die thermischen Veränderungen an der Hochofengicht am besten wiedergegeben werden.

Bild 11 zeigt, wie sich das Temperaturmaximum sowie seine Lage von einer Mölleraufgabe zur nächsten über einen Zeitraum von etwa 6 min schrittweise verändern. Systematische Auswertungen haben gezeigt, dass die Temperaturmaxima auf der Beschickungsoberfläche von Zyklus zu Zyklus bevorzugt in Hochofenmitte in Bereichen zwischen 150 und 250 °C mit einem deutlichen Schwerpunkt bei 200 °C liegen.

### Ausblick

Die akustische Gastemperaturmessung hat sich über eine Nutzungsdauer von mehr als sechs Jahren an der Gicht des Hochofens 9 bei ThyssenKrupp Steel bestens bewährt. Die zunächst zwangsläufig erforderlichen Anpassungen an die jeweiligen anlagen- und betriebsspezifischen Bedingungen waren durch

entsprechende Modifikationen am Messsystem und bei der Programmierung verhältnismäßig einfach durchführbar. Auch unter rauer Betriebsumgebung hat sich die Schallpyrometrie als weitgehend verschleißfrei und wartungsarm herausgestellt.

An der Hochofengicht werden auf diese Weise erstmalig detaillierte Einblicke in einen Prozessbereich gewährt, der bisher nur durch singuläre Messungen, Annahmen und Extrapolationen abgeschätzt werden konnte. Mittels dieser Messtechnik ist es nunmehr möglich, heiße Stellen auf der Beschickungsfläche früher zu erkennen und diese gezielter mit Möllern abzudecken, sodass Durchbläser erst gar nicht mehr entstehen können. In der Folge wird der Reduktionsmittelverbrauch niedriger und das Roheisenausbringen höher sein. Es ist geplant, den neuen Hochofen 8 ebenfalls mit einer solchen Messeinrichtung auszustatten.

Die offensichtlichen Vorteile der Thermoakustik könnten durchaus noch an anderen metallurgischen Anlagen genutzt werden, wie beispielsweise in den Kuppeln von Winderhitzern, im Durchbrandbereich von Bandsinteranlagen, im Abhitzekegel eines Oxygenstahlwerkes, in den Ausgleichszonen von Wärm- und Wärmebehandlungsöfen.

Wegen der teilweise komplexen Prozessabläufe muss dabei allerdings in jedem einzelnen Fall die optimale Lage und Anzahl der S/E-Einheiten sorgfältig geplant werden. In der Regel stellen die auf thermoakustischem Wege gefundenen Ergebnisse zusätzliche prozessspezifische Informationen dar, weshalb es fallweise sinnvoll sein kann, diese mit anderen Prozessparametern zu verknüpfen, um weitere vertiefte Erkenntnisse zur Auslegung und Betrieb des jeweiligen Prozesses zu gewinnen.

*hans-peter.domels@thyssenkrupp.com*

### Literatur

- [1] Mayer, A. M.: Philosophical Mag. 45 (1873), S. 18/22.
- [2] Deuster, M.; Hentschel, G.: Temperatur '92, VDI-Ber. 982 (1992), S. 169/77.
- [3] Sielschott, H.: Tomographie mit wenigen Daten, Diplomarbeit, Universität Münster, 1994.
- [4] Derichs, W.; Menzel, K.; Reinartz, E.: BWK 46 (1994) Nr. 6, S. 286/93.
- [5] Aydin, Y.; Glinka, U.; Voje, H.: Entsorgungspraxis (1995) Nr. 6, S. 62/66.
- [6] Schäfers, W.; Lux, P.: BWK/TÜ/Umwelt Okt. (1995).
- [7] Menke, D.: VGB Kraftwerkstechnik 75 (1995) Nr. 3, S. 200/07.
- [8] Spliethoff, H.: VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996) Nr. 7, S. 581/88.
- [9] Deuster, M.: MSR-Magazin 12 (1998) Nr. 10, S. 22/24.
- [10] Drescher, H. P.; Deuster M.: Proc. 8. Intern. Sympos. on Thermal Measurements in Industry and Science, 19. – 21. Juni 2001, [Hrsg.:] VDE Verlag Berlin und Offenbach, 2002, Vol. 2, S. 1077/82.
- [11] Thome-Kozmienski, K. J.: Energie aus Abfall, Bd. 4, TK-Verlag, Neuruppin, 2008, S. 275/93.
- [12] Ichida, M. et al.: 1. Int. Congress Science and Technology of Ironmaking, Juni 1994, Sendai, Japan, S. 278/83.
- [13] Okada, I. et al.: Rev. Met. CIT (2000), S. 722/28.
- [14] Poos, A. u. a.: stahl u. eisen 102 (1982) Nr. 3, S. 107/11.
- [15] Tonteling, P. et al.: stahl u. eisen 102 (1982) Nr. 3, S. 101/06.
- [16] Günther, G. et al.: stahl u. eisen 113 (1993) Nr. 12, S. 109/17.