

# Schaumslaggen in der Stahl-Metallurgie

Von Matjaž Juhart, Michael Peter und Klaus Koch

Die Vorteile einer gut schäumenden Schlacke bei der Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen sind unbestritten. Verminderte Wärmeverluste an die Seitenwände, verbesserter Wärmeübergang von den Lichtbögen auf das Stahlbad, verminderte Lärmemission und verminderter Elektroden- und Feuerfestverbrauch sind nur die wichtigsten Vorteile der Schaumslaggen-Fahrweise [1], [2].

## Schaumstruktur

Disperse Systeme Gas-Flüssigkeit heißen Schäume, wenn Gasblasen durch einen dünnen, flüssigen Film voneinander getrennt sind. Es können zwei Arten von Schäumen unterschieden werden: der feuchte bzw. instabile Schaum und der trockene bzw. metastabile Schaum. Der feuchte Schaum bleibt nur solange stabil, wie der Schäumprozeß abläuft. Der trockene Schaum mit wenig Flüssigkeitsanteil ist aus polyedrischen Blasen zusammengesetzt. Diese Blasen sind durch sehr dünne, ebene oder konvex bzw. konkav gekrümmte, flüssige Filme getrennt. Dabei setzt eine ebene Filmfläche identische Durchmesser der sich jeweils berührenden Blasen voraus.

Die beiden erwähnten Schaumarten unterscheiden sich im Gasanteil: in feuchten Schäumen ist er kleiner als 90 %, bei trockenen Schäumen beträgt er bis ca. 97 %. Es wurde versucht, mit Hilfe aufgeschäumter Seifenlauge (handelsüblich „Pustefix“) die Struktur von Schäumen modellartig zu veranschaulichen, **Bild 1**. Die erzielten Anordnungen sind weitgehend einlagig. Beobachtbar sind 4er- bis

7er-Koordinationen (bei ebener Betrachtung), wobei die 6er-Koordination die ideale Form darstellt. Eindrucksvoll ist, wie wenig Flüssigkeit wieviel Gas umschließen kann [2].

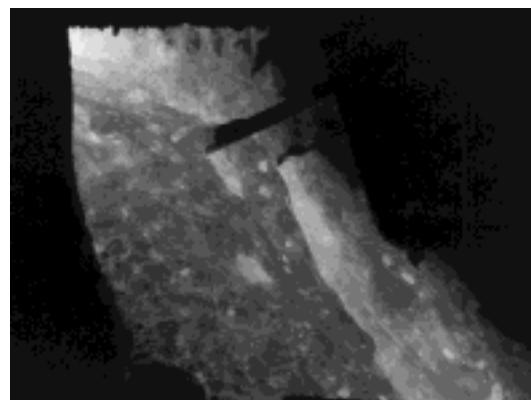
## Betriebliche Schaumslaggen

Eine im Betrieb gut schäumende Schlacke ist in **Bild 2** zu sehen [3]. Voluminös fließt die Schlacke aus der Ofentür heraus. Die Schlackenoberfläche zeigt eine „schuppige“ Struktur. Hellere Bereiche deuten dabei auf eine höhere lokale Temperatur hin; in den dunkleren Bereichen ist die Schlacke bereits partiell erstarrt. Regellos verteilt, sind kleine kreisförmige Bereiche zu erkennen, die relativ hell leuchten. An diesen Stellen sind Gasblasen aus der Schlacke aufgestiegen, womit sich der Gasgehalt insgesamt verringert. **Bild 3** zeigt eine gut aufgeschäumte Elektroschlacke nach der Erstarrung. Die deutlich polygonale „Wabenstruktur“ deutet an, daß diese Schlacke im flüssigen Zustand einen hohen Gasanteil (> 90 %) enthalten hat.

Die Schlackenwege von Betriebsschlacken [3], [4], [5] lassen sich in verschiedenen Mehrstoff-Phasendiagrammen darstellen. **Bild 4** zeigt einen Ausschnitt aus dem System  $\text{CaO-FeO}_n\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ . Die  $\text{MgO}$ -Parameterlinien für 1600 °C sind eingetragen. Dabei ist in allen drei Kurvenzügen die bekannte „ $\text{C}_2\text{S}$ -Nase“ zu sehen ( $\text{C}_2\text{S}$  =

$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). Hieran schließen sich jeweils die Ausscheidungslinien des  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  und des  $\text{CaO}$  bzw. des Magnesiowüstits an. Der mit „Beginn“ bezeichnete Punkt ist als erste schäumende Schlacke der Schäumperiode des Stahlherstellungsprozesses zu verstehen. Der weitere Schlackenweg wird gekennzeichnet durch Schlacken, die während der Schäumperiode gewonnen wurden. Dabei nähern sich die ersten vier Analysen mit einem  $\text{MgO}$ -Gehalt von ca. 3 % vom homogen-flüssigen Bereich her immer mehr der  $\text{C}_2\text{S}$ -Ausscheidungsfläche an, bleiben aber homogen-flüssig. Erst die Endprobe mit 4,8 %  $\text{MgO}$  ist bei 1600 °C nicht mehr homogen-flüssig, sondern hat die Magnesiowüstit-Ausscheidungsfläche durchstoßen. In zeitlicher Reihenfolge nehmen die  $\text{FeO}_n$ -Gehalte kontinuierlich ab. Die Schlacken „trocknen aus“ aufgrund der Reduktion.

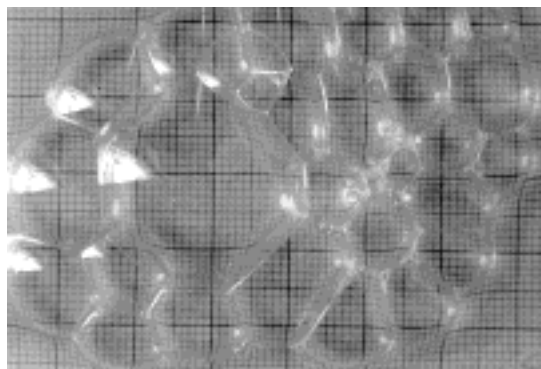
In **Bild 5a** werden die in der Nähe von Gasblasen in erstarrten Schlacken sichtbaren Erscheinungen mit Hilfe der Auflichtmikroskopie dokumentiert. Diese Schlacken stammen von der Herstellung un- bzw. niedriglegierter Stähle. In der Mitte des



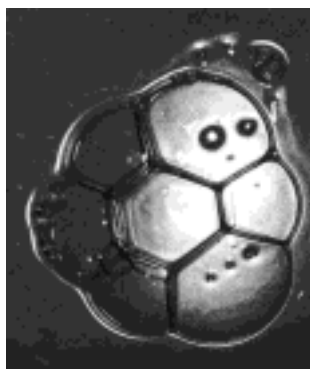
**Bild 2: Gutes Schäumverhalten einer betrieblichen Schlacke; Schlackenauslauf aus der Tür eines Elektrolichtbogenofens**

Schliffbildes ist eine nur zum Teil verfüllte Gasblase erkennbar, die von einer schmalen und kreisförmigen Kalksilikat-Phase umgeben ist. Räumlich gesehen, ist diese Gasblase demnach von einer dünnwandigen Kalksilikat-Hohlkugel umhüllt. Ferner sind im Schliffbild Reste von weiteren Kalksilikat-Sperrschichten zu erkennen.

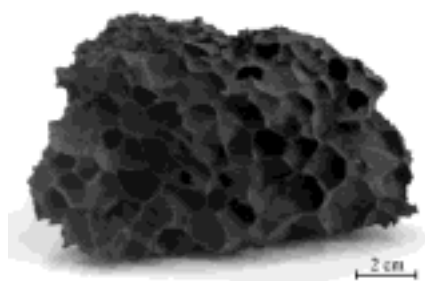
Eine mögliche Erklärung für diese Erscheinungen kann in den Vorgängen bei der Abkühlung der Schlacke gefunden werden. In einem ersten Schritt verfestigt sich hochschmelzendes Kalksilikat um die Gasblase herum. Unter der Annahme, daß dadurch die Gasblase umschlossen bleibt, bildet sich bei weiterer Abkühlung in der so entstandenen Kalksilikat-Hohlkugel ein Unterdruck. Wird dieser Unterdruck zu groß, hält die dünne Kalksilikatwandung den Belastungen nicht mehr stand. Ist um die Kugel herum noch genügend Schlacken-Schmelze vorhanden, kann sie partiell in den Hohlraum hinein gesaugt werden. Die Ausscheidungen weiterer wichtiger Phasen sind in **Bild 5b** zu sehen. ▶



**Bild 1: Modellversuche zum Aufschäumen; Struktur aufgeschäumter Seifenlauge auf einer Glasplatte**  
a) Schaum mit unterschiedlich großen Blasen



b) einlagige Blasenkonfiguration

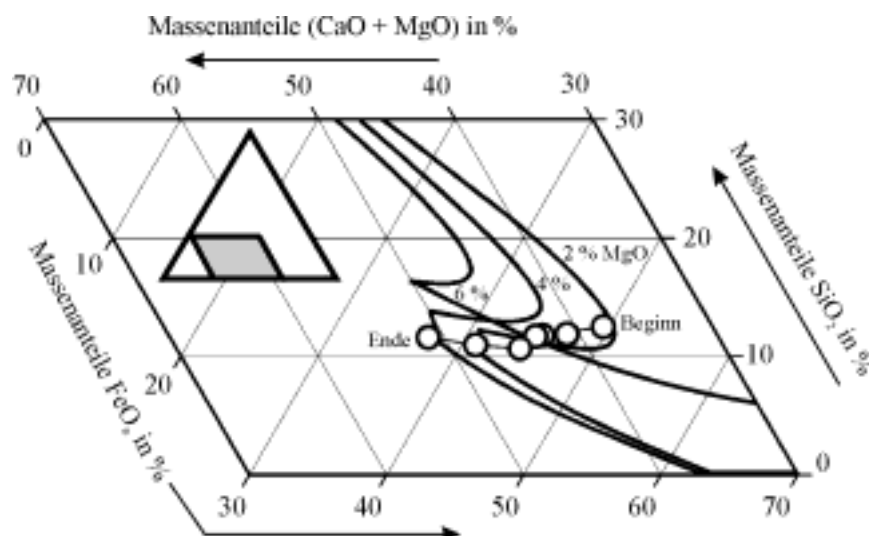


**Bild 3: Erstarre betrieblche Probe einer gut schäumenden Elektroschlacke**

Der Gasanteil der im Elektrolichtbogenofen schäumenden Schlacken ist auch untersucht worden. Dazu wurden mit einem speziellen Probenlöf-fel insgesamt 60 Schaumslagproben in der Nähe der Ofentür genommen, also dort, wo schäu-mende Schlacken aus dem Elektrolichtbogenofen herausfließen. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in **Bild 6** dargestellt. Überwiegend enthalten die Schlackenproben einen Gasanteil von 85 bis 95 %. Alle diese Werte zeigen die große Kapazität der Schlacken auf, Gas zurückzuhalten. Aufsteigende Gasblasen verlassen jedoch schon bei der Probe-nahme kontinuierlich die Schlacke, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die tatsächlichen Gasgehalte von Schaumslagproben eher noch höher anzusetzen sind.

### Laborversuche

Die Versuchsanordnung zur Ermittlung des Schäumverhaltens von betrieblich gewonnenen und synthetisch veränderten Schlacken wird in **Bild 7** schematisch dargestellt [6]. Die Schäumversuche werden bei Temperaturen von 1400 bis 1760 °C im Tammannofen mit innenliegendem Tonerde-Schutzrohr durchgeführt. Durch die waage-rechte Versuchsanordnung kann der Schäumvor-gang der Probe mittels einer Videokamera aufgezeichnet werden. Ein an die Kamera ange-schlossener Videorecorder dient zur Speicherung der Rohdaten.



**Bild 4: Schlackenweg einer exemplarisch ausgewählten betrieblichen Versuchsreihe; Darstellung im System  $\text{CaO-FeO}_n\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ ; Linien gleichen MgO-Gehaltes für 1600 °C**

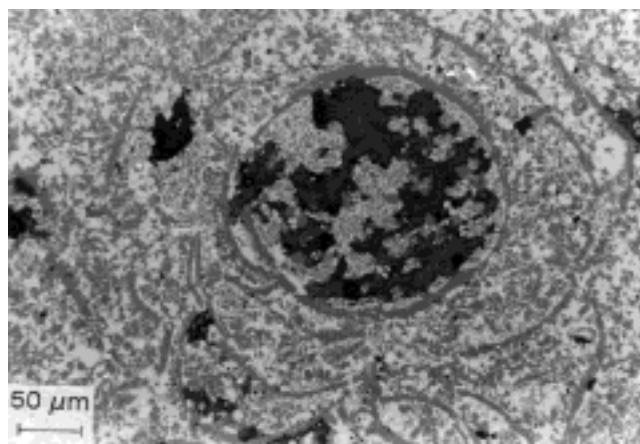
Die Weiterverarbeitung der Videoaufzeichnung kann auf zwei unterschiedlichen Wegen erfolgen. Das erste Grundprinzip beruht auf der photoelektrischen Messung von Helligkeitswerten. Die zweite Methode ist die rechnergesteuerte Bildanalyse, bei der die auf Videoband aufgezeichneten Versuche digitalisiert werden. Durch die direkte Messung der Projektionsfläche A und der Höhe h der schäumenden Probe ist das Volumen bzw. die Volumenzunahme der Probe berechenbar.

Anhand einer Probe in **Bild 8** ist der generelle Schäumvorgang dargestellt. Grundsätzlich zeigt die Sequenz die Vorgänge während eines Laborversuches. Im oberen linken Teilbild ist der dunkle Kohlenstoffiegel gerade in den auf Versuchstemperatur befindlichen Ofen eingesetzt worden. Der Tiegel selbst befindet sich auf einer Tonerde-Platte, die wiederum auf ein nach oben geöffnetes Tonerde-Halbrohr montiert ist, um das Schutzrohr des Ofens vor eventuell ausfließender Schlacke zu schützen. Diese Elemente sind auf allen Bildern der Sequenz zu sehen. Auf dem zweiten Bild der Se-

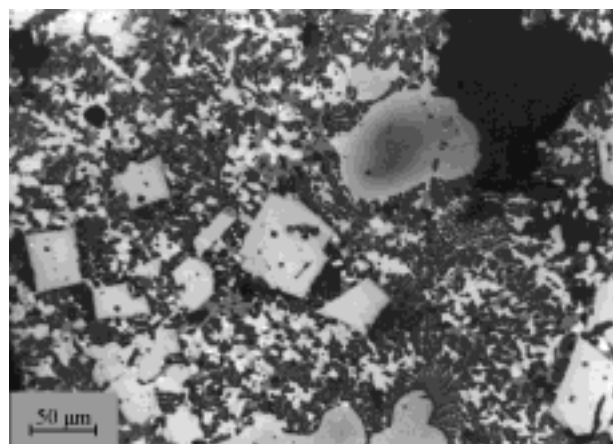
quenz hat der Aufschmelz- und Schäumvorgang bereits begonnen. Im dritten und vierten Bild ist ein scheinbar kontinuierliches Wachstum der Probe zu erkennen. Die Bilder zeigen allerdings nicht einen einzelnen Wachstumsvorgang, da die Momentaufnahmen zeitlich deutlich voneinander getrennt sind. Die eigentliche Pulsier-Frequenz der Probe ist wesentlich größer und kann bis zu 5 Hz betragen.

Der Verlauf einer so ermittelten Schäumkurve ist in **Bild 9** dargestellt. Nach dem Einsatz in den Ofen beginnt der Schäumvorgang nach ca. 90 s. Nach weiteren 4 min ist das Plateau der hohen Volumenzunahmen erreicht. Bei den Maximalwerten ist hier das Probenvolumen annähernd 14-fach vergrößert.

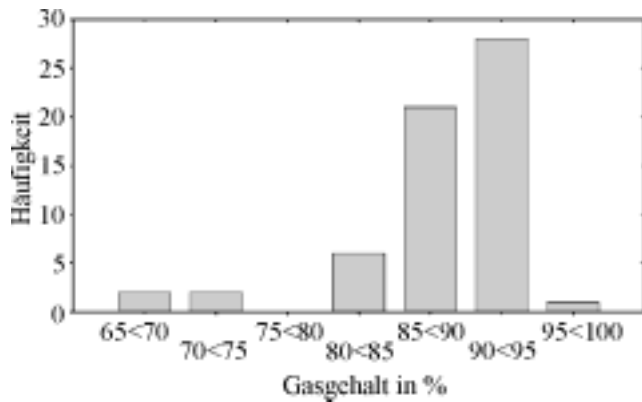
**Bild 10** zeigt die Ergebnisse einer sekundären Auswertungsmethode, nämlich Kurven der Häufigkeitsverteilung. Die einzelnen Meßwerte sind unterschiedlichen Volumenklassen zuzuordnen. So sind alle Werte einer nicht schäumenden Probe in die kleinste Volumenklasse einzuordnen. Abgesehen von diesem Anfangswert, haben die Kurven über die restlichen Klassen ein glockenähnli- ▶



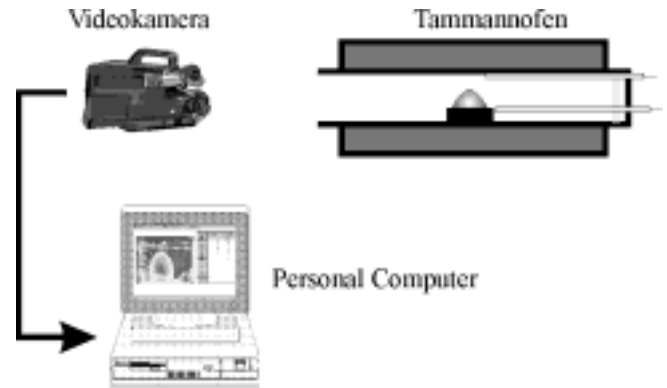
**Bild 5: Schliffbilder von erstarren betrieblchen Schlackenproben**  
a) kalksilikatische Ausscheidungen



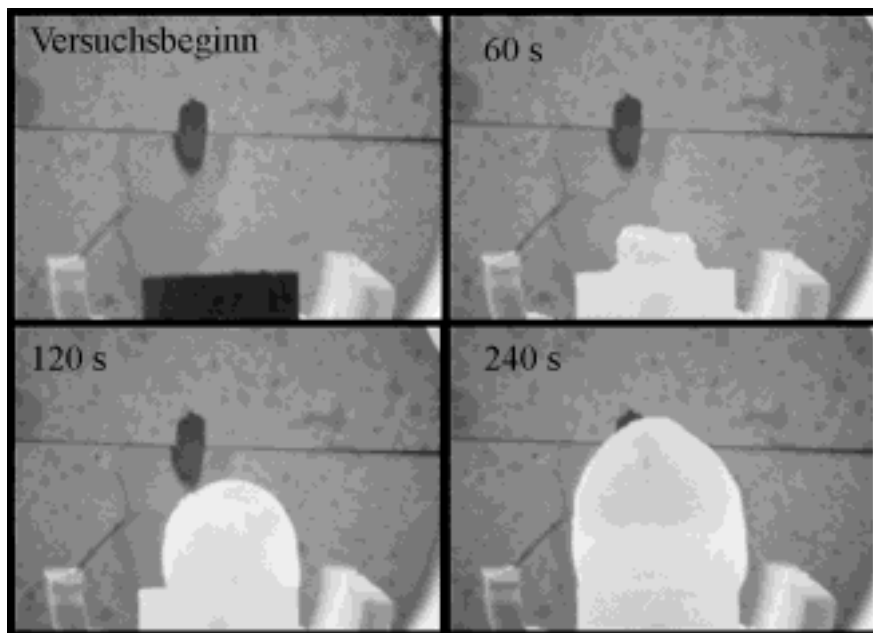
b) Ausscheidungen von zonar aufgebautem Magnesiowüstit und Chromit-Spinell



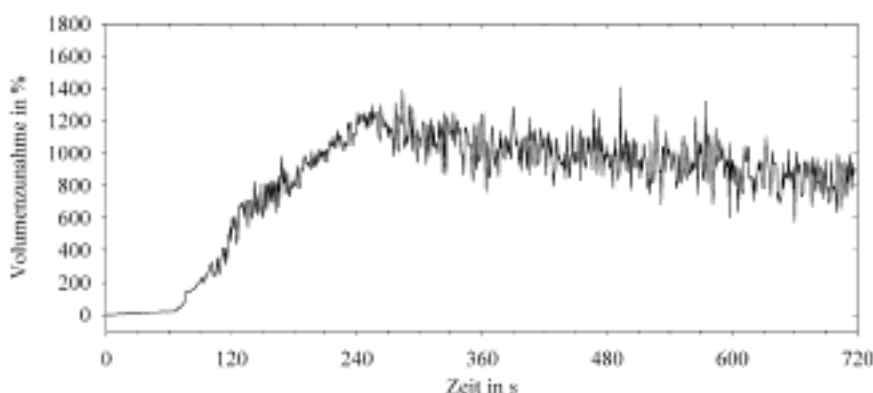
**Bild 6:** Darstellung des in betrieblichen Schaumslaggen enthaltenen Gasanteils



**Bild 7:** Versuchsanlage zur Datenerfassung und Datenauswertung



**Bild 8:** Einzelbilder eines ausgewählten Laborversuches zum Aufschäumvorgang bei 1550 °C



**Bild 9:** Schäumverhalten einer gut schäumenden Probe

ches Profil. Das Glocken-Maximum zeigt somit die am häufigsten erreichten Volumenzunahmen an. Die Endwerte dieser einzelnen Meßkurven zeigen die Größenklasse an, in der – neben eventuell dort vorhandenen weiteren Meßwerten – auch die maximale Volumenzunahme zu finden ist. Die mittlere Volumenzunahme der Schäumproben steigt von 500–800 % bei 1450 °C auf 1400–1600 % bei 1550 °C. Beim weiteren Anstieg der Temperatur auf 1650 °C nimmt sie wieder auf Werte um 800–900 % ab. Dies gilt auch bezüglich der maximalen Volumenzunahme.

### Zusammenfassung

Das Schäumverhalten von Prozeß-Schlacken des Elektrolichtbogenofens wird im Betriebs- und im Labormaßstab untersucht. Mit Hilfe der Bildanalyse digitalisierter Videoaufzeichnungen kann das Schäumen von Schlacken quantifiziert werden. Die gemessenen Schäumvolumina sind dabei von der Schlackenzusammensetzung und der Versuchstemperatur abhängig. Unter 1400 °C sind zumeist die untersuchten betrieblichen Proben fest. Im Temperaturintervall von 1450 bis 1550 °C kann sich das Schäumvolumen vergrößern. Bei weiterer Erhöhung der Versuchstemperatur werden meistens die Volumenzunahmen aufgrund des schlechteren Gasrückhaltevermögens wieder geringer. Die Analysen von gut schäumenden, betrieblichen Schlacken sind entweder der Dikalziumsilikat- oder der Magnesiowüstite-Ausscheidungsfläche zuzuordnen. Betriebsmessungen bestimmen den Gasgehalt von Schaumslaggen. Fast alle Proben haben einen Gasanteil von über 85 %.

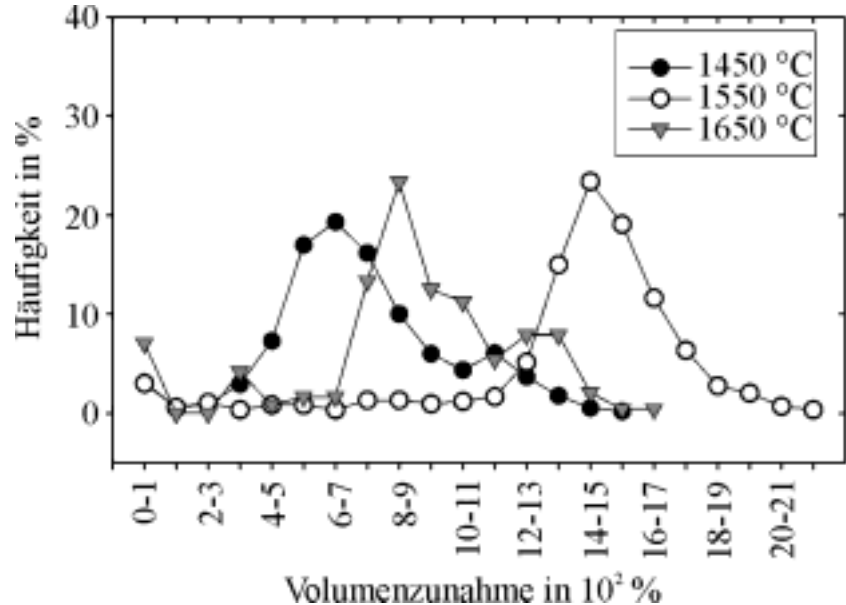
### LITERATUR

- [1] Peter, M.: Untersuchungen zum Schäumverhalten von Schlacken des Elektrolichtbogenofen-Prozesses. Dr.-Ing.-Diss., TU Clausthal (1999)
- [2] Juhart, M.: Schaumslaggen der Elektrostahlerzeugung und der Sekundärmetallurgie. Dr.-Ing.-Diss., TU Clausthal (2000)
- [3] Peter, M.; Koch, K.; Lamut, J.; Juhart, M.: Schäumverhalten von Schlacken des

*Elektrolichtbogenofen-Prozesses. Stahl u. Eisen 119 (1999) Nr. 10, S. 71–79*

- [4] Juhart, M.; Peter, M.; Koch, K.; Lamut, J.; Rozman, A.: Schäumverhalten von Schlacken aus der Produktion chromhaltiger Stähle im Elektrolichtbogenofen. *Stahl u. Eisen 121 (2001) Nr. 9, S. 35–41*
- [5] Juhart, M.; Koch, K.; Lamut, J.: Schäumverhalten von Schlacken der Sekundärmetallurgie. *Berg- u. Hüttenm. Monatshefte 146 (2001) Nr. 11, S. 439–444*
- [6] Juhart, M.; Peter, M.; Koch, K.; Lamut, J.: Picture Analysing Method of Slag Foaming Behaviour. *Steel Research 72 (2001) No. 3, p. 81–85*

Dr.-Ing. Matjaž Juhart  
 Dr.-Ing. Michael Peter  
 Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Koch  
 Institut für Metallurgie  
 Robert-Koch-Straße 42  
 38678 Clausthal-Zellerfeld  
 Tel.: 0 53 23-72-22 57  
 Fax: 0 53 23-72-31 84



**Bild 10: Häufigkeitsverteilungen von Volumenzunahmen für drei verschiedene Versuchstemperaturen**