

faktor zu sehen. Somit gibt es kein „Ökologie versus Ökonomie“.

Der Produktionsfaktor Umwelt muss in die Entscheidungsfindung bei der Wahl der Verfahren einbezogen werden. Dies ist für die Sektoren Energie und Metallurgie wichtig, insbesondere im Hinblick auf Restriktionen von CO₂-Ausstoß.

Entwicklungen in der Umwelttechnik in den kommenden 50 Jahren lassen einen Anstieg des Anteils der erneuerbaren Energie in der Gesamtenergie erwarten.

Der Anteil der Umwelttechnik in Systemen der Volkswirtschaft wird ansteigen. Es wird eine Vorschau für die Slowakei versucht.

Literaturverzeichnis

¹ Smith, A.: Der Wohlstand der Nationen. Übersetzt und herausgegeben von H.C. Recktenwald, dtv, München 1988. – ² Hoffmann, F.: Entwicklungen der Organisationsforschung. Gabler, Wiesbaden 1976. – ³ Weingarten, P.: Zusammenfassende Übersicht über Motivationstheorien. In: Die außerökono-

mischen Aspekte der Arbeitsmarktpolitik. Eigenverlag, Institut für Sozialforschung (IFES), Wien 1979. – ⁴ Carson, R.: Der stumme Frühling. C. H. Beck, München. – ⁵ Brown, L. B.: Umweltschutz und Wirtschaftswachstum. Vortrag vor dem 88. Forum Schwarzenbergplatz Wien/Forum CA Wien vom 8. Oktober 1999. Veröffentlicht in Conturen Nr. 1/2000, S. 5–15. Verlag Frankfurter Allgemeine Zeitung. – ⁶ Kondratjew, N. D.: In: Vasko, T. (Hrsg.): The long-wave debate. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokyo 1987. – ⁷ Wiesinger, H.: Bewertung der Wasserstoffschmelzreduktion zur Stahlerzeugung. Dissertation, Montanuniversität Leoben, Mai 2000. – ⁸ Philipp, J. A.: Stahl und Eisen 120 (2000), H. 4, S. 43–51. – ⁹ Gruber, K. H.: Zur methodischen Auswahl von Emissionsverminderungsmaßnahmen. Physic, Heidelberg 1991, S. 99. – ¹⁰ Siemens/Standpunkte 1994. Strom Basiswissen 104, Frankfurt/Main. – ¹¹ Gruber, A. und N. Nakicenovic: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 46 (1966), H. 5, S. 304. – ¹² Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR): Entwicklungstendenzen, Ausgabe 3/2000. – ¹³ ASE: Wachstum des Fotovoltaikmarktes 5 (2000). – ¹⁴ Neuhold, C.: High Tech, Das Zukunftsmagazin von Siemens Österreich 3 (2000), S. 49–55. ¹⁵ Haar, F.: Vorlesungsunterlagen „Energiewirtschaft“, Karl-Franzens-Universität Graz.

Verfolgung des Stickstoffgehaltes im LD-Stahlwerk bei der Erzeugung einzelner Stahlsorten

W. Höfer, H. Preßlinger und Ch. Bernhard

Literaturübersicht über die Stickstoffveränderung bei der LD-Stahlherstellung – Versuchsdurchführung und Probenahme – Veränderung des Stickstoffgehaltes im Konverter beim Frischen und Abstich, bei der Pfannen- und Vakuumbehandlung sowie beim Stranggießen

Analysis of Nitrogen Content during Production of Several Steel Grades in the BOF-Steel Plant. Summary of publications about nitrogen change during BOF-steelmaking – Series of experiments and sampling – Change of nitrogen during blowing in the converter, tapping, ladle treatment, vacuum treatment and continuous casting

1. Einleitung

Die Stahleigenschaften hängen neben der angewendeten Walztechnik auch von den Erschmelzungsbedingungen ab. Diese bestimmen den Reinheitsgrad und die Legierungs- und Spurenelementanteile im Stahl. Eines dieser Elemente ist der Stickstoff. In „Ultra-low-carbon“-Stahlsorten (ULC) führt zum Beispiel ein höherer Stickstoffgehalt, der interstitiell gelöst ist, zu einer Verfestigung bzw. Verringerung der Tiefziehfähigkeit. Daher muss Titan als Karbid- und Nitridbildner zulegiert werden, um den Stickstoff und den Kohlenstoff abzubinden. Höhere Stickstoffgehalte führen zu einem höheren Legierungsmittelverbrauch, verschlechtern aber auch durch die Nitridbildung den Reinheitsgrad. Die Nitride wiederum sind Keime für Sulfide und Oxisulfide¹.

Dipl.-Ing. Wolfgang Höfer, Univ.-Doz. Dipl.-Ing.Dr. mont. Hubert Preßlinger, beide VOEST-ALPINE STAHL LINZ GmbH, Postfach 3, A-4031 Linz/Österreich; Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Bernhard, Institut für Eisenhüttenkunde, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben/Österreich.

2. Auswirkung der Verfahrenstechnik auf den Stickstoffgehalt im Stahl

In modernen Stahlwerken erfolgt die Erschmelzung von Rohstahl in verschiedenen metallurgischen Aggregaten. In der Literatur werden zum Verhalten des Stickstoffs in den einzelnen Prozessstufen eines Konverterstahlwerks folgende Angaben gemacht: Für das Stickstoffeinbringen gilt neben dem Stickstoffgehalt des Roheisens^{2,3-7} und dem Stickstoffgehalt des Schrotts^{3,6,8-11} als besondere Stickstoffquelle der Stickstoffgehalt des Bodenspülgases^{2,3}, d. h. der Umschaltzeitpunkt der Bodenspülung von Stickstoff auf Argon. Beispiele für das Stickstoffeinbringen in Abhängigkeit der Umschaltzeitpunkte sind in Abb. 1 und 2 zusammengestellt. Beträgt der Eintrag für die Herstellung der Stahlsorte St12 bei einem Umschaltzeitpunkt von Stickstoff auf Argon nach 75 % der Blasezeit ca. 80 kg Stickstoff, davon ca. 70 kg durch das Bodenspülen, so ist bei 100 % Spülen mit Stickstoff das Stickstoffeinbringen 120 kg (Abb. 1). Ein ähnliches Ergebnis ist bei der Stahlsorte St52 zu erwarten (Abb. 2).

Für den durch den Blaseprozess beeinflussbaren Stickstoffgehalt werden als weitere Einflussgrößen die

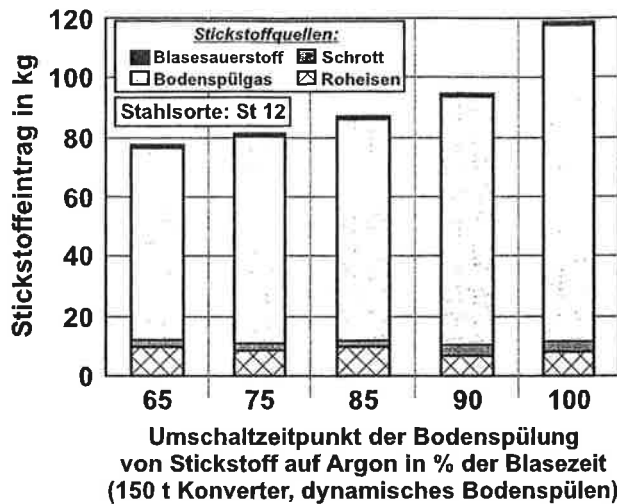


Abb. 1. Stickstoffeintrag im Konverter bei der Versuchsserie St12

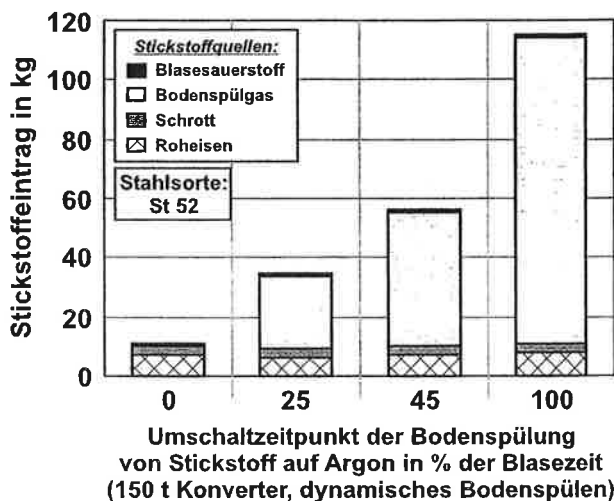


Abb. 2. Stickstoffeintrag im Konverter bei der Versuchsserie St52

oberflächenaktiven Elemente Sauerstoff und Schwefel^{7, 12-14}, die Zielkohlenstoffgehalte^{3, 4, 7} sowie die Konvertergeometrie^{9, 10} beschrieben. Einen geringen Einfluss haben der Stickstoffgehalt des Blasesauerstoffs^{2, 3, 5, 6, 8} (heutzutage üblicherweise unter 0,01 Vol-%) und die Roheisenzusammensetzung^{8, 9}. Ist nach dem Hauptblasen eine Nachblasbehandlung notwendig (z. B. wegen zu geringer Blasendtemperatur), so übt diese wiederum einen großen Einfluss auf den Stickstoffgehalt im Rohstahl aus, es kommt zu einer merklichen Aufstickung^{5, 6, 9, 15}.

In den dem Frischen nachfolgenden Prozessstufen der Stahlherstellung (Abstich^{6, 10, 15}, Sekundärmetallurgie^{5, 13-20}, Stranggießen^{5, 15, 21}) ist die Möglichkeit zu einem Abbau von Stickstoff beschränkt. Eine Entstickung der Stahlschmelze ist nur über eine Vakuumbehandlung bzw. eine intensive Spülbehandlung mit Argon bei Stahlsorten mit niedrigsten Sauerstoff- und Schwefelgehalten erreichbar. Umso wichtiger ist es daher, den Stickstoffverlauf bei der Erschmelzung der jeweiligen Stahlsorte in Abhängigkeit von den einzelnen metallurgischen Behandlungsschritten zu kennen.

3. Versuchsdurchführung und Beprobung

Die VOEST-ALPINE STAHL LINZ GmbH ist ein Flachstahlproduzent, dessen Leistungsprogramm warm- und kaltgewalzte Stahlprodukte mit zunehmenden Anteilen an metallisch und organisch beschichteten Bändern umfasst.

Das Erzeugungsprogramm ist in Abb. 3 in fünf Gruppen zusammengefasst. Als Sondertiefziehgüten werden ULC-Stahlsorten (IF-Stahlsorten), als Tiefziehgüten niedriggekohte Stähle mit besonderen Anforderungen an den Reinheitsgrad bezeichnet. Beide Stahlsorten weisen zusammen 56 % der Gesamterzeugung in Linz aus. Die höhergekohten Baustähle betragen 27 % und die Röhrenstähle 12 %. Die restlichen 5 % sind Stahlsorten wie z. B. Elektrobleche und Kohlenstoffstähle.

Die Erzeugungsrouten der vier wichtigsten Stahlgruppen sind in Abb. 4 ausgewiesen. In Linz werden derzeit folgende metallurgische Aggregate eingesetzt: drei LD-Konverter (je 150 t), zwei Pfannenöfen, ein Konditionierstand, zwei RH-Anlagen sowie drei Stranggießanlagen. Die ULC-Stahlsorten werden in der RH-Anlage geheizt, entkohlt und feinlegiert. Die Tiefziehqualitäten werden im Pfannenofen geheizt und legiert, genauso wie die höhergekohten Baustähle, die zusätzlich je nach Anforderung entschwefelt werden. Bei den Röhrenstählen ist eine Behandlung in beiden sekundärmetallurgischen Aggregaten notwendig; im Pfannenofen erfolgt eine Ca-Behandlung zum Entschwefeln und an der RH-Anlage das Entgasen von Stickstoff und Wasserstoff.

Zur Verfolgung des Stickstoffgehalts über die einzelnen Prozessstufen der Stahlherstellung wurden Sondertiefziehgüten, Tiefziehgüten und höhergekohte Baustähle (St37 und St52) untersucht. Die geforderten Zielanalysen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Für jede dieser Stahlsorten wurden jeweils mindestens zwanzig Schmelzen verfolgt, die Beprobungsliste ist in Tabelle 2

Tabelle 1. Zielanalysen der einzelnen Stahlsorten (Angaben in Masse-%)

Element	Stahlsorte			
	ULC	St12	St37	St52
C	max. 0,0040	0,035–0,050	0,08–0,10	0,16–0,18
Si	max. 0,020	max. 0,020	max. 0,030	max. 0,030
Mn	0,10–0,17	0,17–0,25	0,45–0,55	1,45–1,55
P	max. 0,008	max. 0,012	max. 0,018	max. 0,015
S	max. 0,010	max. 0,015	max. 0,015	max. 0,007
Al	0,020–0,045	0,035–0,050	0,025–0,050	0,025–0,050
V	max. 0,010	max. 0,005	max. 0,010	max. 0,020
Nb	max. 0,004	max. 0,004	max. 0,008	0,008–0,012
Ti	0,060–0,095	max. 0,005	max. 0,020	max. 0,020
N	max. 0,0035	0,0035–0,0050	max. 0,0050	max. 0,0080

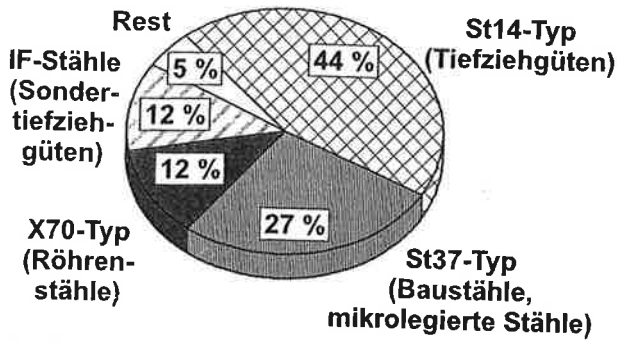


Abb. 3. Erzeugungsprogramm der VOEST-ALPINE STAHL LINZ GmbH (fünf Gruppen)

Produkt Mix 1998	IF-Stähle	St 14-Typ	St 37-Typ	X 70-Typ
Metall. Aggregate	12 %	44 %	27 %	12 %
LD-Konverter	□	□	□	□
Pfannenofen	×	×	×	×
RH-Anlage	△	△	△	△
CC4	↓	↓	↓	↓
CC5	↓	↓	↓	↓
● Heizen ▣ Entschwefelung △ Entkohlung × Legieren ▼ Entgasung ◆ Vergießen				

Abb. 4. Erzeugungsrouten der vier wichtigsten Stahlsorten

ersichtlich. Die Bestimmung des Gesamtstickstoffgehalts der einzelnen Proben erfolgte im Stahlwerkslabor mittels Vakuumschmelzextraktion und Trägergastechnik (Detektion mit Hilfe einer Wärmeleitfähigkeitsmesszelle), als Analysenprobe können sowohl durch Fräsen oder Bohren gewonnene Späne als auch kompakte Stücke dienen. Die Richtigkeit der Analysenergebnisse ist in hohem Maße von der Verfügbarkeit und problemgerechten Anwendung von Referenzproben abhängig. Diese werden im Schnelllabor der VASL nach ISO 14284 und der internen Arbeitsanleitung SFC 1/S-19 (Herstellung interner Standardproben) selbst angefertigt.

Tabelle 2. Beprobungsliste

Probenbezeichnung	Kurzzeichen
Roheisenprobe	RE
Blasendprobe (nach dem Hauptblasen) vor dem Abstich (bei Nachbehandlung im Tiegel, z. B. Nachblasen)	VP1
nach dem Abstich (Pfannenprobe vor der sekundärmetallurg. Behandlung)	VP2
Pfannenprobe nach dem Behandlungsende (Pfannenofen, RH-Anlage)	PF1
Pfannenprobe nach einer ev. zweiten sekundärmetallurgischen Behandlung	PF2
Kokillenprobe nach 10 Gießminuten	PF3
Kokillenprobe nach 20 Gießminuten	KP1
Brammenprobe	KP2
	BR

4. Untersuchungsergebnisse über den Stickstoffverlauf bei der LD-Stahlerzeugung

Die Auswertung der technischen Betriebsdaten der beprobten Schmelzen erfolgte mit Hilfe der Methode der multiplen Regression. Es soll darauf hingewiesen werden, dass alle Verfahren der Regression konzeptionellen Beschränkungen unterliegen, d. h. man kann nur Beziehungen feststellen, sich aber nicht über die zugrunde liegenden Mechanismen sicher sein. Daher ist es wichtig, sich schon zu Beginn der Regressionsanalyse mit Quereinflussungen auseinanderzusetzen, um unerwünschte Verfälschungen des Resultats eingrenzen zu können. Weiters sollten Multikollinearitäten (wie z. B. bei redundanten Variablen) unbedingt vermieden werden.

4.1 Frischen im Konverter

Der Verlauf des Stickstoffgehalts bei der Herstellung der vier ausgewählten Stahlsorten ist in Abb. 5 dargestellt. Je nach geforderter Zielanalyse für den Stickstoffgehalt (Tabelle 1) muss bereits im LD-Konverter die Ausgangsbasis zur Einhaltung dieses Grenzwertes geschaffen werden, da dieses Aggregat über den gesamten Stahlherstellungsprozess gesehen den Hauptteil der Entstickungsarbeit leistet. Die mit Hilfe einer Multiregressionsanalyse ermittelten Einflussgrößen im Konverter sind:

- der Umschaltzeitpunkt der Bodenspülung von Stickstoff auf Argon (UZP),
- die relative Tiegelhaltbarkeit (THBK – Verhältnis Schmelzbadoberfläche zu Badtiefe),
- der spezifische Schrottsatz (S) und
- der Stickstoffgehalt im Roheisen (nur geringes Bestimmtheitsmaß).

Das Ergebnis der multiplen linearen Regression lautet:

$$[N]_{BE} = 14,7 + 0,222 \text{ UZP} [\%] - 0,066 \text{ THBK} [\%] + 0,0075 \text{ S} [\text{kg/t RSt}] \quad (1)$$

und ist in 10^{-4} Masse-% angegeben, das Bestimmtheitsmaß der Gl. (1) beträgt 71,2%. Aus den Versuchsdaten geht hervor, dass Stickstoffgehalte von ca. $13 \cdot 10^{-4}$ Masse-% nach dem Hauptblasen erreicht werden können. Die Untersuchung hinsichtlich der in der Literatur angeführten Einflussgrößen (wie z. B. der oberflächenaktiven Elemente Sauerstoff und Schwefel) erbrachte keine bewertbaren Ergebnisse.

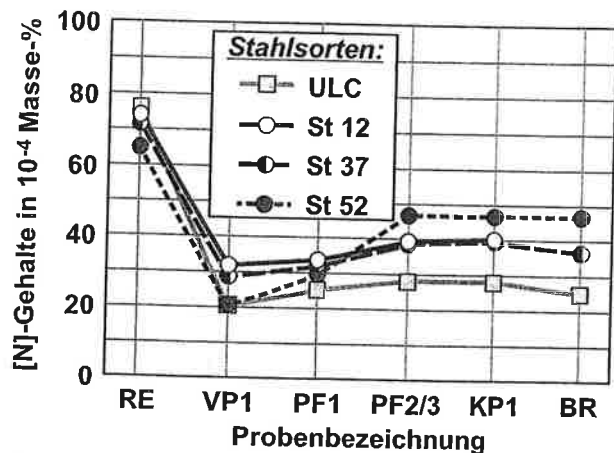


Abb. 5. Verlauf der Stickstoffgehalte bei der Herstellung der einzelnen Stahlsorten

4.2 Nachblasen im Konverter

Der schon seit langem bekannte Einfluss des Nachblasens auf den Stickstoffgehalt im Rohstahl konnte bestätigt werden, wobei als wichtigste Einflussgröße der Kohlenstoffgehalt vor dem Nachblasen ermittelt wurde. Abbildung 6 zeigt die unterschiedlichen Stickstoffverläufe bei der Stahlsorte ULC mit oder ohne Nachblasen. Es ergibt sich daraus die Bedingung, dass bei der Herstellung von Stählen mit Zielstickstoffgehalten unter $35 \cdot 10^{-4}$ Masse-% ein Nachblasen unbedingt zu vermeiden ist, da sonst die obere Toleranzgrenze für den Stickstoffgehalt nicht mehr eingehalten werden kann.

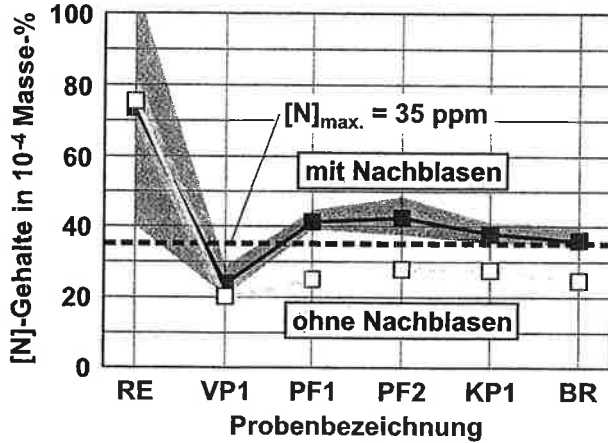


Abb. 6. Verlauf des Stickstoffgehaltes bei der Herstellung der Stahlsorte ULC

4.3 Abstich

Während des Abstichs wird Stickstoff einerseits durch die Zugabemittel (siehe Tabelle 3) eingebracht, andererseits kann durch den Abstichstrahl Luft in die Schmelze eingespült werden. Je nach Art und Menge der zugegebenen Aufkohlungs-, Desoxidations- und Legierungsmittel, die wiederum von der zu erzeugenden Stahlsorte abhängen, ergibt sich die Gesamtaufstickung beim Abstich. Abbildung 7 gibt dazu einen Überblick der Stickstoffbilanzen der einzelnen Versuchsserien beim Abstich. Einen geringen Einfluss auf den Stickstoffgehalt üben dabei die Abstichtemperatur und die Abstichgeschwindigkeit aus. Weitere, aus der Literatur bekannte Einflussgrößen wie z. B. der Zugabezeitpunkt der Des-

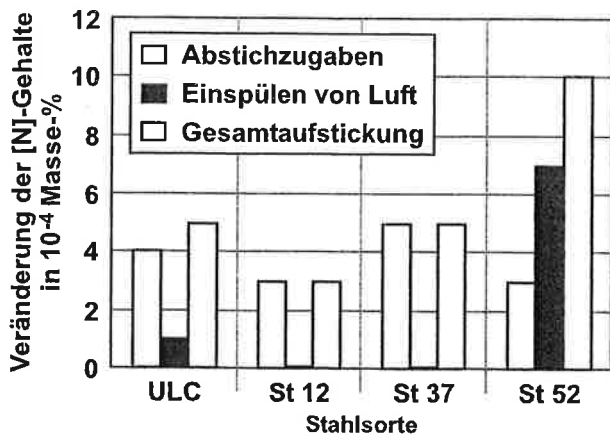


Abb. 7. Stickstoffbilanzen beim Abstich

Tabelle 3. Stickstoffgehalt der einzelnen Legierungsmittel

Zugabeart	Legierungsmittelbezeichnung	N-Gehalt in Masse-%
Abstich	Al-Granalien	0,001
	Aufkohlungsmittel 95-98 (HWR)	1,100
	FeMn 76 ma 100 mm	0,022
	SiMn 72 ma 100 mm	0,001
Pfannenofen	Al-Draht	0,001
	Carbon 98 (Carbur GG)	0,820
	FeMn aff 85 ma 100 mm	0,027
	FeNbTa Nb 60	0,053
	FeSi Granulat	0,010
	FeSi 78 ma 100 mm	0,001
RH-Anlage	Ca-Carbid	0,130
	FeTi 72	0,540
	FeMn suraff < P	0,054

oxidationsmittel, die Art des Abstichs (beruhigt/unberuhigt), konnten nicht festgestellt werden.

4.4 Pfannenbehandlung

Die Stickstoffbilanzen der Versuchsserien in der Sekundärmetallurgie zeigt Abb. 8. Einerseits wird Stickstoff durch Legierungsmittel eingebracht, andererseits spielt die Art der sekundärmetallurgischen Behandlung eine große Rolle. Bei der Pfannenbehandlung sind dies die Art des verwendeten Bodenspülgases (Stickstoff oder Argon), wie Abb. 9 für die Versuchsserie St12 zeigt, und die Entschwefelungsbehandlung (Einblasen von Calciumcarbid mit Argon als Trägergas) bei der Versuchsserie St52, einen geringen Einfluss übt der Schwefelge-

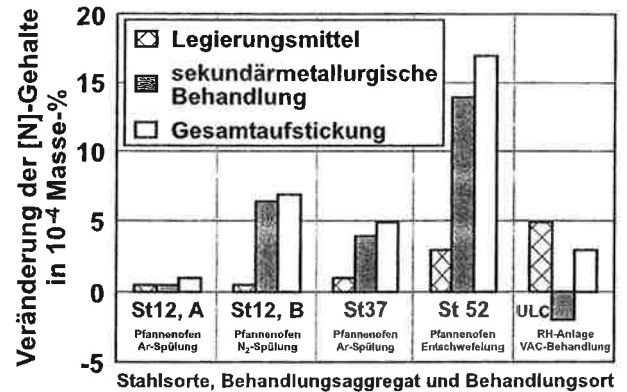


Abb. 8. Stickstoffbilanzen in der Sekundärmetallurgie

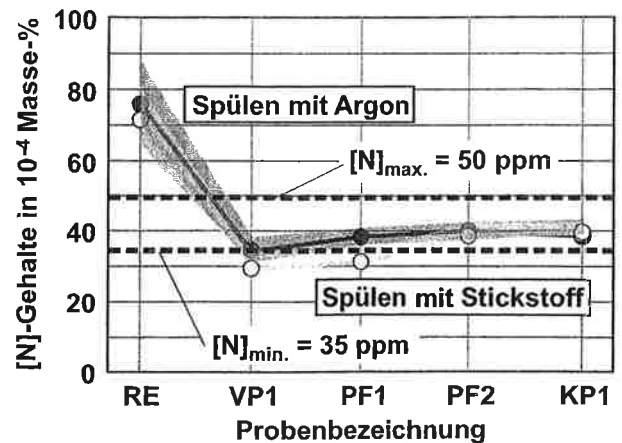


Abb. 9. Verlauf des Stickstoffgehaltes bei der Herstellung der Stahlsorte St12

halt zu Beginn der Behandlung aus. Bei der Entschwefelungsbehandlung selbst konnten als Einflussgrößen deren Dauer (korreliert mit der Zugabemenge an Calciumcarbid) sowie die Zugabemengen an FeNbTa und Aufkohlungsmitteln festgestellt werden.

4.5 Vakuumbehandlung

Wie aus der Literatur²² bekannt, ist die Entstickungswirkung einer Vakuumbehandlung an einer RH-Anlage bei bereits niedrigen Anfangsstickstoffgehalten gering, die Versuchsdaten belegen diese Aussage. Der Grund für die bei der Versuchsserie ULC stattfindende Aufstickung liegt in der Zugabe von FeTi, das einen relativ hohen Stickstoffgehalt besitzt. Dadurch wird wesentlich mehr Stickstoff in den Rohstahl eingebracht, als durch die Vakuumbehandlung wieder entfernt wird. Weitere bekannte Einflussgrößen, wie z. B. die Schwefel- oder Kohlenstoffgehalte zu Beginn der Vakuumbehandlung, sind nur gering oder konnten nicht festgestellt werden.

4.6 Stranggießen

Nach der Einstellung der gewünschten Stickstoffgehalte während der sekundärmetallurgischen Behandlung sollte beim anschließenden Vergießen des Stahls keine Veränderung mehr stattfinden. Eine Stickstoffaufnahme während des Stranggießens kann nur durch Luftzutritt zur Schmelze erfolgen. Durch die Entwicklung geeigneter Maßnahmen zum luftdichten Vergießen von der Pfanne in den Verteiler und vom Verteiler in die Kokille kann ein Luftzutritt zur Schmelze während des stationären Gießprozesses heute ausgeschlossen werden⁶.

Die ermittelten Stickstoffverläufe der einzelnen Stahlsorten an der Stranggießanlage zeigen keine größeren Zu- oder Abnahmen der Stickstoffgehalte, d. h., diese verhält sich in Bezug auf den Stickstoffgehalt neutral.

5. Zusammenfassung

Bei der Stahlherstellung bedingt die Forderung der Verarbeiter nach gleichmäßigen Werkstoffeigenschaften mit geringer Streuung der Kennwerte die sichere Einstellung enger Analysenspannen bzw. eine möglichst tiefe Absenkung von Stahlbegleitelementen. Dem Stickstoff kommt dabei für eine ganze Reihe von Stahlsorten eine entscheidende Bedeutung zu, da er sowohl ein erwünschtes Legierungselement als auch ein unerwünschtes Spurenelement sein kann.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Dokumentation der Stickstoffverläufe vom Roheisen bis zur stranggegossenen Bramme bei der Herstellung von vier ausgewählten Stahlsorten sowie der Ermittlung der relevanten Einflussgrößen auf den Stickstoffgehalt in den einzelnen Verfahrensstufen.

Als signifikante Einflussgrößen im LD-Prozess haben sich der Umschaltzeitpunkt der Bodenspülung von Stickstoff auf Argon, die relative Tiegelhaltbarkeit sowie der spezifische Schrottsatz erwiesen, die aufstickende Wirkung des Nachblasens konnte ebenfalls bestätigt werden. Beim Abstich ergab sich innerhalb der einzelnen Versuchsserien eine ziemlich gleichmäßige Aufstickung, die von der Art und Menge der zugegebenen Aufkohlungs-, Desoxidations- und Legierungsmittel abhängt. In der Sekundärmetallurgie resultiert die Aufstickung aus der Art und Menge der zugegebenen Legierungsmittel sowie der Art der sekundärmetallurgischen Behandlung (Pfannenofen oder RH-Anlage). Die Unterschiede innerhalb der Pfannenbehandlung ergaben sich durch das ver-

wendete Bodenspülgas und die Entschwefelungsbehandlung. An der Stranggießanlage konnte keine wesentliche Änderung der Stickstoffgehalte festgestellt werden, was auf die angewandten Schutzmaßnahmen gegen Reoxidation und Aufstickung zurückzuführen ist.

Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit zwischen der Forschungsabteilung der VOEST-ALPINE STAHL LINZ GmbH und dem Institut für Eisenhüttenkunde an der Montanuniversität Leoben als Diplomarbeit durchgeführt. Die Arbeit wurde auf dem Österreichischen Eisenhüttenkongress 2000 anlässlich der Posterschau als beste Diplomarbeit ausgezeichnet.

Literaturverzeichnis

- ¹ Koch, E., H. Preßlinger, K. Antlinger, A. Jungreithmeier und K. Jandl: Optimised metallurgical measures in BOF-steelmaking for ULC steel grades. Preprints 9th Japan-Germany Seminar. October 8.-9. 1996, Düsseldorf, 1/8. - ² Janke, D.: Stickstoffbewegung bei der Roheisen- und Rohstahlerzeugung. Stahl und Eisen 112 (1992) Nr. 2, 49/56. - ³ Kempken, J., und W. Pluschkell: Simulationsrechnungen zur Entwicklung der Stickstoffgehalte im LD-Prozess. Stahl und Eisen 115 (1995) Nr. 8, 67/73. - ⁴ Saigusa, M., J. Nagai, F. Sudo, H. Bada und S. Yamada: Metallurgical control in top- and bottom-blown oxygen steelmaking processes. Ironmaking Steelmaking 7 (1980) Nr. 5, 242/248. - ⁵ Normanton, A. S.: Control of nitrogen during bath agitation in the basic oxygen furnace. Ironmaking Steelmaking 15 (1988) Nr. 1, 33/37. - ⁶ Marique, C., E. Beyne und A. Palmaers: Sources and control of nitrogen in oxygen steelmaking processes. Ironmaking Steelmaking 15 (1988) Nr. 1, 38/42. - ⁷ Winterfeld, F.: Ermittlung der Aufnahmegeschwindigkeit und des Lösungsvermögens für Stickstoff von unlegierten Stahlschmelzen im kombiniert blasenden Konverter. VDEh, Forschungsvorhaben der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl, Dok. Nr. 7210-CB/107, 1992, 137/203. - ⁸ Kwitko, M. P., P. I. Jugow, E. Ch. Schachpasow, W. Krieger, F. E. Lischner, J. Nakesch, G. Pofert und M. Truppe: Einflussfaktoren auf den Stickstoffgehalt im LD-Stahl. BHM 127 (1982) Nr. 1, 6/14. - ⁹ Krieger, W., M. Truppe und G. Kinzel: Untersuchungen zur Frage der Stickstoffbewegung beim LD-Prozess. BHM 121 (1976) Nr. 5, 165/172. - ¹⁰ Krieger, W., und L. Pochmarski: Metallurgische Möglichkeiten beim LD-Prozess einschließlich der Sekundärmetallurgie (Teil II). BHM 127 (1982) Nr. 11, 435/442. - ¹¹ Krieger, W., und G. Pofert: Metallurgischer Vergleich zwischen dem LD- und dem OBM-Verfahren unter besonderer Berücksichtigung der Elemente Schwefel, Stickstoff und Wasserstoff. BHM 123 (1978) Nr. 11, 426/435. - ¹² Oeters, F.: Metallurgie der Stahlherstellung. Springer, Berlin, Heidelberg und Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1989, 179/182. - ¹³ Rao, Y. K. and H. G. Lee: Rate of nitrogen absorption in molten iron: Part 1 experimental. Ironmaking and Steelmaking 12 (1985) Nr. 5, 209/220. - ¹⁴ Lee, H. G., and Y. K. Rao: Rate of nitrogen absorption in molten iron: Part 2 mathematical model. Ironmaking and Steelmaking 12 (1985) Nr. 5, 221/232. - ¹⁵ Bannenberg, N., und B. Bergmann: Veränderung der Stickstoffgehalte während der Sekundärbehandlung. Stahl und Eisen 112 (1992) Nr. 2, 57/64. - ¹⁶ Pluschkell, W.: Metallurgische Reaktionstechnik zur Einstellung niedrigster Gehalte an C, P, S und N im Stahl. Stahl und Eisen 110 (1990) Nr. 5, 61/70. - ¹⁷ Battle, T. P., and R. D. Pehlke: Kinetics of nitrogen absorption/desorption by liquid iron and iron alloys. Ironmaking Steelmaking 13 (1986) Nr. 4, 176/189. - ¹⁸ Scheel, R., W. Pluschkell, R. Heinke und R. Steffen: Sekundärmetallurgie zur Erzielung niedrigster Gehalte an Begleitelementen in Stahlschmelzen. Stahl und Eisen 105 (1985) Nr. 11, 607/615. - ¹⁹ Köhle, S., und B. Kleimt: Ein betriebsnahes Modell für die Entgasung von Stahlschmelzen. Stahl und Eisen 116 (1996) Nr. 5, 81/87. - ²⁰ Bannenberg, N., B. Bergmann und H. Gaye: Combined decrease of sulphur, nitrogen, hydrogen and total oxygen in only one secondary steelmaking operation. Steel Research 63 (1992) Nr. 10, 431/437. - ²¹ Bannenberg, N.: Wechselwirkungen zwischen Feuerfestmaterial und Stahl und deren Einfluss auf den Reinheitsgrad des Stahls (Teil 2: Stickstoff-, Wasserstoff- und Kohlenstoffgehalte sowie Einfluss des Spülens). Stahl und Eisen 115 (1995) Nr. 10, 75/81. - ²² Bauer, K.-H., und H. Wagner: Erfahrungen beim Betrieb einer Pfannenstandentgasung in einem LD-Stahlwerk. Stahl und Eisen 107 (1987) Nr. 9, 66/70.