

VULKAN-VERLAG ESSEN

---

# elektro wärme international

Zeitschrift für elektrothermische Prozesse

## Eine einfache Plasma-Tundishbeheizung

Dr. Hans Bebber, Alexander Kranz

**erschienen in elektrowärme Heft 2, Juni 2002**

Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Ansprechpartner: Wolfgang Mönning, Telefon 0201/82002-25, E-Mail: [w.moening@vulkan-verlag.de](mailto:w.moening@vulkan-verlag.de)

Juni 2002 **2**

# Eine einfache Plasma-Tundishbeheizung

## A simple plasma-heating system for tundishes

Im Jahre 2001 wurde das weltweit erste industriell eingesetzte AC-Plasma-System mit Graphitelektroden zur kontinuierlichen Beheizung eines Tundishes in Betrieb genommen. Das System ist mit zwei Graphitelektroden ausgerüstet, so dass eine Bodenelektrode entfällt. Die während der Inbetriebnahme aufgenommenen Prozessdaten erlauben es, optimistisch für die zukünftigen Anwendungen dieser Technik zu sein. Mit einem Wirkungsgrad von 67 % ist das Graphitsystem den üblichen 55 % der Metallbrenner deutlich überlegen. Außerdem findet nachweislich keine Aufkohlung statt und die Stickstoffaufnahme der Schmelze ist deutlich kleiner als 10 ppm.

The world's first industrial-scale AC plasma system with graphite electrodes for continuous heating of a tundish was commissioned in 2001. The system is equipped with two graphite electrodes, resulting in the omission of a bottom electrode. The process data recorded during the commissioning permits optimism concerning the future use of this technology. The graphite system's efficiency of 67 % is significantly superior to the 55 % usually achieved by metal burners. In addition, there is verifiably no recarburization and the heat's nitrogen pick-up remains well below 10 ppm.

### Dr. Hans Bebber

INDUGA Industrieöfen und Giesserei-Anlagen  
GmbH & Co. KG, Köln;  
Tel. 0221-95757-0,  
E-Mail: contact@induga.de

### Alexander Kranz

INDUGA Industrieöfen und Giesserei-Anlagen  
GmbH & Co. KG, Köln;  
Tel. 0221-95757-0,  
E-Mail: contact@induga.de

Im Jahre 2001 hat die Acciarerie Bertoli Safau (ABS) in Udine, Italien die weltweit erste Plasma-Tundishbeheizung in Betrieb genommen, die mit zwei Graphitelektroden ( $\varnothing$  150 mm) ausgestattet ist und keine Bodenelektrode besitzt. Im Unterschied zu den bisher üblichen Plasma-Systemen, die mit metallischen Brennern arbeiten, ergibt sich daraus ein robuster und stahlwerksgerechter Aufbau, Unempfindlichkeit gegen Stahlspritzer sowie eine sichere, praxisgerechte Betriebsweise, ohne den Kohlenstoffgehalt des beheizten Stahles anzuheben [1-6].

Das Plasma-System ist Bestandteil der weltweit ersten Danieli Morgårdshamar Strangguss-Walzanlage. Die neuartige ECR-Endless Casting Rolling-Anlage sichert einen kontinuierlichen Produktionsprozess vom flüssigen Stahl bis zum fertig gewalzten Produkt, dabei führt die In-line-Wärmebehandlung zu einer konsistenteren Produktqualität, höherer Produktivität, geringerem Energieverbrauch, gesteigerter Materialausbeute und Anlagenverfügbarkeit. In **Tabelle 1** sind die technischen Daten der ECR-Anlage aufgelistet [7].

Das Hauptziel bei der Installation eines Plasmasystems bei ABS war die Sen-

kung der Pfannentemperaturen, um eine einheitlichere Produktionssequenz in der Gießanlage und den Pfannenöfen zu erreichen. Außerdem erweist sich das System in Notsituationen als sehr hilfreich, um Einfrieren des Stahls zu vermeiden, wenn die Pfannentemperaturen aus was für Gründen auch immer geringer als erwartet sind.

### Aufbau des Plasmasystems

Das Plasmasystem besteht im wesentlichen aus einem mechanischen Teil, der auf der Gießplattform angeordnet ist, und einem elektrischen Teil für die Leistung und Steuerung, der in den entsprechenden Schalt- und Betriebsräumen untergebracht ist. **Bild 1** zeigt das Plas-

masystem auf der Gießplattform und **Tabelle 2** informiert über die wichtigsten technischen Eckdaten.

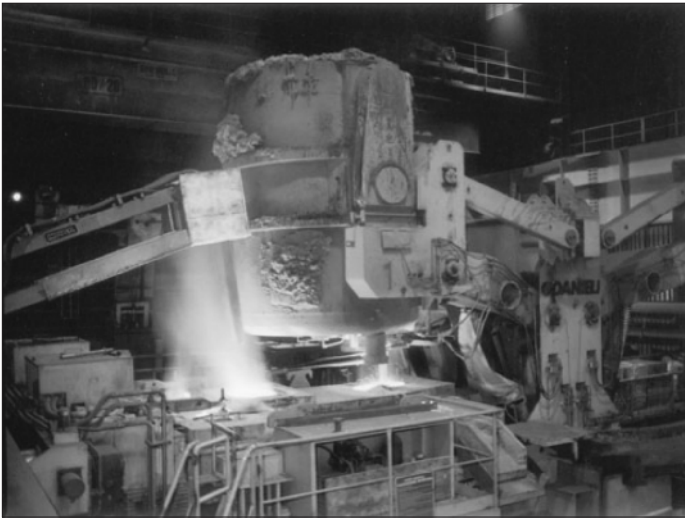
**Tab. 2:** Technische Daten des Plasmasystems  
**Table 2:** Technical data for the plasma system

Aufheizrate $\Delta T$ :	max. 5 K/min
Plasma Heizleistung:	max. 1500 kW
Spannungsbereich - Bogen:	70 ... 200 V
Elektrodenmaterial:	Graphit
Durchmesser der Elektrode:	150 mm
Stromstärke:	max. 7,5 kA
Plasma-Gasart:	Argon
Gasverbrauch:	ca. 15 Nm <sup>3</sup> /Ar/h
Kühlwasserbedarf:	ca. 8 m <sup>3</sup> /h
Anschlussleistung:	2150 kVA
Steuerleistung:	ca. 100 kVA
Anschluss-Spannung:	21000 V; 50 Hz

**Tab. 1:** Technische Daten der ECR-Gießanlage

**Table 1:** Technical data for the ECR caster

Gießanlage:	Knüppel
Produktionsrate:	max. 180 t/h
Anzahl der Stränge:	2
Tundishkapazität:	max. 30 t
Überwachung des Stahlniveaus - Tundish:	Gewicht
Überwachung der Temperatur - Tundish:	Thermoelement
Kapazität der Pfanne:	max. 90 t
Gießgeschwindigkeit:	max. 6 m/min



**Bild 1:**  
Das Plasmasystem  
bei ABS

**Fig. 1:**  
The plasma system  
at ABS

### *Mechanische Ausrüstung*

Die mechanische Ausrüstung besteht im Wesentlichen aus einem Manipulator zur Positionierung der Elektroden. Wie man in **Bild 2a** sehen kann, ist er mit heb- und senkbaren Armen ausgerüstet, die unabhängig voneinander verfahrbar sind. Die Arme sind auf einer drehbaren Plattform installiert, so dass das System zwischen Park- und Arbeitsposition geschwenkt werden kann (**Bild 2b**). Das Heben und Senken des Manipulators wird durch eine Gasfeder, die zwischen Kippgestell und Unterstützungsrahmen eingebaut ist, unterstützt. Als Antriebe dienen geschwindigkeitsgesteuerte Ge triebemotore mit integrierten Bremsen und Positionskontrollen, um eine weiche Fahrweise und eine genaue Positionierung der Elektroden in den Tundish zu ermöglichen.

Die Elektroden sind am Manipulator durch einfache Klemmen befestigt, um mechanischen Halt zu geben und die elektrische Leistung einzuspeisen.

### *Elektrische Ausrüstung*

Wie **Bild 3** zeigt, ist das System über einen Stern-Dreieck-Transformator an die Hochspannung angeschlossen. Dem Transformator ist ein Erdungsschalter und ein Vakuumschütz nachgeschaltet, um betriebsmäßiges Schalten zu ermöglichen. Da das System einphasig ist, muss der Strom auf drei Phasen verteilt werden. Dies geschieht in zwei Stufen: zunächst durch eine Kompensation und anschließend durch eine Symmetrierung der einphasigen Leistung.

Die Kompensation ist für die Nennleistung ausgelegt und kann auf eine zweite

Stufe für niedrigere Leistungen geschaltet werden, um unterschiedliche Blindleistungen zu beherrschen.

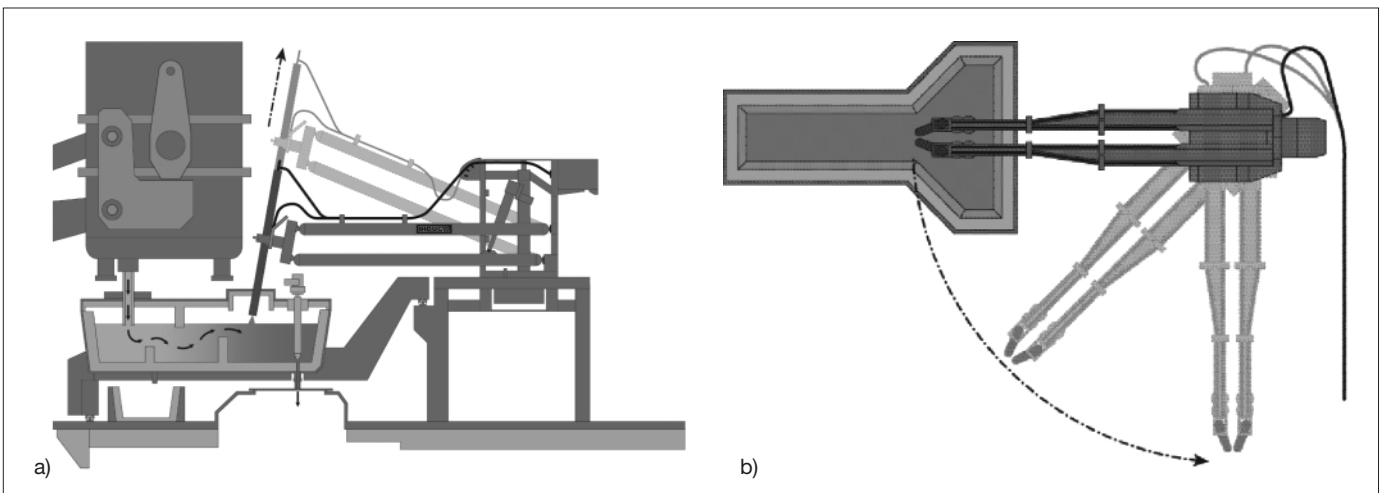
In einem zweiten Schritt wird diese Effektivleistung durch die Symmetrierstation auf die drei Phasen verteilt. Sie besteht im wesentlichen aus einer Kondensatorbank und einer korrespondierenden Drossel. Auch hier gibt es zwei Schaltstufen.

Symmetrierung und Kompensation sind an einen Einphasen-Lichtbogentransformator angeschlossen. An der Primärseite dieses Transformators kann die ankommende Spannung stufenweise abgegriffen werden, um so die Leistung des Plasmasystems durch einen motorbetriebenen Laststufenschalter einzustellen. Die Sekundärseite des Transformators andererseits ist über das wassergekühlte Stromschienensystem und die Tragarme an die Elektroden angeschlossen.

Im Allgemeinen ist der Transformator so ausgelegt, dass bei niedrigen Spannungen der maximale Strom begrenzt wird und bei hohen Spannungen eine Leistungsbegrenzung erfolgt. Für die Positionierung der Elektrode und zur Leistungskontrolle stehen Spannungsmessungen relativ zum Erdpotential zur Verfügung.

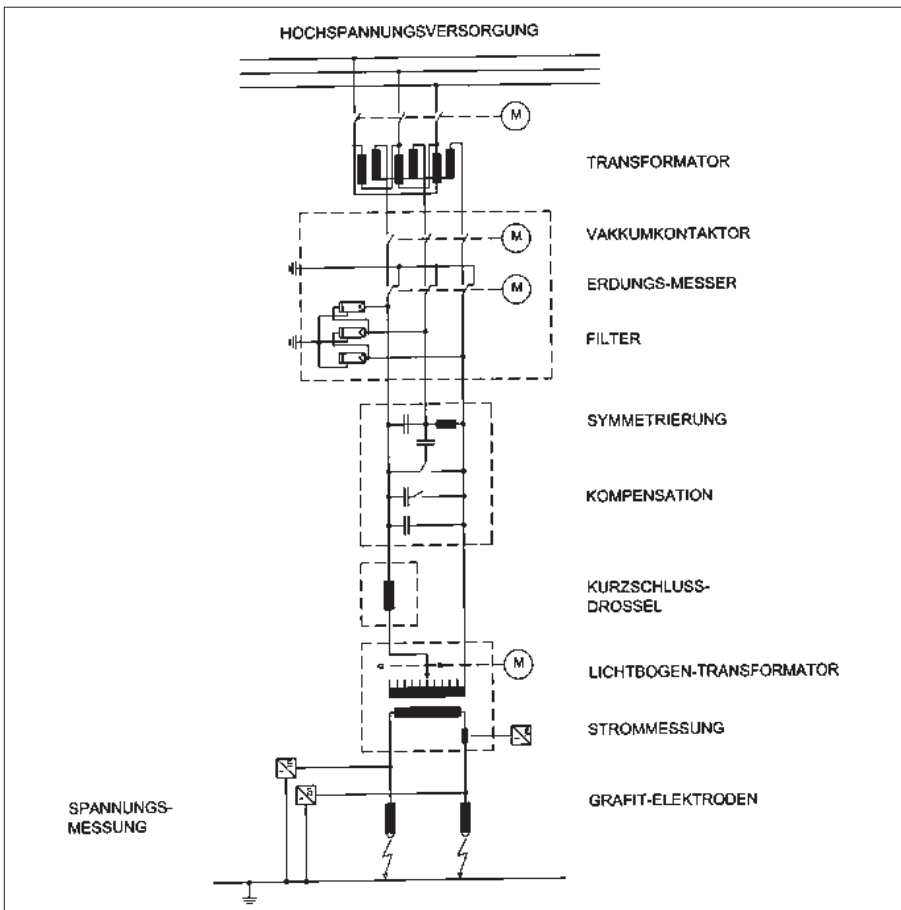
### *Temperaturmessung*

Um unterschiedliche Pfannentemperaturen und natürliche Fluktuationen in der vorgewärmten Tundish-Ausmauerung zu beherrschen, ist der Tundish mit einer Temperatur-Messlanze ausgerüstet. Diese



**Bild 2:** Layout: a) Seitenansicht, b) Draufsicht

**Fig. 2:** Layout: a) Side elevation, b) Plan view



**Bild 3:** Stromlaufplan des Plasma-Systems  
**Fig. 3:** Circuit diagram for the plasma system

Lanze ist an einem eigenen schwenkbaren Tragarm befestigt. Die Temperaturmessung selbst ist kontinuierlich und daher eine exzellente Basis für die Einstellung der Heizleistung [8].

Zur Positionierung von Temperaturmessung und Plasmabrenner wurden umfangreiche numerische Berechnungen durchgeführt. Sie erlauben eine Aussage über die tatsächlichen Verhältnisse bei der gewählten Geometrie. Basierend auf diesen Daten konnten die Tundishgeometrie, die Position vom Wehr und Damm, die Anordnung der Brenner wie auch die beste Stelle für die Temperaturmessung systematisch und gezielt untersucht und optimiert werden [9-12].

**Tundishverluste**

Um die Tundishverluste zu bestimmen, wird der Temperaturverlauf des Stahles im Tundish für den stationären Zustand ohne Beheizung betrachtet. Dazu muss neben der Gießtemperatur, also der Auslauftemperatur des Stahls vom Tundish in die Kokille, auch die Einlauftempera-

tur des Stahls von der Pflanne in den Tundish bekannt sein. Diese Pflannentemperatur  $T_L$  wurde am Pflannenofen gemessen und ihre zeitliche Abkühlrate wurde aufgrund umfangreicher Erfahrungswerte von gut vorgeheizten Pflannen zu

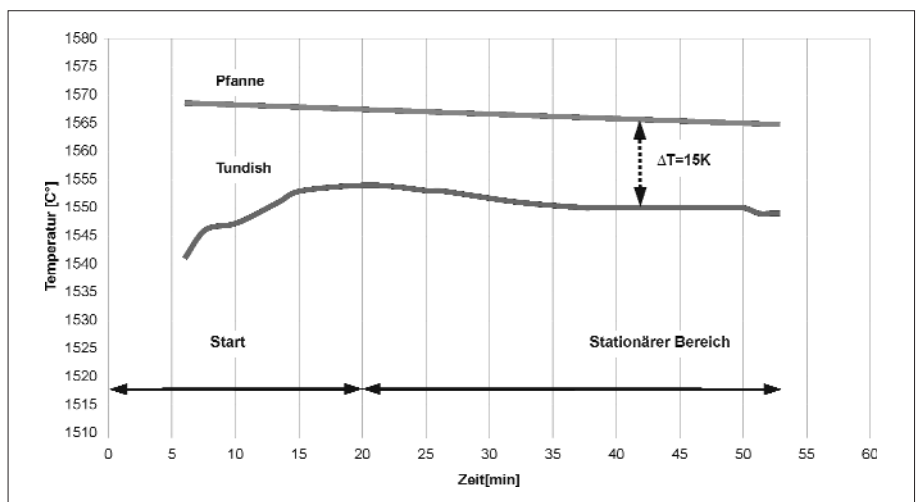
0,07 K/min bestimmt. Dieser Wert ist für eine 90-t-Pflanne als extrem gut zu bewerten. Unter Berücksichtigung der Transferzeit lässt sich, wie in **Bild 4** geschehen,  $T_L$  als Funktion der Zeit auftragen. Da im stationären Zustand die Gießgeschwindigkeit gleich der Durchlaufzeit des Stahls durch den Tundish ist, kann man die Tundishverluste  $P_{TD}$  wie folgt berechnen:

$$P_{TD} = \dot{m}_c \cdot c \cdot (T_L - T_T) \quad (1)$$

Praktische Erfahrungen zeigen, dass selbst in einem gut vorgeheizten Tundish bei der ersten Pflanne etwa 20 min vergehen, bis die Aufheizung des Feuerfestmaterials beendet ist und das System thermisch stabil wird. Man erkennt dies daran, dass dann die Abkühlrate des Tundishes nahezu parallel zur Abkühlrate der Pflanne verläuft. Die sich in diesem Zustand einstellende annähernd konstante Temperaturdifferenz zwischen Pflanne und Tundish liefert einen zuverlässigen Basiswert zur Ermittlung der ebenfalls dann konstant gewordenen Tundishverluste  $P_{TD}$ . Setzt man die Werte gemäß Bild 4 in Gleichung 1 ein, so ergibt sich mit einer spezifischen Wärmekapazität von  $c = 0,21 \text{ kWh/(t K)}$  ein typischer Verlustwert von

$$P_{TD} = 260 \text{ kW.}$$

Dieser Wert, der die Summe der Verluste aus Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung repräsentiert, ist für einen 30-t-



**Bild 4:** Zeitlicher Verlauf der Pflannentemperatur  $T_L$  und der Tundishtemperatur  $T_T$  bei einem typischen Guss ohne Plasma-Beheizung. Die Gießrate beträgt  $\dot{m}_c = 82,3 \text{ t/h}$ .

**Fig. 4:** Plot of ladle temperature  $T_L$  and tundish temperature  $T_T$  against time for a typical cast without plasma heating. Casting rate was 82.3 t/h

Tundish als typisch zu bezeichnen und weitgehend unabhängig davon, ob der Tundish beheizt wird oder nicht.

**Wirkungsgrad**

Da der Systemwirkungsgrad eine der wichtigsten Kenngrößen der Tundishbeheizung ist, wurde er aus den ermittelten Betriebsdaten bestimmt. Hierzu ist es wichtig, dass sich der Tundish thermisch weitgehend stationär verhält, etwa wie oben im Zusammenhang mit der Bestimmung der Tundishverluste beschrieben. Dies ist insofern von Bedeutung, da ansonsten die vom Plasmasystem eingebrachte Energie im Feuerfestmaterial gespeichert wird und sich damit der Messung entzieht. Ferner muss zunächst auch der sich im Tundish befindliche Stahl auf das neue Temperaturniveau angehoben werden, bevor man auswertbare Daten ermitteln kann, da man ansonsten für die Wirkungsgradbestimmung den jeweiligen Tundishinhalt selber zusätzlich zum Durchfluss berücksichtigen muss. **Bild 5** zeigt die Messergebnisse.

Heizt man mit einer konstanten Leistung, so stellt sich erwartungsgemäß ein quasistationärer Temperaturverlauf ein, dessen zeitlicher Verlauf der Pfannentemperatur folgt. Im hier dargestellten Fall ist die sich gegenüber dem beheizten Zustand einstellende Temperaturdifferenz  $\Delta T = 19 \text{ K}$  bei einer Plasmaleistung von  $P_0 = 600 \text{ kW}$  und einem Massendurchsatz von  $\dot{m}_c = 100 \text{ t/h}$ . Daraus errechnet sich ein Wirkungsgrad von:

$$\eta = \frac{\dot{m}_c \cdot c \cdot \Delta T}{P_0} \cdot 100 \% = 67 \% \quad (2)$$

Bei herkömmlichen mit metallischen Brennern arbeitenden Systemen liegt der Wirkungsgrad bei ca. 55 % [4]. Der hier berechnete deutlich höhere Wert wird erreicht durch kürzere Plasmabögen und Fehlen der Wasserkühlung.

Diese Art den Wirkungsgrad zu berechnen, nimmt bewusst keinen Bezug zu den weitgehend stationären Tundishverlusten von ca. 260 kW, da als Referenz ein Temperaturverlauf aus einem Guss mit gleichen Startbedingungen, aber ohne Beheizung gewählt wurde, der die Tundishverluste schon enthält.

**Aufheizrate und Totzeit**

Weitere charakteristische Kenndaten des Systems sind die maximale Aufheizrate sowie die Totzeit. Beide Größen kann man messtechnisch ermitteln, indem das Plasmasystem nach Erreichen weitgehend stationärer Verhältnisse eingeschaltet und für einige Minuten mit maximaler Leistung betrieben wird. Die gemessenen Werte lagen durchweg zwischen 4 und 5 K/min und stimmen recht gut mit der theoretisch zu erwartenden maximalen Aufheizrate überein. Diese lässt sich nämlich abschätzen, wenn man näherungsweise davon ausgeht, dass nur der im Auslaufbereich des Tundishes befindliche Stahl aufgeheizt wird. Schätzt man dessen Masse mit  $m_{TA} = 18 \text{ t}$  ab, so ergibt sich die Aufheizrate  $\dot{T}$  mit  $P =$

1500 kW und den oben schon berechneten Werten zu

$$\dot{T} = \frac{\eta \cdot P}{c \cdot m_{TA}} \approx 4,4 \frac{\text{K}}{\text{min}} \quad (3)$$

also in guter Übereinstimmung mit den Messwerten.

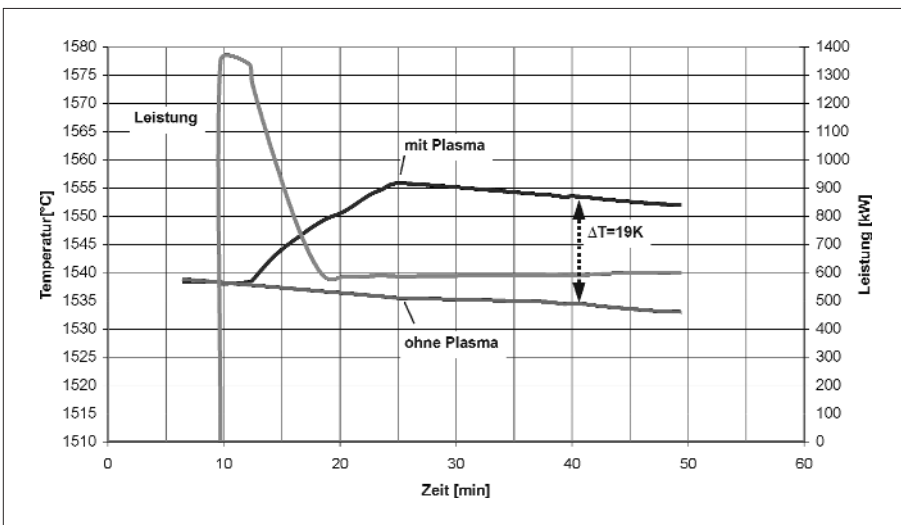
Die Totzeit hingegen ist im wesentlichen vom Abstand Brenner – Temperaturmessstelle, von den Strömungsverhältnissen im Tundish, sowie der Reaktionszeit des Thermoelements selber abhängig, d. h. es besteht ein überaus komplexer Zusammenhang aller Einflußgrößen. Andererseits ist eine Messung relativ einfach durchzuführen, wie oben schon beschrieben. Dabei ergaben sich Totzeiten von einer Minute bei Gießgeschwindigkeiten von 80 bis 90 t/h.

**Regelung des Systems**

Der wichtigste Einsatzzweck eines Plasmasystems ist die präzise Regelung der Tundishtemperatur auf einen Sollwert, der je nach Stahlqualität typischerweise bei ca. 15 K über Liquidus liegt. Da das System naturgemäß nur heizen kann, entzieht sich also der gesamte Zeitraum, während dem die Überhitzung oberhalb des Sollwertes liegt, einer Regelmöglichkeit. Um diesen Zeitraum möglichst kurz zu halten, ist es wichtig, die Pfannentemperatur so weit zu senken, dass die Pfanne gerade noch leer laufen kann. Wegen der Plasmabeheizung ist der Tundish nämlich energetisch autark und benötigt daher im Endeffekt keinen überhitzten Stahl aus der Pfanne.

Die Regelung selbst besteht aus einem normalen PID-Regler, der unter Zuhilfenahme des kontinuierlich verfügbaren Temperatur-Istwertes einen Vergleich mit dem vorgegebenen Sollwert durchführt und die Leistung des Plasmasystems entsprechend verstellt [8]. Diese Leistungsregelung erfolgt ausschließlich über die Stromstärke, da eine Spannungsänderung eine mechanische Verstellung der Brenner zur Folge hätte, die dazu führen würde, dass die Bogenlänge ihren optimalen Wert verlässt.

In der Praxis werden die Regelgenauigkeiten von  $\pm 3 \text{ K}$  problemlos erreicht, die aus verfahrenstechnischer Sicht den technologischen Anforderungen des Stranggießens voll gerecht werden.



**Bild 5:** Vergleich der Tundishtemperaturen mit und ohne Plasma-Beheizung  
**Fig. 5:** Comparative assessment of tundish temperature with and without plasma heating

## Graphitverbrauch

Zur praktischen Messung des Graphitverbrauches wurden die Elektroden von Zeit zu Zeit vermessen, der ermittelte Volumenverlust in einen Gewichtsverlust umgewandelt und in Relation zur entsprechenden Energiemenge gesetzt. Die bei durchschnittlich 200 V Bogen-spannung und 5200 A Bogenstrom gemessenen Werte lagen bei 5 bis 6 kg/MWh. Sie sind damit in derselben Größenordnung wie die früher an einem ähnlichen Gleichstromsystem ermittelten Daten [5].

Bisher wurde keine weitere Differenzierung des Verbrauchs durchgeführt, um z. B. den Spitzenverschleiß und den Seitenabbrand separat zu ermitteln. Allerdings zeigt das Verschleißbild, dass wegen der relativ großen Elektrodendurchführung ein höherer oxidativ bedingter Verschleißanteil vorliegt, da der Seitenabbrand relativ groß ist. Somit besteht Aussicht, den Graphitverbrauch durch eine Verbesserung der Tundish-Isolierung weiter zu verkleinern.

## Aufkohlung und Stickstoffaufnahme

Ein Kriterium für den Einsatz von Metallbrennern liegt in der Annahme, dass bei Betrieb mit Graphitelektroden durch Aufkohlung die Qualität des Stahles gemindert würde. Bereits durch Untersuchungen bei der BGH Edelstahl [5] konnte allerdings nachgewiesen werden, dass der Eintrag von Kohlenstoff durch das Plasmasystem bedeutungslos ist. Entsprechende Untersuchungen bei ABS belegen anhand von sieben Aufheizungen mit vier unterschiedlichen Stahlsorten und insgesamt 20 Aufheizperioden, die während der Inbetriebnahme und der Tests für die Endabnahme durchgeführt wurden, dass selbst bei einer Leistung von 1,5 MW keine Aufkohlung messbar ist.

Daraus resultiert, das graphitbestückte Plasmasysteme in metallurgischer Hinsicht keinesfalls schlechter sind als mit Metallelektroden bestückte Systeme. Dies gilt im übrigen auch für die Stickstoffaufnahme, die ja im wesentlichen von der Abschirmung des Luftanteils der Tundishatmosphäre abhängt. So war die Stickstoffaufnahme beim Betrieb des Plasmasystems bei ABS immer

Tab. 3: Vergleich von Graphit- und Metallelektrodensystemen

Table 3: Comparison of graphite and metal electrode systems

Beschreibung	Graphitelektrode	Metallelektrode
Wasserkühlung der Elektrode	nein	ja
Wirkungsgrad	67 %	55 %
Metallspritzer	unempfindlich	empfindlich
Aufkohlung	unbedeutend	keine
Argon-Verbrauch	< 10 Nm <sup>3</sup> /h	> 10 Nm <sup>3</sup> /h
Elektrodenverbrauch	5 ... 6 kg/MWh	0,1 g/kAs
AC/DC Betrieb	ja/ja	ja/ja

nachweislich deutlich kleiner als 10 ppm [13-16].

## Betriebskosten

Obwohl die meisten Stranggießanlagen bislang aus verfahrenstechnischen Gründen, wie etwa wegen sehr langer Gießzeiten oder instabiler Temperaturverhältnisse mit Tundishbeheizungen ausgerüstet worden sind, ist doch auch der reine Betriebskostenaspekt für die Entscheidung zu einer solchen Investition von Bedeutung, denn er ist für den systematischen und wirtschaftlichen Einsatz einer solchen Anlage ein wichtiger Gesichtspunkt.

Da das Plasmasystem vollautomatisch betrieben wird, kann es von den ohnehin schon vorhandenen Stranggießpersonal mitbedient werden. Nennenswerte Personalkosten entstehen also nicht. Dagegen sind systematische Einsparungen an Betriebskosten vor allem durch die signifikante Erniedrigung der Pfannentemperatur möglich. Ein Wert von  $\Delta T = 20$  K ist in der Praxis durchaus realistisch, dem bei einer 90-t-Pfanne ein Energiewert von 380 kWh entspricht. Geht man davon aus, dass der Stahl beim Vergießen 20 Minuten mit 1 MW beheizt werden muss, um ein Einfrieren zu verhindern, so müssen dazu nur 330 MWh aufgebracht werden, also ca. 13 % weniger. Schon dieses einfache, aber realistische Beispiel zeigt, dass selbst rein betriebswirtschaftliche Überlegungen für den Einsatz eines Plasmasystems sprechen. Wegen eines detaillierten Kostenvergleiches sei auf [5] verwiesen.

## Vergleich von Graphit- und Metallelektrodensystem

Tabelle 3 zeigt eine kurze Vergleichsaufstellung zwischen Graphit- und Metallelektrode, die die wesentlichen Spe-

zifikationsmerkmale herausstellt. Die Daten begünstigen deutlich das Graphitsystem, da es einen wesentlich einfacheren Aufbau hat, einfacher zu warten ist und aus prozesstechnischer Sicht keine Nachteile aufweist. Dem zu Folge ist das Graphitsystem für praktisch alle typischen Stahlsorten geeignet und überlässt dem Metallsystem Nischenanwendungen wie beispielsweise die Edelmetallbeheizung.

## Zusammenfassung

Das mit Graphitelektroden betriebene Plasma-System führt im Unterschied zu den herkömmlichen mit metallischen Brennern arbeitenden Systemen zu einem robusteren und stahlwerksgerechteren Aufbau, da es unempfindlich gegen Stahlspritzer ist, sowie eine sichere, praxisgerechte Betriebsweise erlaubt.

In metallurgischer Hinsicht erfüllt das System voll die Erwartungen des Betreibers, da eine absolut stabile Analyse garantiert und insbesondere jedwede Aufkohlung durch den Betrieb der Plasma-Anlage vermieden wird. In kostentechnischer Hinsicht unterstützt das System die Senkung der Betriebskosten durch geringeren Energieverbrauch und niedrige Wartungskosten. Das Plasma- und Graphitelektrodenkonzept hat sich mit einem Wirkungsgrad von 67 % damit beim Strangguss aufgrund der hohen Aufheizgeschwindigkeit aber vor allem aufgrund der vollautomatischen Temperaturregelung exzellent bewährt.

## Literatur

- [1] Salvati, F.; Tolve, P.; Masala, M.; Peiisino, E.: Centro Sviluppo Materiali, Broglio D – ILVA Cogne/Aosta.: Application of Plasma System for tundish heating, IQ-special issue, 1991
- [2] Moore, C.; Heanly, C. P.; Cowx, P.: Plasma tundish heating as an integral

- part of continuous casting, steel times international, May 1989
- [3] Neuschütz, D.: Metallurgical applications of high power arc heating systems, High Temp Chem. Processes 4, 2000, p 309-321
- [4] Neuschütz, D.: Plasma application in process metallurgy, High Temp Chem. Processes 1, 1992, p. 511/35
- [5] Neuschütz, D.: Arc heating in the tundish with a graphite electrode in comparison to metallic plasma torch, Steel research (1996) No. 11,
- [6] Birkenbusch, D.; Bebber, H.; Esendiller, H.: Plasma tundish heating as an integral part of continuous casting, elektrowärme international
- [7] Alzeta, F.; Andreatta, D.; Tonidandel, M.; Ruzza, D.: At the Luna endless casting rolling mini-mill, ; Millenium Steel 2k1 (2001), London, p252-258
- [8] Brabandt, K.: Entwicklung eines Automatisierungskonzeptes zur Tundishbeheizung mit dem Krupp A.C.-Plasma system. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Regelungssysteme und Steuerungstechnik- Ruhr Universität Bochum, 1988
- [9] Pfeifer, H.; Odenthal, J.; Rischard, M.: Optimisation of Plasma heated two-strand tundish by physical und numerical modelling, March 2000
- [10] Heaslip, L.; Dorricott, D.: Transient Phenomena in the tundish, Electric furnace conference proceedings, 1992 p. 475-483
- [11] Lemanowicz, I.; Gorissen, R.; Odenthal, J.; Pfeiffer, H.: Validierung von CFD-Rechnungen für das System Tauchrohr-Kokille durch DPIV, Stahl und Eisen Nr 9, 2000
- [12] Neuschütz, D.; Hahn, I.; Spirine, D.; Storsberg, L.: Power increase and metallurgical effects during heating of liquid steel due to the addition of molecular gases, Steel research 70 (1999), p. 309-313
- [13] Neuschütz, D.; Zhai, Y.; Hauck, A.: Nitrogen transfer into plasma heated steel melts as a function of arc polarity, Steel research (1994) No. 6, p. 65
- [14] Neuschütz, D.; Zhai, Y.; Hauck, A.: Influence of arc polarity on nitrogen dissolution, heat transfer and electrode wear during plasma heating of steel melts. International symposium on science and technolog of metallurgical processing - The Morita Symposium-, Oct 1994
- [15] Neuschütz, D.; Stüber, A.: Effect of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> additions on arc voltage and steel composition during argon plasma heating of steel melts, 1996
- [16] Neuschütz, D.; Stüber, A.: Power increase of plasma heating systems by CO<sub>2</sub> addition into the furnace atmosphere; Investigations in view of the plasma ladle furnace. Steel research (1996) No. 7, p. 67