

Induktive Kinetik – Elektromagnetische Systeme in der Schmelzmetallurgie

von **Robert Jürgens, Dirk Schibisch**

Die Optimierung der EMS Technologie (Electro Magnetic Stirring) ist ein Grund für die kontinuierlichen Verbesserungen der Produktivität sowie der Materialqualität in schmelzmetallurgischen Prozessen. Dazu haben im Wesentlichen die Weiterentwicklung der Umrichter-Technologie, also der elektrischen Leistungsversorgung, sowie die numerische Simulation des Rührprozesses beigetragen. Ergebnis ist ein kontrolliertes Verfahren zur Herstellung homogener Mikrogefügestrukturen durch optimal dimensionierte Rührer, die für die elektromagnetische Bewegung (Rühren) der flüssigen Schmelze sorgen. Dieser Fachbeitrag beschreibt aktuelle Anwendungen der induktiven Kinetik und geht auch auf innovative Entwicklungen ein.

Induction kinetics – Electromagnetic systems in melt metallurgy

The optimization of EMS (Electro-Magnetic Stirring) technology is one reason for the continuous productivity and metallurgical quality improvement of melting and casting. Advancements in converter (electrical power supply) technology, and numerical simulation of the stirring also contributed substantially to this progress. The result is a controlled process for making homogeneous microstructures by using optimally-sized inductors to electromagnetically stir the liquid melt. This technical paper describes current applications for inductive kinetics and associated innovations.

Seit über 40 Jahren wird das elektromagnetische Rührverfahren vor allem bei der Erzeugung von Lang- und Flachprodukten über die schmelzmetallurgische Route eingesetzt.

Die Bewegung wird durch das von der Rührspule induzierte elektromagnetische Dreh- oder Wanderfeld hervorgerufen, welches in die Schmelze eindringend einen Strom induziert. Der Strom und das ihn verursachende Magnetfeld erzeugen eine Kraft (Lorentzkraft), die auf die Schmelze wirkt und diese bewegt. Die Rührwirkung hängt wesentlich von der Größe des induzierten Feldes und vom Abstand der Spule zum flüssigen Metall ab.

Durch eine geeignete Anordnung und Verschaltung von Spulen werden rotierende, lineare oder kombinierte Strömungen erzeugt. Durch Änderung der Einschaltzeiten und der Phasenfolge in den einzelnen Rührspulen können

diese kontinuierlich, intermittierend oder alternierend sein. Somit können in Abhängigkeit der Qualitäts- und Produktivitätsanforderungen durch das Gießverfahren sehr flexible Prozesse gestaltet werden, immer mit dem Ziel, den Erstarrungsvorgang so zu gestalten, dass ein homogenes Materialgefüge entsteht.

Werden die Rührspulen durch einen Umrichter mit variabler Frequenzeinstellung eingespeist, ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Diese reichen vom elektromagnetischen Rühren einer Schmelze über ein homogenes Verteilen und Bremsen von flüssigem Metall beim Vergießen, bis zur Restmetallgewinnung in metallischen Schlacken. Die EMS-Technologie bewirkt bei allen diesen Verfahren folgende positive Effekte:

- Ausbildung von feinkörnigem, globulitischem und gleichmäßigem Gefüge

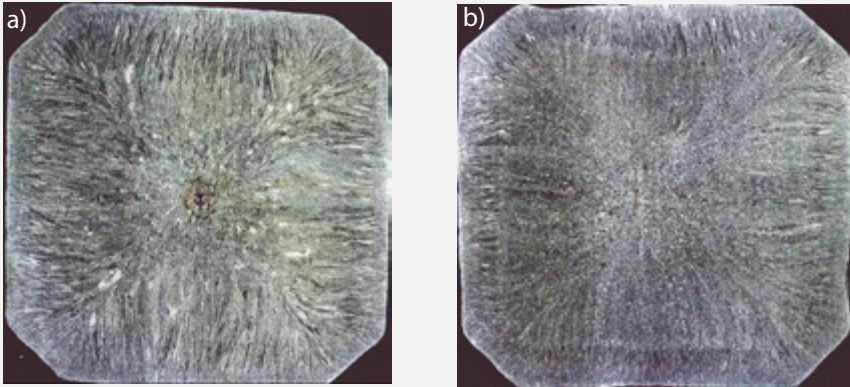


Bild 1: Gussgefüge von a) ungerührtem und b) gerührtem Stahl

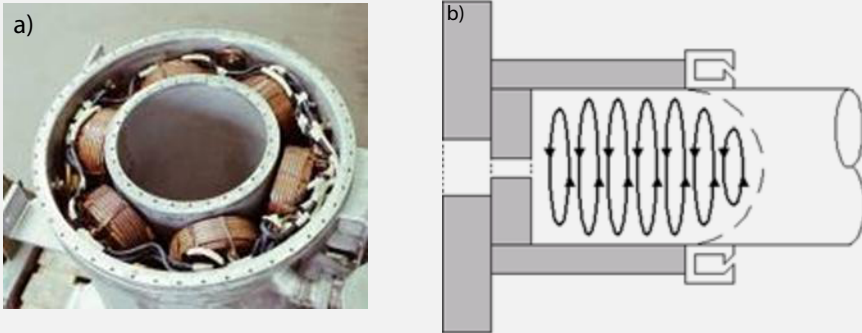


Bild 2: a) Rotationsrührer und b) Charakteristik der Makroströmung beim Rotationsrührer (Quelle: SMS Elotherm)

- Reduzierung von Seigerungen, Gas- und Schlackeneinschlüssen, Kernrissen und Porosität
- Homogene Verteilung von Schmelzen beim Bandgießen
- Oberflächenqualitäts und -beschaffenheitsverbesserung
- Frühen Abbau der Überhitzung in der Kokille
- Homogenisierung der Schmelzen
- Steigerung der Prozessflexibilität und des Durchsatzes.

Ein Beispiel ist der folgende Vergleich des Gussgefüges eines ungerührten und eines elektromagnetisch gerührten Gießstranges, wie in **Bild 1** dargestellt. Es ist ersichtlich, dass durch elektromagnetisches Rühren der Anteil feinkörniger Kristalle deutlich erhöht werden konnte und im Vergleich zum ungerührten Zustand wesentlich weniger Dendriten ausgebildet wurden. Auch durch das homogenere Gefüge und die Unterdrückung von Kernporosität und -rissen werden die physikalischen Eigenschaften des Materials verbessert.

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Zum besseren Verständnis der physikalischen Vorgänge bei der induktiven Kinetik seien im Folgenden beispielhaft

die Grundlagen zur Ermittlung des Kraftfeldes eines Rotationsrührers im zylindrischen Gießstrang dargestellt.

Das den Strang senkrecht durchdringende Magnetfeld induziert im Strang einen Strom, der parallel zur Strangachse fließt. Strom und das ihn erzeugende Magnetfeld bewirken eine Kraft, die nun betrachtet werden soll. Diese Lorentzkraft wird nach der Formel

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \tag{1}$$

berechnet. Da das Magnetfeld vereinfachend nur eine Komponente in radialer Richtung hat und der von ihm erzeugte Strom nur eine Komponente in z-Richtung besitzt, ergeben sich für das Kraftfeld nur zwei Komponenten.

$$F_r = -j_z B_\theta \quad \text{und} \quad F_\theta = j_z B_r \tag{2}$$

Die Stromdichteverteilung und die magnetische Feldverteilung werden mit Hilfe der Maxwell'schen Gleichungen berechnet. Nach Spitzer und Dubke [1] ergeben sich die nachstehenden Lösungsgleichungen:

$$B_r = -\frac{ipa}{r} e^{i(\omega t - p\theta)} \tag{3}$$

$$B_\theta = -\frac{da}{dr} e^{i(\omega t - p\theta)} \tag{4}$$

$$j_z = -i\sigma \omega - \frac{pv_\theta}{r} a e^{i(\omega t - p\theta)} \tag{5}$$

In der Gleichung (5) enthält der Term $\omega - \frac{pv_\theta}{r}$ den bewegungsinduzierten Anteil und den Anteil, der durch zeitliche Änderung des Magnetfeldes hervorgerufen wird.

In diesen Gleichungen ist a eine Funktion von r und erfüllt die Differentialgleichung

$$r^2 \frac{d^2 a}{dr^2} + r \frac{da}{dr} - i\sigma_0 r^2 \omega - \frac{pv_\theta}{r} + p^2 a = 0 \tag{6}$$

Die Lösung der vorstehenden Gleichungen führt für F_r und F_θ zu Näherungslösungen, die die Kraftdichteverteilung der radialen und azimutalen Kraft mit ausreichender Genauigkeit angeben.

$$F_r = -\frac{1}{8} B_0^2 \omega - \frac{v_\theta}{r} \sigma^2_0 r^3 \tag{7}$$

$$\vec{F}_\Theta = \frac{1}{2} B_0^2 \left(\omega - \frac{v_\Theta}{r} \right) \sigma r \quad (8)$$

B_0 ist die Induktion an der Oberfläche. Man sieht, dass der radiale Kraftanteil schneller abfällt als der azimutale Anteil.

Mit diesen Grundlagen kann nun entsprechend den Anforderungen der elektromagnetische Rührprozess ausgelegt werden.

TECHNISCHE AUSFÜHRUNGEN VERSCHIEDENER ELEKTROMAGNETISCHER RÜHRER

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Rotations-, Linear- und Helikoidalrührern. Im Folgenden werden diese drei Haupttypen kurz erläutert.

Elektromagnetische Rotationsrührer

Rotationsrührer (**Bild 2**) werden direkt in das Gießgerüst eingebaut und zwar den Stahlstrang umschließend. Sie erzeugen ein rotierendes Feld, welches das flüssige Material berührungslos bewegt. Das geschieht entweder direkt in der Nähe des Kokille, um möglichst viel flüssigen Anteil bewegen zu können, oder aber im weiteren Verlauf des Gießstranges, um den Erstarrungsprozess gezielt zu beeinflussen.

Nachdem zur Felderzeugung in den Anfängen dieser Technologie zunächst die Ständerwicklung der Asynchronmotoren eingesetzt wurde, haben sich während der weiteren Entwicklung Konstruktionen mit sechs Polen durchgesetzt. Auf den Polschuhen sind Blockspulen aufgesetzt. Diese werden von Strömen gleicher Phasenlage so durchflossen, dass die jeweils einander gegenüber liegenden Pole einen Nord- und Südpol bilden. Das Magnetfeld dreht mit der Frequenz der felderzeugenden Ströme um die Strangachse. Es durchdringt den Metallstrang, der mittig durch den Rührer führt, quer zur Strömungsrichtung der Schmelze.

Die turbulente Makroströmung, die durch die Kraftwirkung des Rührers entsteht, beeinflusst das Erstarrungsverhalten während des Gießprozesses. Beim Rotationsrührer dreht die Strömung um die Strangachse. Dabei ist die Strömungsgeschwindigkeit an der Strangschale hoch, während sie dagegen in der Nähe der Strangachse

niedriger ist. Durch die resultierende höhere Rührwirkung wird das Gefüge außen feinkörniger als in der Strangmitte, wo manchmal noch grobkörniges Gefüge zu finden ist.

Elektromagnetischer Linearrührer

Im Gegensatz zum Rotationsrührer wird bei einem zylindrischen Linearrührer (**Bild 3**) ein linear fortschreitendes Wanderfeld erzeugt. Die Schmelze bewegt sich parallel zur Strangachse. Je nach Wanderfeldrichtung wird die heiße Schmelze, an der Strangschale vorbei, zur kälteren Erstarrungsfront gefördert. Der Rückstrom erfolgt im Bereich der Zentrumsachse.

Bild 4 zeigt den Einfluss der Rührwirkung durch einen Linearrührer auf das Verhältnis der globulitischen Kernzone (equi-axed zone) zur Mittenachsen-Seigerung (Index of centerline segregation). Deutlich wird zum einen, dass durch die induktive Kinetik das Verhältnis der globulitischen Kernzone ungefähr verdoppelt und gleichzeitig die Mittenachsen-Seigerungen nahezu halbiert werden. Der Einsatz des Linearrührers führt somit insgesamt zu einer nachhaltigen Verbesserung der Materialqualität.

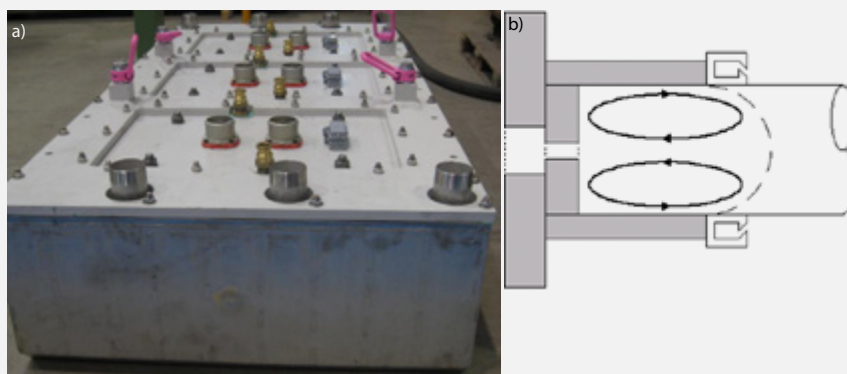


Bild 3: a) Linearrührer und b) Charakteristik der Makroströmung beim zylindrischen Linearrührer (Quelle: SMS Elotherm)

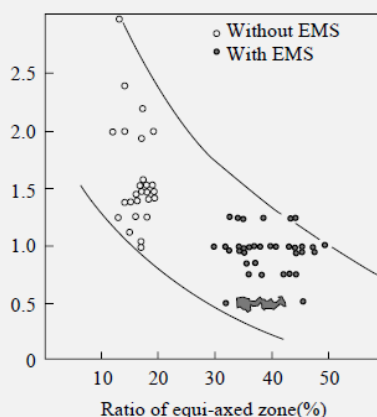


Bild 4: Verhältnis der globulitischen Kernzone und der Mittenachsen-Seigerung mit und ohne elektromagnetischen Linearrührer [2]

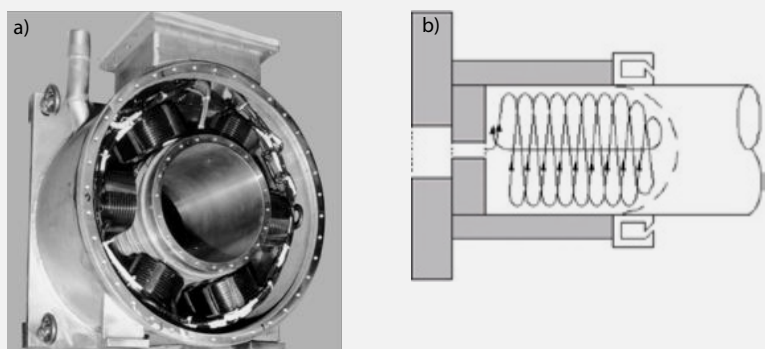


Bild 5: a) Helikoidalrührer und b) Charakteristik der Makroströmung beim Helikoidalrührer (Quelle: SMS Elotherm)

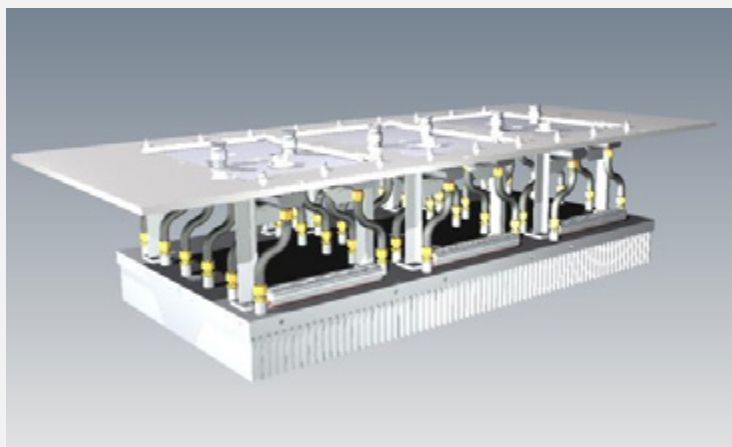


Bild 6: Stator des modular aufgebauten 6-phasigen Wanderfeldinduktors (Quelle: SMS Elotherm)

Elektromagnetischer Helikoidalrührer

Der Helikoidalrührer (**Bild 5**) kombiniert die Vorteile des Rotations- und Linearrührers, indem er eine Überlagerung der rotativen und der linearen Makroströmung erzeugt. Einerseits wird das flüssige Metall mit hoher Geschwindigkeit um die Zentrumsachse bewegt, andererseits erfolgt eine Rückströmung durch die Zentrumsachse.

Bei modernen Gießsystemen kann der jeweilige Anteil von linearer und rotativer Strömung eingestellt werden. Hierzu werden statische Frequenzumrichter eingesetzt, mit denen die Ströme und die Frequenz einzelner Rührerspulen eingestellt werden können. Der Helikoidalrührer wird vor allem bei der Herstellung von Kupfer, Aluminium und deren Legierungen eingesetzt.

ENERGIEEFFIZIENTE LEISTUNGSVERSORGUNG ELEKTROMAGNETISCHER RÜHRPROZESSE

Der Einsatz von Spannungszwischenkreisumrichtern mit modulierter Pulsweite im Wechselrichter (PWM Pulsweitenmodulierter Wechselrichter) ist für die Rührtechnologie von großem Vorteil. Der Wechselrichter kann durch unterschiedliche Algorithmen gesteuert werden. So ist es möglich, Frequenz und Stromamplitude unabhängig voneinander zu steuern.

Im Vergleich mit üblichen Antriebsumrichtern können PWM-Umrichter dank eines patentierten Steueralgorithmus (Elotherm Patent DE 4216 946 C2) [4] auch stark unsymmetrische Lasten, wie sie z.B. bei Linearrührern auftreten, sicher speisen. Weiterhin gibt es die Möglichkeit, die unabhängigen Drehstromsysteme in Phase zu koppeln und somit sechs- oder mehrphasige Systeme zu realisieren (**Bild 6**). Diese Betriebsart erlaubt gleichmäßiger verteilte Rührkräfte und reproduzierbare Ergebnisse.

Diese modernen PWM-Umrichter mit zwei unabhängigen 3-Phasen Systemen bieten durch den breiten Frequenzbereich sehr flexible Nutzungsmöglichkeiten. Neben den klassischen induktiven Rühraufgaben sind auch elektromagnetische Bremsen zur gezielten Steuerung der Abkühlrate des Gießstranges realisierbar. Durch flexible Umschaltung kann, bei geeigneter Anordnung, zwischen Rühren und Bremsen gewechselt werden. Selbstverständlich bietet sich die Möglichkeit, die Rührer reversierend zu betreiben. Somit bietet diese Umrichter-Technologie ein sehr breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten.

Wird ein PWM-Umrichter im Vierquadrantenbetrieb betrieben, können sowohl Gleichstrom als auch Wechselstrom unterschiedlicher Frequenz erzeugt werden. Dadurch wird, je nach Betriebsweise, ein Gleichfeld oder ein Wanderfeld induziert.

INNOVATIVE ANWENDUNGEN DER ELEKTROMAGNETISCHEN KINETIK

In der Schmelzmetallurgie steigen die Anforderungen an Produktqualität, Durchsatz und Produktivität stetig an. Elektromagnetische Systeme helfen dabei, diese neuen Anforderungen zu erfüllen. Im Folgenden werden innovative Anwendungsfelder für elektromagnetische Systeme vorgestellt.

Elektromagnetisches Rührsystem zur Integration in eine Bandgießanlage [5]

SMS Elotherm integrierte 2012 ein elektromagnetisches Rührsystem in eine neuentwickelte Bandgießanlage (BCT), einem Gemeinschaftsprojekt zwischen der Salzgitter Flachstahl GmbH, der Universität Clausthal und der SMS Siemag. Als Demonstrationsanlage zur Erprobung des Inline-Konzepts im industriellen Maßstab ausgelegt,

werden hier die über Jahre gewonnenen Erkenntnisse aus den Versuchsreihen an der Pilotanlage der TU Clausthal auf eine industriellen Ansprüchen genügende Produktionsleistung übertragen.

Ziel der Belt Casting Technology (BCT) ist die Herstellung endabmessungsnaher, biegespannungsfreier HSD®-Stahlbänder in Dicken von 8 bis 15 mm. HSD®-Stähle (High Strength and Ductility) weisen einen hohen Mangananteil auf und besitzen eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Verformbarkeit. Nach seiner Erstarrung unter Schutzgasatmosphäre kann das Band ohne erneute Erwärmung direkt zu Warmband verarbeitet werden.

Das elektromagnetische Rührsystem besteht aus zwei Rührspulen unterschiedlicher Charakteristik: einem sogenannten Querrührer, der die zügige und gleichmäßige Verteilung des Gießmaterials an die Bandkanten unterstützt und einem Längs- oder Dämpfungsrührer, der die Molekülbewegung der flüssigen Schmelze während des Erstarrungsvorgangs hemmt und somit für eine ebene Dicke des gegossenen Bandes und ungestörtes Kristallwachstum sorgt. Durch das Induzieren eines elektromagnetischen Feldes wird in beiden Fällen das kinematische Verhalten der Schmelze beeinflusst.

Das Ergebnis nach dem induktiven Dämpfungsrühren ist ein Stahlband mit geringer Dickenvarianz, also hoher Planheit, so dass in nachfolgenden Veredelungsstufen die Anzahl der Walzvorgänge reduziert und das Band direkt in die Fertigwalzstraße gefahren werden kann. Die Gesamtfertigungslinie wird dadurch nicht nur kürzer, sondern aufgrund der damit verbundenen Verbesserung der Ressourceneffizienz werden die Kosten für den Herstellungsprozess entsprechend geringer. Die Anlagenbetreiber können qualitativ hochwertiges HSD®-Stahlband zu wettbewerbsfähigen Konditionen produzieren.

Im Vergleich zur herkömmlichen Herstellung von Stahlblechen sind mit dem Bandgießverfahren CO₂-Einsparungen bis 60 % möglich. Das entspricht Einsparungen von 2,1 Giga-Joule/ t und von 170 kg CO₂/t Warmband.

In diesem Fall trägt die elektromagnetische Rührtechnik nicht nur zur nachhaltigen Ressourcenschonung und Reduzierung der Umweltbelastungen, sondern trägt zur Herstellung innovativer Produkte bei, die für den Einsatz im Leichtbau, für Offshore-Anwendungen oder die Chemie-Industrie benötigt werden.

Elektromagnetisches Abdichten des Zinkbades in Bandverzinkungsanlagen

In konventionellen Verzinkungslinien (CGL Continuous Galvanizing Lines) wird das Band über Rollen geführt, die direkt im Zinkbad positioniert sind. Dieses Verfahren hat mehrere Nachteile: Zu einem wird das Zinkbad mit Partikeln (Abrieb zwischen Führungsrolle und Band) kontaminiert,

zum anderem ist eine große Menge an Zink (über 200 t) notwendig, was den Wechsel deutlich erschwert. In der Regel finden sowohl der Schmelz- als auch der Beschichtungsvorgang in einem gemeinsamen Topf statt. Darüber hinaus limitiert die Nutzung mechanischer Komponenten (Führungsrollen) die Prozessgeschwindigkeit auf weniger als 180 m/min.

Bei innovativen Continuous Vertical Galvanising Lines (CVGL) wird das Band direkt senkrecht durch den Zinktopf geführt. Dementsprechend ist zwangsläufig eine Abdichtung der Austrittsöffnung am Zinktopfboden notwendig, um einen Austritt des flüssigen Zinks zu verhindern. Dazu werden an der Austrittsöffnung Induktionsspulen positioniert, die ein magnetisches Wanderfeld erzeugen, welches entgegen der Schwerkraft das Auslaufen der Zinkschmelze verhindert.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen im Wesentlichen in der nahezu doppelten Prozessgeschwindigkeit. Das Fehlen mechanischer Antriebs Elemente im Zinktopf erlaubt höhere Durchführgeschwindigkeiten von bis zu 300 m/min. Zudem ist das System insgesamt wartungsfreundlicher durch weniger mechanische Komponenten wie den Rollenführungen. Aufgrund der geringeren Größe des Zinktopfes, der in der Regel nur noch 5 t fasst, ist ein Wechsel des Topfes leicht möglich. Der Schmelz- und der Beschichtungsprozess finden in getrennten Einheiten statt, was auch der Schmelzqualität zu Gute kommt. Der höhere Reinheitsgrad der Schmelze, auch durch den fehlenden Abrieb, führt letztlich direkt zu einer gesteigerten Qualität der Beschichtung [6].

Elektromagnetische Strömungsbremse (Jet brake)

Bei der Stahlherstellung im Stranggießverfahren entstehen in der Kokille Strömungen und Turbulenzen, die Gießpulver und nichtmetallische Einschlüsse in den Strang einschleppen und dadurch die Qualität des Stranges beeinträchtigen. Obwohl eine Senkung der Gießgeschwindigkeit diese Strömungen und Turbulenzen mindern könnte, steht diese Maßnahme im Widerspruch zur Steigerung des Gießdurchsatzes. Um beide Anforderungen zu erfüllen, sind eine präzise Kontrolle der Strömung und deren Turbulenzen in der Kokille notwendig.

Die elektromagnetische Strömungsbremse stellt eine neue Entwicklung dar und wird sowohl zum Rühren als auch zum Bremsen von Flüssigstahl im Bereich des Tauchrohrs in der Kokille einer Stranggießanlage eingesetzt. Durch die leichte und kompakte Bauweise wird die oszillierende Masse reduziert und die Steifigkeit der Kokille erhöht. Die Kombination von elektromagnetischem Rühren und Bremsen eröffnet viele Einsatzmöglichkeiten zur gezielten Optimierung der Flüssigstahlströmung innerhalb der Kokille. Durch die spezielle Anordnung von vier bis sechs separaten Spulen werden hierbei insbesondere metallurgische

Produktverbesserungen, eine hohe Prozessgeschwindigkeit sowie Betriebssicherheit und minimale Investitions- und Betriebskosten für den Anlagenbetreiber gewährleistet.

Elektromagnetische Separation bei der Metallherstellung

Produktionsschlacken können nicht länger als Abfallprodukt betrachtet werden, sind aber selten als Rohstoff werthaltiger Metalle anerkannt. Durch die gezielte Abreicherung derartiger Metalle aus Produktionsschlacken können Ressourcen effizient eingespart und so ein wertvoller Beitrag zur Nachhaltigkeit geleistet werden [7].

Der Wirkungsgrad bei der Herstellung von Metallen über die schmelzmetallurgische Route ist traditionell sehr hoch. Dennoch können die entstehenden metallischen Schlacken noch einen hohen (bis zu 5 Gewichts-%) Restmetallgehalt enthalten. Um diesen Restmetallgehalt in den Schlacken weiter zu reduzieren und so die Ausbringung zu erhöhen, werden leistungsfähige Elektromagnete eingesetzt [8]. Ein außen angelegtes Magnetfeld führt dazu, dass die erzeugten und in der Schlacke verbliebenen Metall-/Steinröpfchen koagulierten und so deren optimales Absetzen ermöglicht wird [7].

Wie aus den bereits gezeigten Gleichungen (1) und (5) ersichtlich ist, geht die elektrische Leitfähigkeit in die Berechnung der Kraftwirkung ein. Die Leitfähigkeit ist für die in der Schlacke enthaltenen Partikel mit höherem Metallgehalt unterschiedlich zu der Restschlacke, so dass Separationskräfte entstehen. Nach Lennov und Kolin [9] lässt sich die Differenzkraft bestimmen, welche auf die Teilchen wirkt. Diese ist in negativer radialer Richtung orientiert:

$$\vec{F}_{em} = -\frac{3}{2} \frac{\sigma_m - \sigma_p}{2\sigma_m + \sigma_p} v_p \vec{f} \quad (9)$$

Die auf dem aufgezeigten physikalischen Zusammenhang beruhende elektromagnetische Separation ist ein innovativer Ansatz, um den Restmetallgehalt in der Schlacke um mehr als 60 % zu senken. Dies ist ein weiteres Beispiel für den nachhaltigen Einsatz elektromagnetischer Systeme, um die Prozessqualität und -geschwindigkeit zu erhöhen.

FAZIT

Seit vielen Jahrzehnten ist der Einsatz elektromagnetischer Rührverfahren Stand der Technik. Im Stranggießverfahren von Stahl, aber auch Nichteisenmetallen wie Aluminium, Kupfer und deren Legierungen, werden verschiedene induktive Rührkinematiken eingesetzt, um bei hoher Gießgeschwindigkeit gute Qualitäten hinsichtlich Gefügestruktur, Kernseigerungen und -rissen zu erzeugen.

Auch unterstützt durch innovative Umrichter, den flexiblen Leistungsversorgungen für elektromagnetische Pro-

zesse, haben sich auch neue Einsatzmöglichkeiten über das Strangrühren hinaus entwickelt. Dazu zählen vor allem Verfahren, die nachhaltig zu qualitativ hochwertigeren Produkten oder umweltfreundlicher Produktion stehen. Stellvertretend sei hier das Bandgießverfahren mit integrierten elektromagnetischen Systemen genannt.

Dieser Trend zur Steigerung der Produktionsmengen, Reduzierung der Fertigungsschritte oder Verbesserung der Produktqualität hält auch weiterhin an und innovative elektromagnetische Systeme zur kontrollierten Beeinflussung der Erstarrung flüssiger Schmelzen werden auch zukünftig dazu beitragen, nachhaltig verbesserte Produktionsprozesse zu ermöglichen.

LITERATUR

- [1] Spitzer, K.; Dubke, M.; Schwerdtfeger, K.: Metall Mater Trans B17(1), 119, (1986)
- [2] Ujiie, Y.; Maede, H.; Itoh, Y.; Ogibayashi; Seki, H.; Wada, K.; Itoh, Y.: Tetsu-to-Hagane: 67(8), 257 (1981)
- [3] Zok, E.; Schibisch, D.: Energieeffiziente Leistungsversorgung induktiver Härte- und Erwärmungsprozesse, EWI 03/12
- [4] Zok, E.: Elotherm Patent DE 4216 946 C2
- [5] Newsletter SMS group, Sonderausgabe Metec 2012, S. 50
- [6] Behrens, H. (et. al.); Brisberger, R.; Frommann, K.; Tenckhoff, B.; Hartung, H. G.: EP 0630 421 B1 Verfahren und Vorrichtung zur Schmelztauchbeschichtung eines Metallbandes
- [7] Maurell-Lopez, S.; Zander, M.; Böhlke, J.; Degel, R.; Friedrich, B.: Gewinnung von Kupfer aus metallurgischen Schlacken; Chemie Ingenieur Technik 2010, 82, No. 11
- [8] Langejürgen, M; Nacke, B.: Electromagnetic Induced Segregation of Cast Parts, International Scientific Colloquium, Modelling for Material Processing, Riga, June 8-9, (2006)
- [9] Lennov, D.; Kolin, A.: Theory of Electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic Forces Experienced by Spherical and Symmetrically Oriented Cylindrical Particles, J. Chem. Phys. 22, 683 (1954); <http://dx.doi.org/10.1063/1.1740149>

AUTOREN



Dipl.-Ing. **Robert Jürgens**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
r.juergens@sms-elotherm.de
Tel.: 02191/891-200



Dipl.-Wirt.-Ing. **Dirk M. Schibisch**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
d.schibisch@sms-elotherm.de
Tel.: 02191/891-300