FOTO: ???

Der Induktionsrinnenofen ist ein weit verbreitetes, bewährtes Aggregat zum Speichern und Gießen in Eisengießereien.

Untersuchung und Verbesserung des Betriebsverhaltens von Induktionsrinnenöfen durch Anwendung der Computersimulation

VON EGBERT BAAKE, HANNOVER, UND ANDRIS JAKOVICS, RIGA, LETTLAND

Der Induktionsrinnenofen (IRO) wird in Eisengießereien zum Warmhalten, Speichern, Überhitzen und Gießen der Schmelze verwendet. In Nichteisenmetallgießereien wird der IRO auch als Schmelzaggregat eingesetzt, wenn aus unterschiedlichen Gründen das elektrische Schmelzen vorteilhaft ist.

Der IRO besteht aus einem Ofenkessel und einem oder mehreren daran angeflanschten Induktoren (Bild 1). Der Rinneninduktor arbeitet nach dem Transformatorprinzip und besteht aus der primären Induktorspule, die auf einem geschlossenen Eisenkern angeordnet ist, sowie der aus Feuerfestmaterial geformten Schmelzrinne, die mit flüssigem Metall gefüllt die kurzgeschlossene Sekundärwicklung bildet. Aufgrund dieser Bauform weist der IRO einen vergleichsweise hohen Gesamtwirkungsgrad auf und ist damit bei kontinuierlicher Fahrweise besonders energiesparend und wirtschaftlich. Während des Betriebs wird in der Schmelze im Rinnenkanal ein hoher Strom induziert, der nicht nur Joulsche Wärme hervorruft, sondern im Zusammenwirken mit dem magnetischen Wechselfeld zu elektromagnetischen Kräften (Lorentz-Kräfte) führt. Hierdurch bildet sich im Rinnenkanal eine hochturbulente Strömung aus, die für den Wärmetransport aus dem Rinnenkanal in den Ofenkessel sorgt. Dieser ausreichende Wärmetransport ist für den sicheren Betrieb des Induktionsrinnenofens von großer Bedeutung. Durch zunehmende Ansatzbildung (Bild 2), also durch das Zuwachsen des Kanalquerschnitts insbesondere im Übergangsbereich vom Rinnenkanal in den Ofenkessel, wird der Wärmetransport unterdrückt, wodurch die Überhitzungstemperatur der Schmelze im Rinnenkanal ansteigt, was im Grenzfall zum Durchbruch der Zustellung führen kann und unbedingt vermieden werden muss.

KURZFASSUNG:

Zur Untersuchung der Temperatur- und Strömungsverteilung sowie des Wärme- und Stofftransports in der Schmelze von Induktionsrinnenöfen (IRO) und deren Einfluss auf die Bildung von Ansätzen an der feuerfesten Zustellung des Rinneninduktors wurden praxisnahe dreidimensionale transiente Computersimulationen durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass in den Rinnenquerschnitten elektromagnetisch angetriebene Strömungswirbel mit hohen lokalen Strömungsgeschwindigkeiten dominieren, die den intensiven Wärme- und Stoffaustausch innerhalb und entlang der Rinne bewirken. Im Vergleich dazu ist die integrale Durchströmungsgeschwindigkeit entlang der Rinne, die maßgeblich durch thermische Auftriebskräfte verursacht wird, um etwa eine Größenordnung kleiner und trägt somit nur geringfügig zum Wärme- und Stoffaustausch entlang des Rinnenkanals bei. Die integrale Transitströmung wird durch die unsymmetrische Temperaturverteilung entlang des Rinnenkanals verursacht. Diese Temperaturverteilung unterliegt sehr langperiodischen zeitlichen Schwankungen und lässt sich durch die Form des Rinnenkanals und des Induktorhalses, also des Übergangsbereichs vom Rinnenkanal zum Ofenkessel, gezielt beeinflussen.

Die aus langjähriger praktischer Erfahrung bekannten Ursachen für die Ansatzbildung beim Warmhalten und Gießen von Gusseisen im IRO werden durch die Simulationsergebnisse bestätigt. Es zeigt sich, dass neben vielen anderen Einflussfaktoren Ansätze vorzugsweise dort entstehen, wo die Kriterien
> relativ niedrige lokale Schmelzentemperaturen,
> hohe spezifische turbulente Energie der Schmelzenströmung und
> geringe mittlere Strömungsgeschwindigkeiten

in Kombination auftreten. Mit Hilfe der numerischen Simulationen wurden für verschiedene in Gießereien eingesetzte IRO diese typischen Bereiche identifiziert. Durch gezielte Veränderungen an der Kanal- und Halsgeometrie konnten Strömungs- und Temperaturverteilungen erreicht werden, die zur erheblichen Reduzierung der erwähnten kritischen Einflussfaktoren auf die Ansatzbildung führen, wodurch eine Verbesserung des Betriebsverhaltens hinsichtlich der Ansatzbildung zu erwarten ist.

Obwohl der Induktionsrinnenofen ein seit vielen Jahrzehnten bewährtes Aggregat zum Schmelzen, Warmhalten und Gießen von Metallen ist, existieren bis heute offene Fragen und Verbesserungspotentiale hinsichtlich des Wärme- und Stoffaustausches im Rinnenkanal selbst sowie zwischen dem Kanal und dem Schmelzbad - aber auch hinsichtlich der Standzeit des Rinneninduktors, die maßgeblich durch unterschiedliche Verschleißmechanismen wie Erosion, Infiltration und Bildung von Ansätzen an der feuerfesten Zustellung beeinflusst wird. Zur Untersuchung dieser Fragestellungen wurden numerische Simulationsberechnungen durchgeführt, die im Folgenden beispielhaft vorgestellt werden sollen.

Numerische Simulation und experimentelle Verifikation

Um den Wärme- und Stofftransport im IRO zu untersuchen und eine Verbesserung des Betriebsverhaltens zu ermöglichen, ist die transiente Schmelzeströmung unter Anwendung der Large-Eddy-Simulation (LES) für unterschiedliche industrielle IRO numerisch simuliert worden [1-3]. Bei diesen Berechnungen wurde in einem ersten Schritt unter Nutzung des kommerziellen Programmpaketes „Ansys" zunächst die elektromagnetische Feldverteilung, hervorgerufen durch die wechselstromdurchflossene Induktionsspule und die daraus resultierende elektromagnetische Kraftverteilung in der Schmelze, dreidimensional stationär bestimmt (Bild 3). Die räumliche Verteilung der elektromagnetischen Kraftdichte, die den Antrieb der Schmelzeströmung darstellt, wird als Eingangsgröße für die Berechnung der Strömungsverteilung im Programmpaket „Fluent" verwendet. Zusätzlich werden elektromagnetisch verursachte Wärmequellenverteilungen in der Schmelze berechnet, die wiederum die Ursache für das Temperaturfeld sind und thermische Auftriebskräfte aufgrund von Dichteunterschieden zur Folge haben. Die Gleichungen der Strömungs- und Temperaturfeldverteilungen sind hierbei gekoppelt.

Das dreidimensionale Simulationsmodell zur Berechnung der elektromagnetischen Feldverteilung umfasst alle elektrisch relevanten Bauteile des Rinnenofens, wie in Bild 4 zu sehen ist, also die Induktorspule, den Trafokern, den Kühlzylinder sowie die Schmelze in der Rinne und im unteren Bereich des Ofenkessels. Da der Ofen bezüglich der senkrechten Schnittebene spiegelsymmetrisch aufgebaut ist, ist es möglich, die Geometrie für die elektromagnetischen Berechnungen auf die Hälfte zu reduzieren. Beim dreidimensionalen Simulationsmodell zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeits- und Temperaturverteilung (Bild 4, rechte Seite) können keine Symmetrien genutzt werden, weil sich turbulente Strömungen, auch bei vollständiger geometrischer Symmetrie, nicht symmetrisch ausbilden. Für das Simulationsmodell zur Berechnung der Strömungsverteilung in der Schmelze können die Induktorspule, der Trafokern und der Kühlzylinder unberücksichtigt bleiben. Die verwendeten Simulationsmodelle und deren Ergebnisse wurden mit Hilfe vorhandener Ergebnisse aus Strömungsgeschwindigkeits- und Temperaturmessungen an

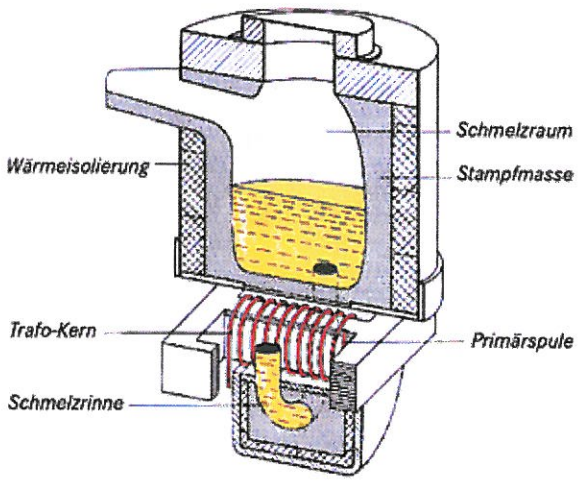

Bild 1: **Schematischer Aufbau eines einloopigen Induktionsrinnenofens.**

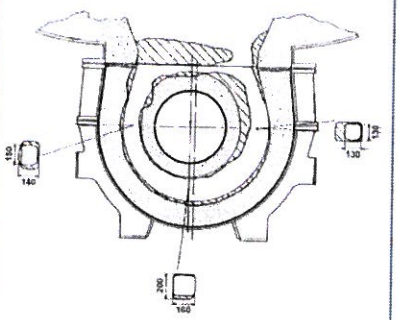

Bild 2: Beispiel für eine typische Ansatzbildung eines Rinneninduktors für das Speichern oder Gießen von Gusseisen.

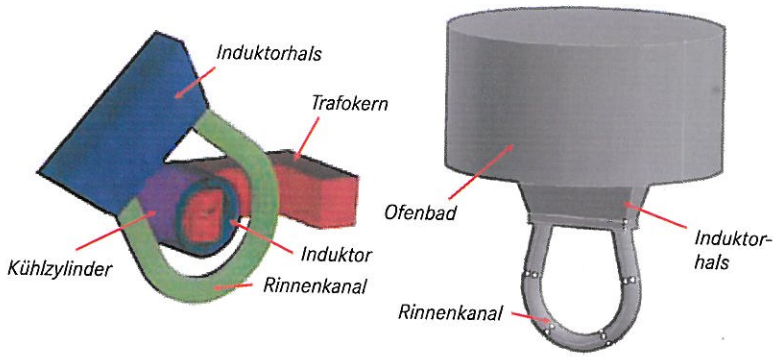

Bild 4: Beispiel für dreidimensionale Simulationsmodelle eines Induktionsrinnenofens zur elektromagnetischen Berechnung (Leistungs- und Kraftdichteverteilung) (linke Seite) sowie Strömungs- und Temperaturfeldverteilung (rechte Seite).

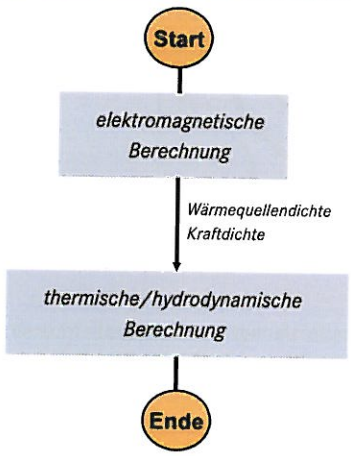

Bild 3: Ablaufdiagramm der elektromagnetischen und thermischen/hydrodynamischen Simulationsberechnungen für den Induktionsrinnenofen.

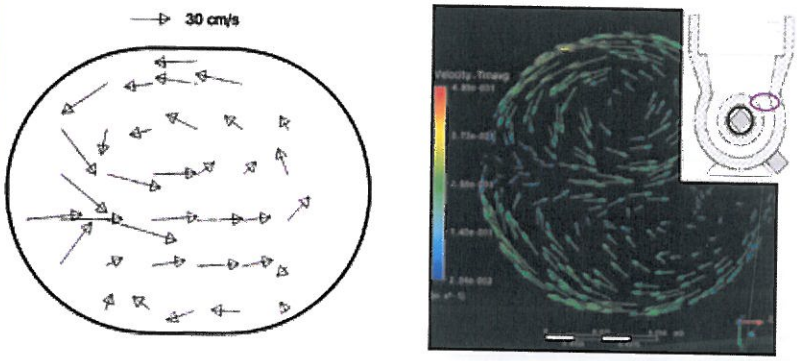

Bild 5: Beispiel für die zeitlich gemittelte gemessene (linke Seite) und berechnete (rechte Seite) Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Rinnenquerschnitt eines Induktionsrinnenofens.

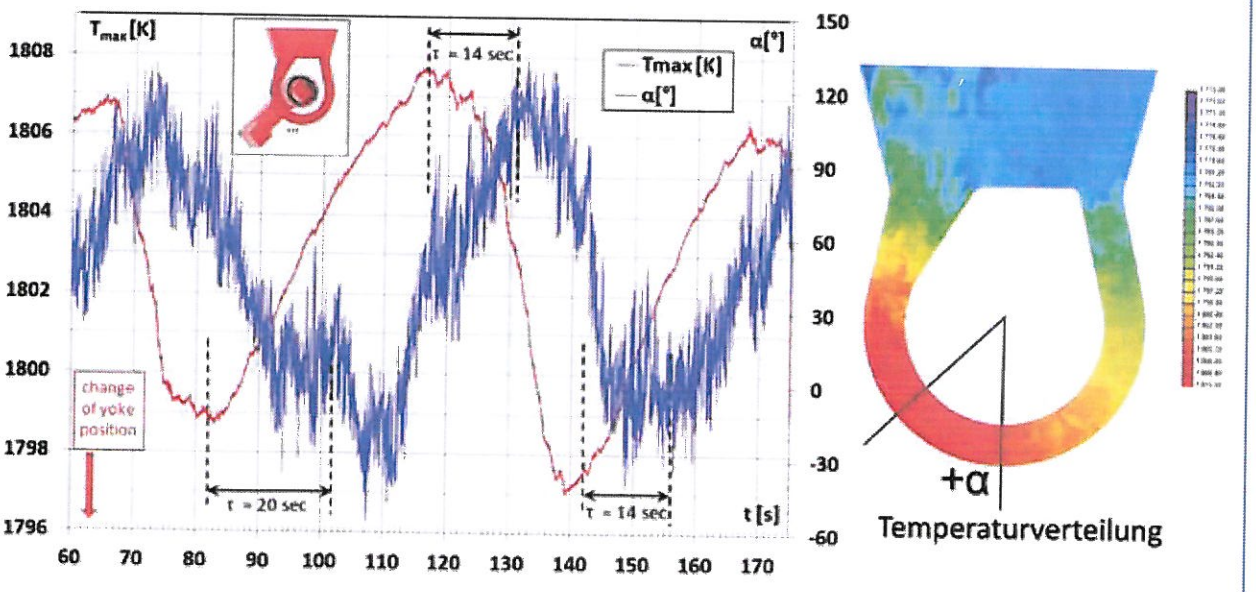

Bild 6: Verlauf des Temperaturmaximums und der Lage des Temperaturmaximums in Abhängigkeit von der Zeit (linke Seite) sowie die hieraus gemittelte Temperaurverteilung im Längsschnitt des Rinnenkanals einer einseitig aufgeweiteten Kanalgeometrie.

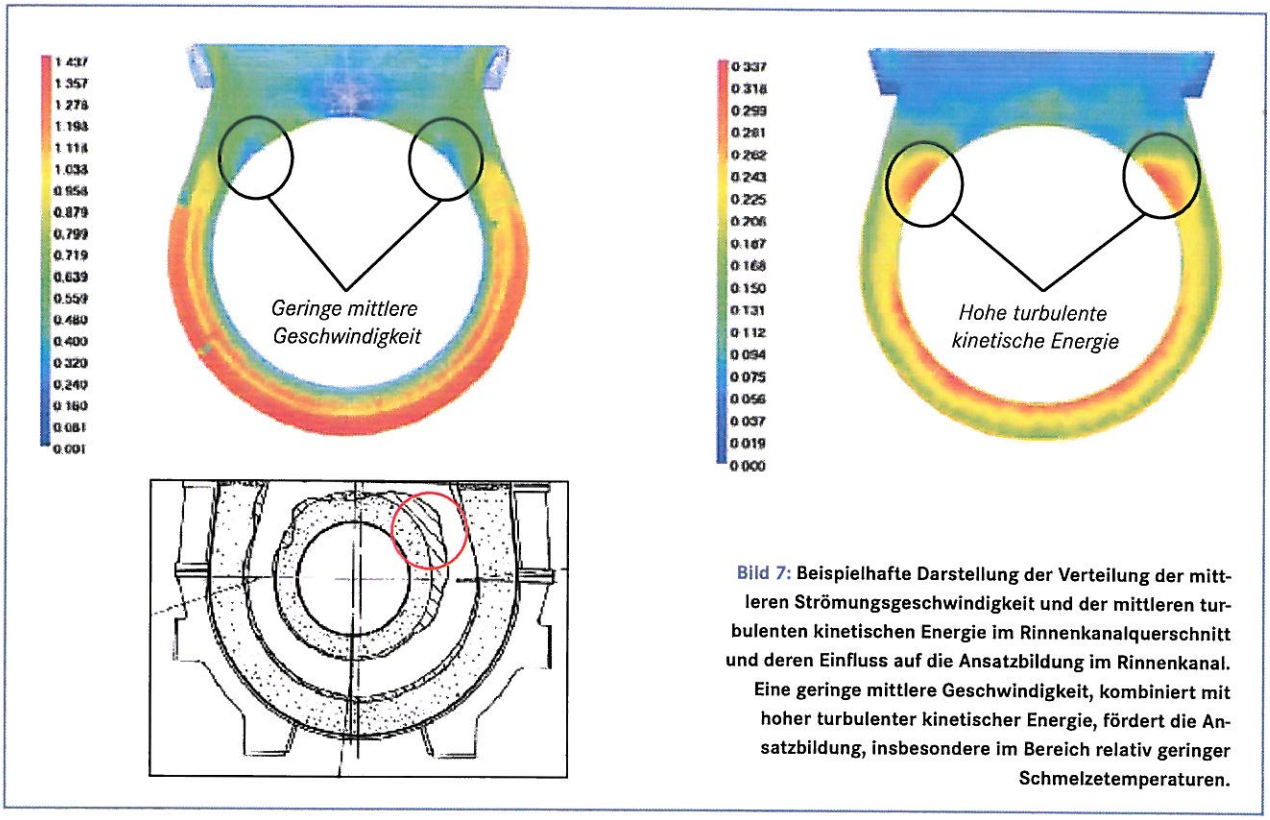

Bild 7: Beispielhafte Darstellung der Verteilung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der mittleren turbulenten kinetischen Energie im Rinnenkanalquerschnitt und deren Einfluss auf die Ansatzbildung im Rinnenkanal. Eine geringe mittlere Geschwindigkeit, kombiniert mit hoher turbulenter kinetischer Energie, fördert die Ansatzbildung, insbesondere im Bereich relativ geringer Schmelzetemperaturen.

verschiedenen IRO im industriellen Maßstab unter Verwendung von Wood Metall als Modellschmelze verifiziert [4].

Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Die Ergebnisse der dreidimensionalen transienten Large-Eddy-Simulation zeigen hochturbulente komplexe Strömungsstrukturen im Rinnenkanal selbst sowie im Übergangsbereich zum Ofenkessel. Im Bereich des Rinnenquerschnitts dominieren intensive Strömungswirbel mit hohen lokalen Strömungsgeschwindigkeiten, die durch elektromagnetische Lorentzkräfte angetrieben werden und den intensiven Wärme- und Stoffaustausch innerhalb und entlang der Rinne bewirken. Bild 5 zeigt hierzu die Gegenüberstellung einer gemessenen und berechneten charakteristischen Strömungsverteilung im Rinnenkanalquerschnitt, die durch typische Doppelwirbelstrukturen gekennzeichnet ist. Im Vergleich dazu ist die integrale Durchströmungsgeschwindigkeit entlang der Rinne, die maßgeblich durch thermische Auftriebskräfte verursacht wird, um mehr als eine Größenordnung kleiner und trägt somit nur geringfügig zum Wärme- und Stoffaustausch entlang des Rinnenkanals bei. Die integrale Transitströmung wird durch die unsymmetrische Temperaturverteilung entlang des Rinnenkanals verursacht. Diese Temperaturverteilung unterliegt langperiodischen zeitlichen Schwankungen und lässt sich systematisch durch die Konstruktion des Induktors sowie insbesondere durch die Form des Rinnenkanals und des Induktorhalses, also des Übergangsbereichs zum Ofenkessel, gezielt beeinflussen.

Die numerischen Untersuchungen haben erstmals gezeigt, dass transiente Simulationsberechnungen über mehrere Minuten erforderlich sind, um eine genaue Analyse der schwankenden Temperaturverteilungen im Rinnenkanal zu ermöglichen [5]. Dabei ist zu erkennen, dass bei einer symmetrischen Rinnengeometrie die Position und der Betrag der maximalen Übertemperatur entlang der Rinne zwischen beiden Rinnenästen sehr langperiodisch pendeln und die Vorzugsposition des Temperaturmaximums nur geringfügig durch die Lage des magnetischen Trafokerns und somit durch die Position der maximalen induzierten Leistungskonzentration beeinflusst werden kann. Dagegen führt eine unsymmetrische Rinne mit einseitig aufgeweitetem Halsbereich, die so genannte Trompetenrinne, zu einer relativen Stabilisierung der Lage des Temperaturmaximums auf der aufgeweiteten Seite des Kanals und somit im Mittel zu einer einseitig gerichteten integralen Durchströmung (Bild 6). Diese in Richtung der Kanalaufweitung gerichtete Transitströmung ist auch hinsichtlich der Vermeidung von Ansatzbildung vorteilhaft.

Aufgrund bereits früher durchgeführter Forschungsarbeiten [6] und langjähriger praktischer Erfahrungen ist bekannt, dass die Ansatzbildung beim Warmhalten und Gießen von Gusseisen im IRO von vielen Einflussfaktoren abhängt, aber insbesondere an den Stellen vorzugsweise auftritt, wo die Kriterien relativ niedrige Schmelzentemperaturen, hohe spezifische turbulente Energie der Schmelzenströmung und geringe mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in Kombination auftreten. Mit Hilfe der numerischen Simulationen wurden für verschiedene in Gießereien im Einsatz befindliche IRO die typischen Bereiche, in denen die Schmelzenströmung mehrere dieser Kriterien erfüllt, identifiziert und durch praktische Erfahrungen bestätigt. Hierzu zählen beispielsweise der Bereich zwischen den Hälsen des Rinnenkanals sowie die Stellen an der dem Induktor zugewandten Kanalseite bei den Ausgängen des Rinnenkanals (vergleiche Bild 2). Wie in Bild 7 beispielhaft dargestellt, sind diese lokalen Bereiche durch eine relativ geringe mittlere Strömungsgeschwindigkeit, die zu einer längeren Verweilzeit und Ansammlung von möglichen ansatzbildenden Oxidpartikeln führt, durch eine relativ hohe turbulente kinetische Energie, die das Anhaften vorhandener Oxidpartikel an der Kanalwand unterstützen, sowie durch relativ geringe lokale Schmelzetemperaturen, die das Ausscheiden von Oxidpartikeln begünstigen, gekennzeichnet.

Durch gezielte Veränderungen an der Kanal- und Halsgeometrie konnten Strömungs- und Temperaturverteilungen er-

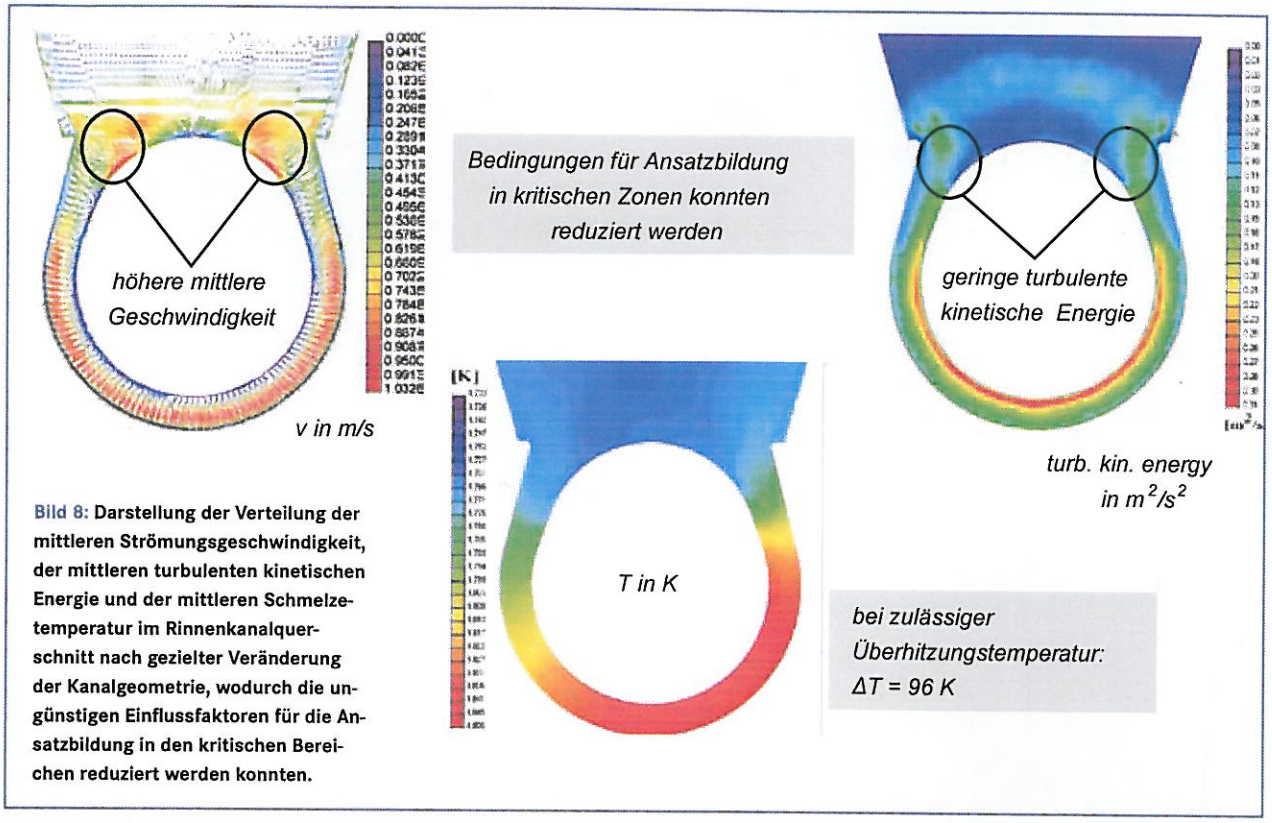

Bild 8: Darstellung der Verteilung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, der mittleren turbulenten kinetischen Energie und der mittleren Schmelzetemperatur im Rinnenkanalquerschnitt nach gezielter Veränderung der Kanalgeometrie, wodurch die ungünstigen Einflussfaktoren für die Ansatzbildung in den kritischen Bereichen reduziert werden konnten.

reicht werden, die zur erheblichen Reduzierung der erwähnten kritischen Einflussfaktoren auf die Ansatzbildung führen, wodurch eine Verbesserung des Betriebsverhaltens hinsichtlich der Ansatzbildung zu erwarten ist [1, 7]. Hierzu wurde beispielsweise der Bereich zwischen den Rinnenhälsen soweit wie praktisch ausführbar erhöht, wobei zur Vermeidung von verstärkten Turbulenzen möglichst runde Übergänge ohne Ecken und Kanten gewählt wurden (Bild 8). Dabei ist zu bedenken, dass eine möglichst turbulenzarme Rinnengeometrie hinsichtlich der Ansatzbildung sehr vorteilhaft ist, aber aufgrund des verringerten Wärmetransports aus Sicht der maximal zulässigen Übertemperatur der Schmelze in der Rinne stets ein Kompromiss sein wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch Anwendung der Computersimulation die Wärme- und Stofftransportvorgänge in der Schmelze von Induktionsrinnenöfen heute praxisnah berechnet werden können. Dabei zeigen sich komplexe Strömungsstrukturen im Rinnenkanal mit hohen lokalen Geschwindigkeiten bei einer sehr geringen integralen Durchströmung des Kanals sowie eine langperiodisch schwankende unsymmetrische Temperaturverteilung entlang des Rinnenkanals. Eine unsymmetrische Kanalgeometrie führt zur Stabilisierung der integralen Durchströmung und Temperaturverteilung. Durch eine optimierte Kanal- und Halsgeometrie ist eine Reduzierung der kritischen Einflussfaktoren auf die Ansatzbildung zu erreichen und somit eine Verbesserung des Betriebsverhaltens und der Standzeit des Rinneninduktors zu erwarten.

Diese Arbeit wurde teilweise gefördert durch die Stiftung Industrieforschung in Köln (Projekt S760), mit freundlicher Unterstützung der Industriepartner: ABP Induction Systems GmbH, Calderys GmbH & Co. OHG, Daimler AG, Georg Fischer GmbH & Co. KG (Mettmann), Georg Fischer GmbH (Leipzig), Otto Junker GmbH.

Prof. Egbert Baake, Institut für Elektroprozesstechnik der Leibniz Universität Hannover, Prof. Andris Jakovics, Laboratorium für Mathematische Modellierung von Umwelt- und Technologischen Prozessen, Universität Lettlands, Riga, Lettland

Literatur:

[1] Langejürgen, M.: Entwicklung und Anwendung eines neuen Verfahrens zur Berechnung turbulenter Strömungen in Induktions-Rinnenöfen. Sierke Verlag, 2009.
[2] GIESSEREI 96 (2009), [Nr. 10], S. 34-41.
[3] Magnetohydrodynamics 47 (2011), S. 399-412.
[4] Eggers, A.: Untersuchungen der Schmelzenströmung und des Wärmetransports im Induktions-Rinnenofen. Dissertation, Universität Hannover, 1993.
[5] Magnetohydrodynamics 46 (2010), [Nr. 4], S. 461-474.
[6] Drewek, R.: Verschleißmechanismen in Induktions-Rinnenöfen für Gusseisen und Aluminium. Fortschritt-Berichte VDI, Düsseldorf, 1996.
[7] Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 30 (2011), [Nr. 5], S. 1637-1650.

ANZEIGE, 1/8, 174 x 30