

Verbesserte metallurgische Prozesse durch moderne Simulationstechnik

Improved metallurgical processes through modern simulation technique

Hans-Jürgen Odenthal, Carl-Henning Rexroth, Martin Sommerfeld, Andreas Ludwig, Egbert Baake und André Thess

Der VDEh-Arbeitskreis „Strömungsmechanik und Strömungssimulation“ wurde im Jahr 2007 gegründet, ist dem Ausschuss für metallurgische Grundlagen zugeordnet und besteht aus 30 Mitgliedern. Der Arbeitskreis beschäftigt sich mit der Anwendung numerischer Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) in der metallurgischen Verfahrenstechnik. Die dabei eingesetzten Methoden werden hinterfragt, aktuelle strömungs- und wärmetechnische Probleme im Stahlwerk diskutiert und der Informationsaustausch zwischen den Mitgliedern gefördert. Im Folgenden werden einige der bearbeiteten Themen vorgestellt.

The VDEh working group "Fluid Mechanics and Flow Simulation", founded in 2007, is associated with the Committee on Metallurgical Fundamentals and consists of 30 members. The working group is concerned with the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the field of metallurgical process engineering. The methods used are analyzed, current flow related problems in steelworks are discussed, and the exchange of information between the group members is encouraged. In the following some of the topics the group recently worked on are presented.

CFD-Simulationen sind ein unverzichtbares Werkzeug bei der Auslegung von Anlagen zur Stahlerzeugung und der Entwicklung neuer Technologien. Sie dienen der Verbesserung des Prozessverständnisses und erhöhen die Anlagensicherheit und -verfügbarkeit. Die Fragestellungen betreffen fast ausschließlich heiße, zeitlich veränderliche, turbulente und mehrphasige Strömungen von Schmelzen und/oder Gasen, deren Simulation äußerst komplex und rechenintensiv ist, Bild 1. Die meisten metallurgischen Anlagen sind – im Gegensatz zu strömungstechnischen Anwendungen im Flugzeug-, Fahrzeug- oder Turbinenbau – nicht strömungsoptimiert, da robuste, kostengünstige Ausführungen und nicht minimale Druckverluste oder ablösungsfreie Strömungen im Vordergrund stehen. Dadurch entstehen Strömungsphänomene, die für die CFD eine enorme Herausforderung darstellen.

Den Simulationen metallurgischer Prozesse sind wegen vereinfachender Modellbildungen und fehlender Stoffdaten bei hohen Temperaturen derzeit noch gewisse Grenzen gesetzt. Auch die klassische Parallelisierung durch Zerlegung des Rechengebietes, wie sie z. B. in der Formel-1-Technik eingesetzt wird, ist bei metallurgischen Fragestellungen nicht immer mit einer deutlichen Reduktion der Rechenzeit verbunden. Dies liegt daran, dass die Effektivität bei der Parallelisierung von vielen gekoppelten chemisch-physikalischen Modellen bei kleinen Gittern wesentlich schlechter ist als bei

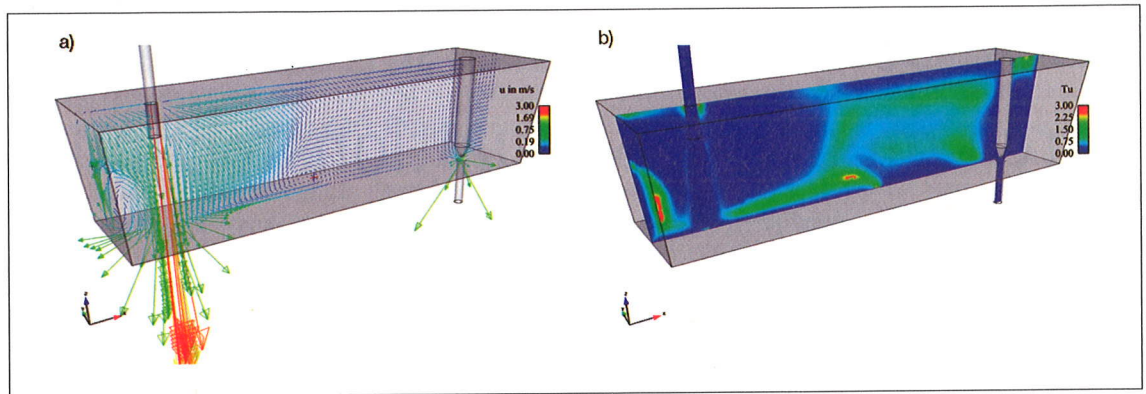


1

Beispiel für eine komplexe metallurgische Strömung: Chargierung des 135-t-AOD-Konverters bei SBGC Shanghai No. 1 Iron & Steel Ltd.

Example of a complex metallurgical fluid flow: charging of the 135-t AOD converter at SBGC Shanghai No 1 Iron & Steel Ltd

Dr.-Ing. **Hans-Jürgen Odenthal**, Entwicklungsingenieur, SMS Demag AG, Düsseldorf, Deutschland; Dr.-Ing. **Carl-Henning Rexroth**, Manager Customer Support, Ansys Continental Europe, Darmstadt, Deutschland; Prof. Dr.-Ing. **Martin Sommerfeld**, Institutsleiter, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle, Deutschland; Prof. Dr.-Ing. **Andreas Ludwig**, Institutsleiter, Lehrstuhl für Simulation und Modellierung metallurgischer Prozesse, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich; Prof. Dr.-Ing. **Egbert Baake**, Akademischer Direktor, Institut für Elektroprozessentechnik, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland; Prof. Dr.-Ing. **André Thess**, Institutsleiter, Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Deutschland.



2

CFD-Simulation für das Wassermodell eines 16-t-Einstrangverteilers mit dem Solver Ansys CFX; stationäre Rechnung, SST $k-\omega$ -Modell mit automatischer Wandbehandlung und schubspannungsfreier Wand an der freien Oberfläche, a) Geschwindigkeitsverteilung, b) Turbulenzverteilung

CFD simulation for the water model of a 16-t single-strand tundish using the Ansys CFX solver; steady-state calculation, SST $k-\omega$ model with automatic wall treatment and shear stress-free wall at the free surface, a) velocity distribution, b) turbulence intensity distribution

großen Gittern mit wenigen einfachen Modellen. Bei metallurgischen Strömungen wird die Kopplung der Lösungen in den Teilrechengebieten auch in absehbarer Zeit einen limitierenden Faktor für die Berechnung aller relevanten Aspekte darstellen.

Es stellt sich auch die Frage nach der Zuverlässigkeit der Rechenergebnisse. Turbulenzeffekte beeinflussen massiv die Strömung, sie können aber wegen der notwendigen räumlichen und zeitlichen Auflösung nicht direkt berechnet, sondern müssen durch empirische Ansätze modelliert werden. Hinsichtlich deren Gültigkeit gibt es nur vage Kriterien, sodass bei komplexen Strömungen lediglich der Vergleich mit Messwerten über die Brauchbarkeit der CFD-Resultate Aufschluss geben kann. Einerseits steht in CFD-Programmen zwar eine Vielzahl empirischer Turbulenzmodelle zur Verfügung, andererseits gibt es auch viele numerische Parameter, die nicht nur die Konvergenz, sondern auch das Ergebnis selbst beeinflussen.

Neuer Arbeitskreis gegründet

Der VDEh-Ausschuss für metallurgische Grundlagen hat in der Sitzung des Arbeitsausschusses im Januar 2007 den Arbeitskreis „Strömungsmechanik und Strömungssimulation“ eingerichtet (Leitung: H.-J. Odenthal, Geschäftsführung: R. Fandrich). Das Gremium soll die in den letzten Jahren im Bereich der Metallurgie stark expandierende CFD-Methode sowohl hinsichtlich der Ansätze zur Strömungsphysik als auch der Lösungsmethoden der aufgestellten Gleichungssysteme kritisch hinterfragen und ihr Potenzial für die Entwicklung der metallurgischen Prozesstechnik bewerten. Dazu werden auch die derzeitigen Methoden der physikalischen Simulation und deren Nutzen bei der Validierung von CFD-Ergebnissen beurteilt. Die Akzeptanz der metallurgischen Strömungsmechanik soll gefördert und die

entsprechenden Systemkenntnisse in der Metallurgie weiter verbreitet werden. Ausgewiesene Experten auf dem Gebiet der numerischen Methoden werden als Sachverständige und Gäste laufend in die Arbeit mit einbezogen.

Die Ziele des Arbeitskreises sind:

- Etablierung der Strömungsmechanik in der metallurgischen Prozesstechnik und Einbringung der Simulationsergebnisse in die betriebliche Praxis,
- Kritische Hinterfragung der numerischen und physikalischen Methoden der Strömungsmechanik und Aufklärung von Disparitäten zwischen theoretischen bzw. experimentellen Ergebnissen und Betriebserfahrungen,
- Förderung des Erfahrungs- und Informationsaustausches zwischen den AK-Mitgliedern aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und der Stahlindustrie; Weiterbildung der AK-Mitglieder durch Vertiefung der CFD-Kenntnisse,
- Aufbau eines Informationsnetzes bzw. einer Datenbank „Metallurgische Strömungstechnik“,
- Präsentation und Verbreitung aktueller Arbeiten zur metallurgischen Strömungstechnik auf Konferenzen und Tagungen,
- Anregung zu FuE-Projekten, Betriebsversuchen und Softwareentwicklungen.

Derzeit sind rd. 30 Mitglieder aus der Industrie und Forschungseinrichtungen im Arbeitskreis tätig:

- Amepa GmbH, Aachen
- Ansys Germany GmbH, Darmstadt
- Corus, Research Development and Technology, IJmuiden, Niederlande
- AG der Dillinger Hüttenwerke, Dillingen
- Johannes-Kepler-Universität Linz, Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung, Linz, Österreich

- Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektroprozessertechnik, Hannover
- Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik, Halle
- Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Simulation und Modellierung metallurgischer Prozesse, Leoben, Österreich
- RHI AG, Technology Center, Leoben, Österreich
- RWTH Aachen, Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, Aachen
- Saarstahl AG, Forschung und Zentrales Qualitäts- und Prüfwesen, Völklingen
- Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg
- SMS Demag AG, Zentrale Entwicklung, Düsseldorf
- Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Eisen- und Stahltechnologie, Freiberg
- Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanik und Fluidodynamik, Freiberg
- Technische Universität Clausthal, Institut für Metallurgie, Clausthal
- Technische Universität Clausthal, Institut für Technische Mechanik, Clausthal
- Technische Universität Ilmenau, Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Ilmenau
- ThyssenKrupp Steel AG, Physikalische Technologie, Duisburg
- VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Düsseldorf
- voestalpine Stahl GmbH, Linz, Österreich.

Der Arbeitskreis tagt zweimal im Jahr und berichtet in den Unterausschüssen für physikalische Chemie und metallurgische Verfahrensentwicklung über die erreichten Ziele. Einige der Themen, die während der bisherigen Sitzungen in Düsseldorf (3 x), Aachen und Leoben behandelt wurden, werden im Folgenden vorgestellt.

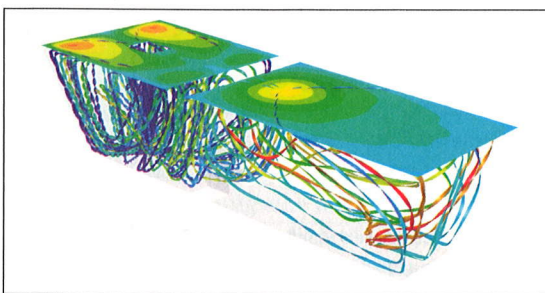
CFD-Benchmark für einen Stranggießverteiler

In einem arbeitskreisinternen CFD-Benchmark untersuchten zehn Teilnehmer (Ansys Germany, Corus, RHI, RWTH Aachen – Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, SMS Demag (2 x), ThyssenKrupp Steel, Univ. Freiberg – Institut für Mechanik und Fluidodynamik, Univ. Halle-Wittenberg – Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik, Univ. Linz – Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung) den Einfluss unterschiedlicher Lösungsstrategien und CFD-Parameter auf die Strömungsstruktur im Wassermodell eines 16-t-Einstrangverteilers. Der Verteiler wurde gewählt, da die dominierenden Strömungsstrukturen einerseits überschaubar sind und andererseits 3-D-LDA-Messdaten (LDA: Laser Doppler Anemometry) vorlagen. Ziel war es, die CFD-Simulation als „Blind Test“ durchzuführen, bei der nur die Verteilergeometrie, der Volumenstrom am

Schatten- und Tauchrohr sowie die Anzahl von 500 000 Gitterzellen festgelegt waren. Alle übrigen Lösungsstrategien und Parameter konnten von den Teilnehmern frei gewählt werden. Neben den Strömungsstrukturen wurde auch die RTD-Verteilung (RTD: Residence Time Distribution) bewertet. Darauf aufbauend wurden Anhaltspunkte zum Einfluss der CFD-Software, Turbulenzmodelle, Wandgesetze, Diskretisierungsmethoden etc. auf die simulierte Strömung abgeleitet. Ein solcher CFD-Benchmark wurde im Bereich der metallurgischen Prozesstechnik erstmals initiiert.

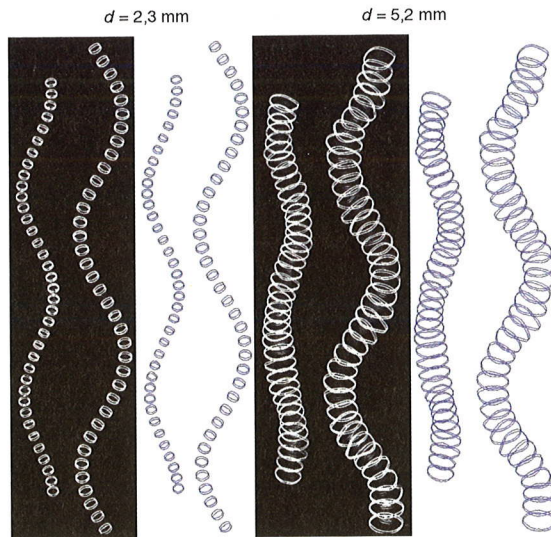
Obwohl der Verteiler eine senkrechte Symmetrieebene aufwies, modellierten alle Teilnehmer die gesamte Geometrie. Dies verdeutlichte, dass die verfügbare Rechenleistung für Gitter mit Größenordnungen von ca. 1 bis 2 Mio. Zellen heute keinerlei Restriktion mehr darstellt. Zur Vernetzung wurden Gambit (5 x), Icem (4 x) und CFX-Mesh (1 x) verwendet. Als CFD-Code kamen Ansys Fluent (6 x), OpenFoam (2 x), CFX (1 x) und Fastest3D (1 x) zum Einsatz, wobei die zuletzt genannte Software eine Eigenentwicklung aus dem Hochschulbereich war. Die Hälfte der User verwendete zur Lösung des Gleichungssystems einen Solver doppelter Genauigkeit.

Unterschiede ergaben sich u. a. bei der Wahl der zeitlichen Formulierung der Strömung, des Turbulenzmodells, des Wandgesetzes, der freien Oberfläche und der Diskretisierungsmethode. Alle CFD-Codes sagten die großräumige Strömungs- und Turbulenzstruktur im Verteiler, und darauf aufbauend auch die RTD-Verteilung, mit guter Genauigkeit vorher, Bild 2. Generell lieferten (U)RANS-Simulationen (URANS: Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) mit dem Realizable k - ϵ -Turbulenzmodell oder dem RSM (Reynolds Stress Model) gute Näherungen der laseroptisch vermessenen Strömung im Wassermodellverteiler. Eine zusätzlich

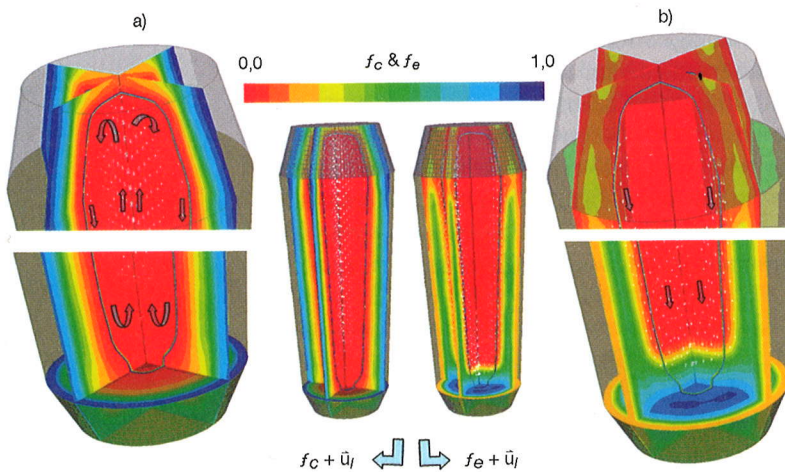


3

CFD-Simulation für einen 3-t-Stranggießverteiler mit dem Solver Ansys Fluent; stationäre Rechnung, k - ϵ -Modell mit Standard-Wandbehandlung; dargestellt sind der Turbulenzgrad an der Oberfläche sowie Bahnlinien der Strömung mit Aufenthaltszeiten (Farbe) und lokaler Verdrillung
 CFD simulation for a 3-t tundish using the Ansys Fluent solver; steady-state calculation, k - ϵ model with standard wall function; the turbulence intensity at the free surface and the coloured path lines for residence time as well as local spin are shown



4
Stereoskopisch gemessenes Aufstiegsverhalten einer kleinen Blase (Durchmesser $d = 2,3 \text{ mm}$) und einer großen Blase ($d = 5,2 \text{ mm}$) in Wasser
Stereoscopically measured rising behaviour of a small bubble (diameter $d = 2.3 \text{ mm}$) and a large bubble ($d = 5.2 \text{ mm}$) in water



5
Mehrphasen-Erstarrungssimulation eines industriellen Stahlblockgusses, bei dem zwischen raumfesten stängelkristallinen und bewegten globularen Erstarrungsvorgängen unterschieden wird; a) Anteil der stängelkristallinen Phase zusammen mit der Konvektionsströmung in der Schmelze; b) Anteil der globularen Phase und deren Absinken in den unteren Bereich des Gussblockes. Die Dynamik der Schmelzenströmung in Wechselwirkung mit der Kristallit-sedimentation ist maßgeblich verantwortlich für die in großen Gussblöcken auftretende Makroseigerung

Multiphase modelling of the solidification process in a steel ingot; the solidification behaviours of the stationary columnar trunks and the moving globular equiaxed crystals are different; a) volume fraction of the columnar phase together with the convection flow of the melt; b) volume fraction of the globular equiaxed phase together with the sinking velocity field of the equiaxed crystals. The dynamics of the crystal sedimentation and its interaction with the convection flow play a decisive role in the formation of the macrosegregation in the large industry ingots

durchgeführte LES (Large Eddy Simulation) eines Teilnehmers ergab eine genauere Verteilung der Turbulenz und eine, wenn auch geringfügig höhere, Genauigkeit beim RTD-Verlauf. Die Wahl der Randbedingung für die freie Oberfläche, d. h. der Einsatz einer schubspannungsfreien Wand anstelle der Symmetriebedingung, zeigte hinsichtlich der Position des Rezirkulationsgebietes eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten und hatte darüber hinaus einen positiven Einfluss auf die Strömungs- und Turbulenzsituation.

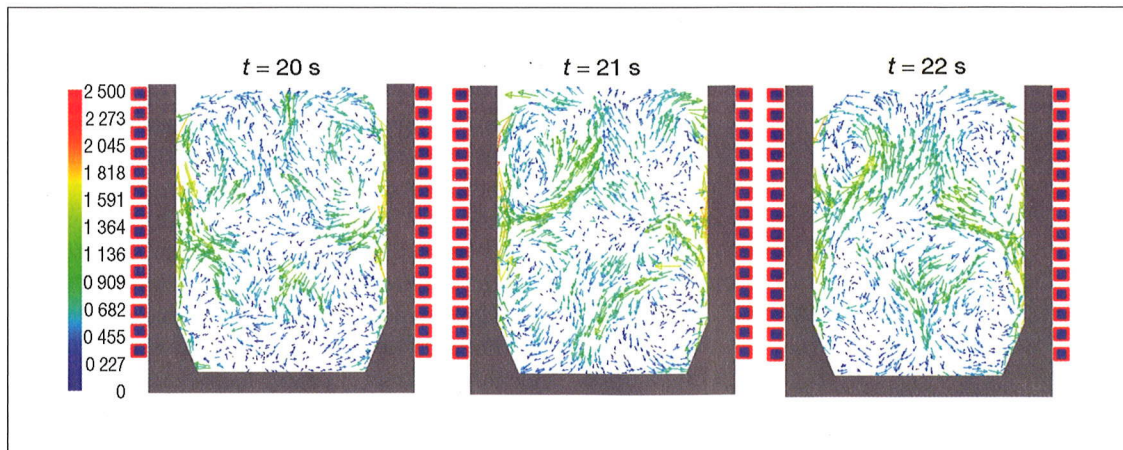
Die Strömungsstruktur mit rezirkulierenden Zonen und einem durch den Verteiler laufenden Doppelwirbel war relativ komplex, sodass beim CFD-Benchmark eine nicht so hohe Genauigkeit erwartet werden konnte wie etwa bei strömungsoptimierten Anwendungen im Turbinenbau, wo die Genauigkeit häufig im Bereich weniger Prozent liegt. Insgesamt lagen die Abweichungen aller Simulationen, sowohl untereinander als auch gegenüber der Messung, im akzeptablen Bereich. Die Ergebnisse des CFD-Benchmarks werden in [1] publiziert. Derzeit wird der CFD-Benchmark auf den Originalverteiler mit Schmelze erweitert (Teil 2).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine CFD-Simulation für metallurgische Strömungen immer dann notwendig ist, wenn sich der reale Prozess einer direkten Untersuchung entzieht und die zu erwartende Änderung der Zielgröße groß ist. Parameterstudien, bei denen eine Optimierungsmaßnahme nur sehr kleine strömungs- und wärmetechnische Änderungen bewirkt, sind mit höheren Rechenfehlern behaftet. Zu bedenken ist, dass solche Änderungen auch während des Betriebs im Stahlwerk kaum nachvollziehbar sind.

Turbulenzmodellierung

Die Transporteigenschaften metallischer Schmelzen werden durch die Turbulenz beeinflusst. Turbulente Strömungen sind durch hochfrequente, stochastische Schwankungen der Strömungsgrößen geprägt. Im Vergleich zur laminaren Strömung ist ein deutlich höherer Massen-, Impuls-, Energie- und Stoffaustausch die Folge. Die großen Wirbel treten in Wechselwirkung und erzeugen durch gegenseitige Streckung eine Wirbelkaskade in Richtung immer kleinerer Abmessungen. Die Wirbelkaskade endet bei den kleinsten Wirbeln, die durch viskose Reibung im Fluid gebremst und vernichtet werden. Die Kaskade wandelt Bewegungsenergie in thermische Energie.

Prinzipiell lassen sich turbulente Strömungen direkt berechnen, wenn die räumliche und zeitliche Diskretisierung so gewählt werden, dass die dissipativen Wirbel erfasst sind. Der Rechenaufwand steigt jedoch exponentiell mit der Reynolds-Zahl ($\sim Re^{9/4}$) an und liegt bereits bei kleinen Reynolds-Zahlen in der Größenordnung von 10^7 Gitterzellen und 10^5 Zeitschritten. Die DNS (Direkte Numerische Simulation) kommt daher auch bei gleich bleibender Steigerung der Rechenleistung



6

Dreidimensionale instationäre LES der Geschwindigkeitsverteilung in einem industriellen Induktionstiegelofen
 Three-dimensional transient LES of the velocity distribution in an industrial induction crucible furnace

frühestens in etwa 20 bis 30 Jahren für technische relevante Probleme in Frage.

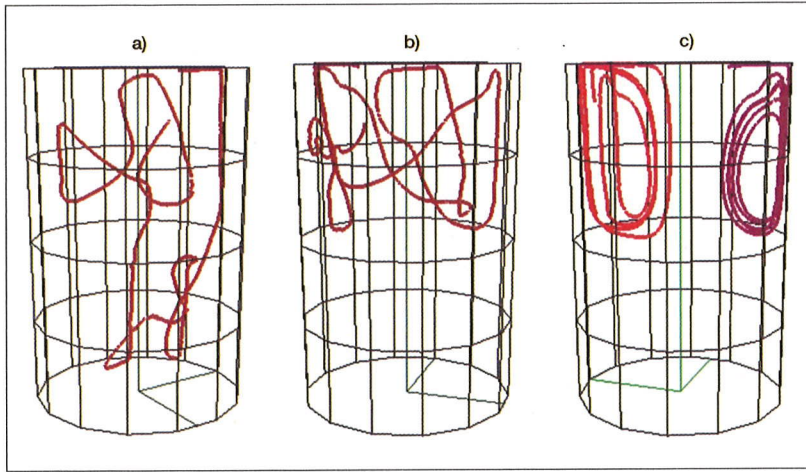
Die Turbulenz wirkt wie eine zusätzliche Diffusion im Fluid. Innere Reibung und Wärmeleitung steigen lokal auf das 10- bis 100 000-fache der laminaren Stoffwerte an. Diese Analogie liefert einen Ansatz zur Modellierung der Turbulenz. Hierbei wird das Strömungsfeld in Mittel- und Schwankungswerte aufgeteilt. Man erhält die RANS-Gleichungen, die einen zusätzlichen symmetrischen Tensor enthalten, die sogenannten Reynolds-Spannungen. Mit den RANS-Gleichungen lässt sich das Phänomen der Turbulenz beschreiben, ohne die Zeit- und Längenskalen der Wirbelkaskade explizit auflösen zu müssen. Allerdings ist das Gleichungssystem nicht mehr geschlossen, d. h., es existieren mehr Unbekannte als Gleichungen. Auf der Basis der Dimensionsanalyse müssen daher neue Transportgleichungen für die sechs unabhängigen Reynolds-Spannungen und die lokale Dissipationsrate abgeleitet werden. Die resultierenden Reynolds-Spannungsmodelle (RSM) sind potenziell genau, büßen jedoch durch zahlreiche Modellierungsannahmen viele ihrer theoretischen Vorteile wieder ein [2].

Aus diesem Grund haben sich die Zwei-Gleichungs-Turbulenzmodelle als Industriestandard etabliert. Sie nutzen die Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie k und deren (spezifische) Dissipation ε (ω) und berechnen daraus eine lokale Wirbelviskosität, sodass zusammen mit dem Boussinesq-Ansatz die Reynolds-Spannungen bestimmt werden können. Dabei werden turbulenter Energie- und Speziestransport analog zum Impulstransport behandelt. Mithilfe turbulenter Prandtl- und Schmidt-Zahlen wird die Wirbelviskosität in die entsprechenden turbulenten Diffusionskoeffizienten umgerechnet. Der Modellierungspfad über die k - ε - bzw. k - ω -Modelle verbindet für viele Anwen-

dungen hohe Wirtschaftlichkeit mit hinreichender Genauigkeit [3; 4].

Im Vergleich zur freien Strömung ändert sich die Turbulenz in Wandnähe; die turbulenten Schwankungen werden dort gedämpft. Um diese Vorgänge zu erfassen, wird die Grenzschicht entweder modelliert oder aufgelöst. Bei der Modellierung wird der Wandbereich bis weit in die logarithmische Übergangsschicht von nur einer Wandzelle abgedeckt. Semiempirische Wandfunktionen für diese Wandschicht verknüpfen Randbedingungen und Kernströmung und liefern Werte für Wandschubspannung und Wärmeübergang, ohne die wandnahen Geschwindigkeits- und Temperaturprofile auflösen zu müssen. Für die wandnächste Zelle ist zu beachten, dass der Zellmittelpunkt in der logarithmischen Übergangsschicht liegt, d. h. ein dimensionsloser Wandabstand von $y^+ = 30$ bis 300 erreicht wird. Diese Art der Modellierung ist empfehlenswert, wenn die Strömung an glatten oder gleichmäßig rauen Wänden entweder vollständig anliegt, massiv ablöst oder Designvarianten qualitativ zu bewerten sind. Mit größerer Detailgenauigkeit muss gearbeitet werden, wenn die Grenzschichtströmung eine hohe Dynamik besitzt. Dies ist etwa der Fall, wenn die Strömung infolge feiner Wandrippen ein Muster kleinster lokaler Ablösezone entlang der Wand aufweist oder Wandstrahlen mit Pralleffekten eingesetzt werden. Hier wird mit Grenzschichtauflösung gearbeitet, wobei der Zellmittelpunkt der wandnächsten Zelle bei $y^+ = 1$ liegen sollte und bis zum Rand der logarithmischen Übergangsschicht bei $y^+ \approx 300$ mindestens 10 Gitterzellen platziert werden müssen. Beide zuvor genannten Verfahren erfordern geeignete Maßnahmen im Turbulenzmodell [5].

Für die k - ε -Turbulenzmodelle werden spezielle Dämpfungsfunktionen eingeführt, die die Gleichungsterme in der Grenzschicht, d. h. bei niedriger Turbulenz-Rey-



7

Beispiele einer Simulation des Teilchentransports (particle tracking) in einem Induktionstiegelofen: a, b) transiente Darstellung, c) zeitlich gemittelte Darstellung

Examples of the simulation of particle tracking in an induction furnace: a, b) transient representation, c) time-averaged representation

nolds-Zahl, gezielt verändern. Diese Low-Re- k - ϵ -Modelle sind meist für bestimmte Strömungstypen optimiert, numerisch äußerst sensibel und für technische Anwendungen eher ungeeignet.

Ein stabileres Verfahren ist die Kombination modifizierter Zwei-Gleichungs- oder RSM-Modelle mit erweiterten Wandfunktionen. Ein zusätzlicher Vorteil ist hier die Toleranz gegenüber dem y^+ -Kriterium, sodass Rechnungen mit Grenzschichtauflösung gröber als $y^+ = 1$ und sogar mit grob-fein-gemischten Grenzschichtnetzen möglich sind. In Ansys Fluent wird diese Technik z. B. als Enhanced Wall Treatment bezeichnet [6].

Im Gegensatz zu k - ϵ -Modellen beschreiben k - ω -Modelle die wandnahe Turbulenz bei Grenzschichtauflösung. Um diese Modelle für die Grenzschichtmodellierung auf größeren Netzen tauglich zu machen, sind sie bereits mit erweiterten Wandfunktionen kombiniert. Es existieren zahlreiche Weiterentwicklungen, die für metallurgische Anwendungen eine hohe Genauigkeit erzielen. Als besonders leistungsfähig und numerisch gutmütig hat sich das Realizable k - ϵ - und das SST k - ω -Modell (Shear Stress Transport) erwiesen. Nach aktuellem Kenntnisstand bietet Letzteres Genauigkeitsvorteile bei vergleichsweise ungestörter Kernströmung und hoher Dynamik in der Wandgrenzschicht. Diesen Zustand findet man etwa beim Überströmen verrippter Oberflächen. Für stark umgelenkte und gescherte Kernströmung liefert das Realizable k - ϵ -Modell sehr verlässliche Ergebnisse.

Eine zusehends beliebtere Methode ist die LES [7]. Die großen anisotropen Turbulenzwirbel, die den Hauptanteil an Masse, Impuls und Energie transportieren, werden direkt und ohne jegliche Vereinfachung berechnet, während ein einfaches algebraisches Modell die Rückwirkung der kleinen isotropen Turbulenzwirbel, die nicht durch das Gitter aufgelöst werden, auf die großen Wirbel

berücksichtigt. Derartige Simulationen erfordern feine Gitter und kleine Zeitschritte. Die Ergebnisse hängen stark vom Gitter und den Randbedingungen ab. Eine Sonderstellung stellt das SST-SAS-Modell (SAS: Scale Adaptive Simulation) dar, das basierend auf einem lokalen Längenmaß bzw. der lokalen turbulenten Viskosität entweder mit URANS oder LES rechnet [8].

Für mehrphasige turbulente Strömungen mit freien Oberflächen orientiert sich die Turbulenzmodellierung am Mehrphasenmodell. Bei einphasiger Rechnung mit dem VoF-Modell (VoF: Volume of Fluid) agiert das Turbulenzmodell ohne weitere Modifikation phasenübergreifend. Kombiniert man den Euler-Euler-Ansatz mit dem VoF-Modell, stehen mehrere Möglichkeiten bereit.

Der Mixture-Ansatz löst, gestützt auf die lokal gemittelten Fluideigenschaften, ein gemeinsames Turbulenzmodell für alle Phasen. Dies setzt geschichtete Phasen oder bei durchmischten Phasen vergleichbare Dichte voraus. Der Dispersed-Ansatz löst das Turbulenzmodell für eine dominierende Trägerphase und leitet daraus die Turbulenzeigenschaften für eine zugefügte Sekundärphase ab. Schließlich löst der Full-Model-Ansatz für jede beteiligte Phase ein separates Turbulenzmodell.

CFD-Simulationen für Metallschmelzen, Bild 3, wurden vor allem auf dem Nuklearsektor für Schwermetalle vorgenommen [9]. Es stellte sich heraus, dass die Turbulenzmodellierung auf Basis der RANS-Gleichungen den Impulstransport und damit das Geschwindigkeitsfeld mit guter Genauigkeit erfasst. Für den turbulenten Wärmetransport ist die Situation weniger eindeutig. Mit laminaren Prandtl-Zahlen für flüssige Metalle von weit unter 1 und turbulenten Prandtl-Zahlen deutlich darüber spielt der turbulente Beitrag zum diffusiven Energietransport nur eine untergeordnete Rolle. Darüber hinaus sind variable turbulente Prandtl-Zahlen problematisch. Einige Autoren haben hierzu das RNG- k - ϵ -Modell mit spezieller Korrelation für die turbulente Prandtl-Zahl erfolgreich eingesetzt [9]. Zur Berechnung des Wärmeübergangs an festen Wänden wird die Grenzschichtauflösung empfohlen. Vereinzelt wurden eigene Korrelationen für turbulente Prandtl-Zahl und Wandbehandlung implementiert [9].

Zur Thematik der Wechselwirkung zwischen Turbulenz und magneto-hydrodynamischen Kräften in Metallschmelzen existieren nur wenige Erkenntnisse [10]. Thematisch verwandte Forschungsarbeiten behandeln überwiegend interstellare Plasmen. Die Ergebnisse deuten aber darauf hin, dass mit einsetzender Wechselwirkung typische Eigenschaften der freien Turbulenz, wie Isotropie und stochastischer Charakter der Schwankungen, verloren gehen. Speziell für flüssige Metalle reduzieren magneto-hydrodynamische Kräfte die turbulente kinetische Energie, wobei der Großteil der Interaktion in den kleinen Skalen stattfindet.

Stärker als die Art der Wandbehandlung und des Turbulenzmodells beeinflusst der Turbulenzzustand

am Eintritt ins Rechengebiet das CFD-Ergebnis. Die Eintrittsrandbedingungen sind daher möglichst realistisch vorzugeben. Werte für k und ϵ bzw. ω sind nur geeignet, wenn sie als vollständige Profile aus Vergleichsmessungen stammen. Ansonsten sind der Turbulenzgrad und der hydraulische Durchmesser bzw. das Viskositätsverhältnis die bessere Wahl. Bei neuen Aufgabenstellungen wird empfohlen, zunächst mit dem Standard- k - ϵ -Modell und Wandmodellierung eine Basisanalyse durchzuführen, um grundlegende Erkenntnisse zu Strömungseigenschaften, Wandabständen und Einfluss der Randbedingungen zu gewinnen. Auf dieser Grundlage sollten Rechengitter, Wandbehandlung, Turbulenzmodell und Randbelegung für eine nachfolgende Produktionsrechnung gewählt werden.

Modellbildung und numerische Berechnung disperser Mehrphasenströmungen

Die Forschungsschwerpunkte des Lehrstuhls für Mechanische Verfahrenstechnik an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg liegen in den Bereichen Mehrphasenströmungen und Partikeltechnologie und beinhalten sowohl experimentelle als auch theoretische und numerische Arbeiten. Das Hauptziel der Forschungsarbeiten liegt auf der Analyse und Modellbildung der für mehrphasige Strömungen relevanten Elementarprozesse, wie z. B. Partikelkollision und Agglomeration, Tropfenkoaleszenz und oszillierende Blasenbewegung. Hierfür werden zum einen detaillierte Experimente auf der Skala der Partikel bzw. Blasen mithilfe moderner optischer Messverfahren durchgeführt. Für derartige Untersuchungen eignen sich besonders bildgebende Methoden in Verbindung mit Hochgeschwindigkeitskameras [11]. Das Aufstiegsverhalten von kleinen und großen Blasen ist beispielhaft in Bild 4 dargestellt. Durch eine stereoskopische Aufzeichnung können die gesamte Blasenbahn und die Blasengröße rekonstruiert werden. Ziel derartiger Untersuchungen ist die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung der Blasenoszillation, um diesen Effekt bei der CFD-Simulation von Blasenströmungen berücksichtigen zu können. Weiterhin werden die Elementarprozesse mithilfe vollaufgelöster direkter numerischer Simulationen analysiert. Für Blasen wird dafür ein „Interface Tracking“-Verfahren benutzt [12], wohingegen die Lattice-Boltzmann-Methode, z. B. für die Untersuchung der Agglomeratentstehung und -bewegung, Anwendung findet.

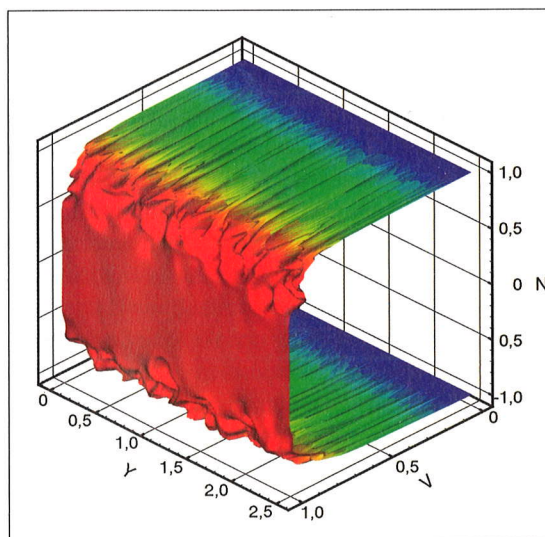
Die entwickelten Modelle finden dann Eingang in numerische Verfahren für die Berechnung von technisch und industriell relevanten Mehrphasenprozessen. Hierfür wird in der Regel das Euler/Lagrange-Verfahren in Verbindung mit einer geeigneten Turbulenzmodellierung eingesetzt. Mit dieser Methode können mehrphasige Strömungsprozesse effizient ausgelegt und optimiert werden. Derzeit betrachtete Anwendungen sind die pneumatische Förderung [13], Herstellungsprozesse für

Nanopartikel, Zerstäubungsprozesse und Sprühnebel (z. B. relevant für die Sprühtrocknung), mehrphasige Rührreaktoren sowie Blasensäulen [14; 15].

Makroseigerungen in metallurgischen Prozessen mit Mehrphasen-CFD-Ansätzen

Am Lehrstuhl für Simulation und Modellierung metallurgischer Prozesse der Montanuniversität Leoben wurden in den vergangenen Jahren Mehrphasen-CFD-Ansätze zur Beschreibung der Dynamik von Erstarrungsprozessen entwickelt. Diese Arbeiten begannen 2002 mit der Beschreibung der Nukleation, des Wachstums und der Bewegung von globulitischen Körnern bei gleichzeitig vorhandener Schmelzenströmung [16; 17]. Es zeigte sich, dass in vielen praktischen Fällen zunächst thermische Konvektion in der Schmelze überwiegt und die gerade entstandenen, relativ kleinen Körner der Schmelzenbewegung folgen. Erst wenn die Körner eine gewisse Größe erreicht haben, sind sie in der Lage, aufgrund ihres Eigengewichtes, abzusinken und zu sedimentieren. Dadurch wird dann auch die Schmelzenströmung merklich beeinflusst.

Bei der stängelkristallinen Erstarrung wachsen die Dendriten, ausgehend von der Gießform, in die Schmelze hinein, während die Schmelze infolge der Abkühlung nahe der Gießform absinkt und im Zentrum der Gießform aufsteigt. Die Wechselwirkung zwischen den wachsenden Dendriten und der interdendritischen Schmelzenströmung führt dabei zu einer Veränderung der interdendritischen Mikroseigerung. Die Arbeiten



8

Elektromagnetische Strömungsbeeinflussung: Schnappschuss des Geschwindigkeitsfeldes einer turbulenten Flüssigmetallströmung in einem ebenen Kanal unter dem Einfluss eines homogenen Magnetfeldes [22]

Electromagnetic fluid flow affection: snapshot of the velocity field of the turbulent liquid metal flow in a flat channel under the influence of a homogeneous magnetic field [22]

zur Modellierung dieser Vorgänge fanden 2005/6 statt [18; 19].

Zeitgleich wurde damit begonnen, die Modellierung der globulitischen Erstarrung mit der der stängelkristallinen zu kombinieren [20; 21]. Hierzu war es erforderlich, die Veränderung des stängelkristallinen Bereiches, insbesondere der sie beschreibenden Dendritenspitzen, zu berechnen. Zu diesem Zweck wurde ein Algorithmus vorgeschlagen, der stabil, schnell und universal einsetzbar ist [22]. Damit ist es möglich, die Unterkühlung vor einer wachsenden Dendritenfront einzubeziehen und eventuell in diesem Bereich wachsende globulitische Körner zu berücksichtigen. Diese Möglichkeit erlaubt nun die numerische Beschreibung der sogenannten „columnar-to-equiaxed transition“ (CET), einem Übergang von gemischt stängelkristallin/globulitischem zu rein globulitischem Gefüge.

Seit etwa zwei Jahren wird mit Hochdruck an einer Übertragung der beschriebenen Modellansätze auf reale, großindustrielle Gussvorgänge gearbeitet, Bild 5. Dabei wird insbesondere die Einbeziehung von ternären und quaternären Phasendiagramminformationen, die Berücksichtigung der sogenannten „Rückdiffusion“ speziell für Kohlenstoff in Stählen, die Ermittlung fehlender Materialdaten und die Reduzierung der notwendigen Rechenzeit betrieben. Zudem werden derzeit extensive Anstrengungen zur Verifikation der Ergebnisse, insbesondere bezüglich der Vorhersagen von Makroseigerungen und von stängelkristallinen und globulitischen Gefügeanteilen inklusive eines eventuell auftretenden CET, unternommen.

CFD-Simulation des Wärme- und Stofftransports in der Schmelze von Induktionsanlagen

Induktionsanlagen werden in der metallurgischen Prozesstechnik u. a. zum Schmelzen, Gießen, Rühren oder Separieren eingesetzt. Die verfahrenstechnische Entwicklung, Auslegung und Optimierung der Prozesse und Anlagen gehört seit Jahren zu den Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkten des Instituts für Elektroprozesstechnik (ETP) der Leibniz Universität Hannover. Zur Berechnung und Analyse des komplexen Wärme- und Stofftransports in der Schmelze von Induktionsanlagen ist die numerische Simulation heute ein unverzichtbares Werkzeug.

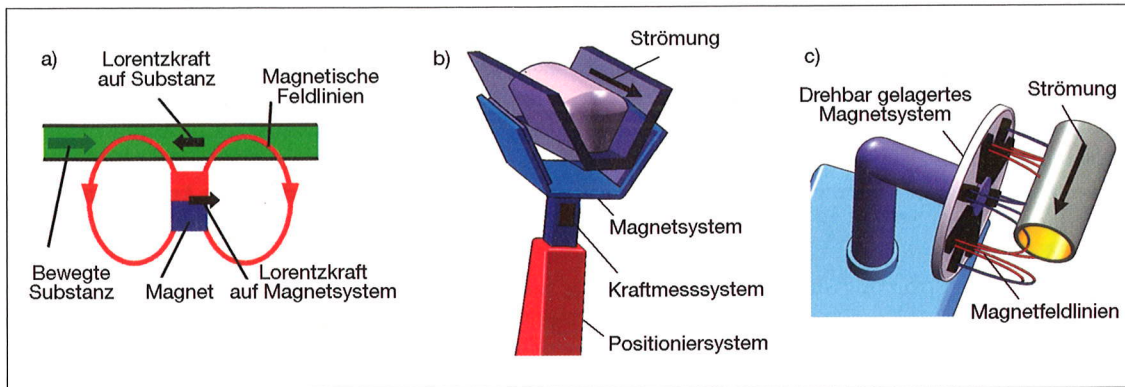
Ein wichtiges Merkmal beim Betrieb von Induktionsanlagen mit metallischen Schmelzen sind die durch elektromagnetische Kräfte (Lorentzkräfte) hervorgerufenen turbulenten Schmelzenströmungen, die i. A. instationäre, dreidimensionale, wirbelartige Strömungsstrukturen aufweisen, Bild 6. Zur Untersuchung des Wärme- und Stofftransports in Schmelzen ist die Betrachtung der zeitgemittelten Strömung oft nicht ausreichend, da diese nur für den durch die Hauptströmung verursachten konvektiven Wärme- und Stofftransport verantwortlich ist. Daneben gilt es,

zeitlich und räumlich über mehrere Größenordnungen verteilte Strömungsstrukturen mit einzubeziehen. Experimentelle Daten belegen, dass insbesondere großräumige, niederfrequente Schwankungen, wie sie typisch für in Induktionsanlagen auftretende Wirbel sind, maßgeblich für den Impuls-, Stoff- und Energieaustausch verantwortlich sind [23]. Die instationären Strukturen mit langen Schwingungsperioden von über zehn Sekunden sind durch übliche URANS-Simulationen mit $k-\epsilon$ - oder $k-\omega$ -Turbulenzmodellen nicht korrekt zu berechnen. Lediglich zeitgemittelte Strukturen lassen sich auf diese Weise in guter quantitativer Übereinstimmung mit Messergebnissen simulieren.

Als Alternative zu den URANS-Verfahren wird am ETP zur dreidimensionalen instationären Simulation des Wärme- und Stofftransports in Induktionsanlagen seit mehreren Jahren die LES eingesetzt. Die Resultate stehen in guter Übereinstimmung mit analogen experimentellen Ergebnissen [24]. Bei der LES wird ein Filter verwendet, sodass größere Wirbelstrukturen direkt berechnet und nur die feinen Wirbel, die kleiner als die Maschenweite des Diskretisierungsnetzes sind, mithilfe eines Subgrid-Turbulenzmodells nachgebildet werden. Die LES benötigt eine deutlich feinere Vernetzung als URANS, jedoch ist die Vernetzung immer noch wesentlich gröber als bei der DNS. Die LES ist zur Berechnung von Problemstellungen und Geometrien im industriellen Maßstab mit heute zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten praktisch anwendbar.

Bei der numerischen Simulation wird unter Nutzung des Programmpaketes Ansys zunächst die elektromagnetische Feldverteilung, hervorgerufen durch die wechselstromdurchflossene Induktionsspule und die daraus resultierende elektromagnetische Kraftverteilung in der Schmelze, bestimmt. Zusätzlich kann die Verformung von freien Schmelzenoberflächen aufgrund der elektromagnetischen Kräfte berücksichtigt werden. Die räumliche Verteilung der elektromagnetischen Kraftdichte, die den Antrieb der Schmelzenströmung 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 gekoppelt.

Ferner kann mithilfe einer gesondert entwickelten implementierten Routine der Teilchentransport berechnet werden [25]. Die Durchmischung und der Teilchentransport lassen sich anhand transients Bahnkurven von Masseteilchen (particle tracking) dreidimensional simulieren und anschaulich darstellen, Bild 7. Dabei können die partikelförmigen



9

Elektromagnetische Strömungsmessung: a) Grundprinzip der Lorentzkraft-Anemometrie zur berührungslosen Strömungsmessung in Metallschmelzen, b) Prinzipskizze eines statischen Lorentzkraft-Anemometers, c) Prinzipskizze eines Lorentzkraft-Flügelrad-anemometers

Electromagnetic fluid flow measurement: a) basic principle of the Lorentz force anemometry for contact-less measurements in liquid melt, b) sketch of a steady-state Lorentz force anemometer, c) sketch of a Lorentz force fan wheel anemometer

Masseteilchen unterschiedliche Dichten und Korngrößen haben sowie aus elektrisch leitenden oder nicht leitenden Materialien bestehen, um z. B. den Einfluss elektromagnetischer Kraftwirkungen auf die Teilchen gezielt zu untersuchen.

Die LES wurde erfolgreich in zahlreichen industriennahen Forschungs- und Entwicklungsprojekten zur Simulation des Wärme- und Stofftransports eingesetzt. Beispiele hierfür sind Induktionstiegel- und Rinnenöfen für den Eisen- und Nichteisenbereich, Kaltwand-Induktionstiegelöfen zum Schmelzen und Gießen von TiAl-Legierungen, Schmelz- und Verzinkungsanlagen mit angeflanschten Tiegel- oder Rinneninduktoren sowie Wanderfeldinduktoren zum berührungslosen Abdichten bei Bandbeschichtungsanlagen [26].

Elektromagnetische Strömungsmessung und Strömungsbeeinflussung

Das von A. Thess geleitete Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik (TFD) bildet gemeinsam mit dem von J. Schumacher geleiteten Fachgebiet Theoretische Strömungsmechanik das Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Ilmenau. Gegenstand der Elektromagnetischen Strömungsmessung und -beeinflussung ist die Wechselwirkung bewegter elektrisch leitfähiger Flüssigkeiten wie Quecksilber, flüssiger Stahl, Glas- und Halbleiterschmelzen mit Magnetfeldern. Diese Felder können einerseits elektromagnetische Kräfte induzieren, die als Lorentzkräfte bezeichnet werden. Die Lorentzkräfte können Strömungen anfachen oder abbremsern und bieten dadurch zahlreiche Möglichkeiten der berührungslosen Strömungsbeeinflussung. Andererseits werden Magnetfeldlinien durch Strömungen leitfähiger Substanzen verformt und können deshalb zum Zweck der Strömungsmessung eingesetzt werden. Am Fachgebiet TFD werden in enger Kooperation mit dem Fachgebiet Elektrothermische Energiewandlung

der Fakultät Elektrotechnik sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientierte Forschungen betrieben. Den Forschern stehen u. a. mehrere Flüssigmetallkanäle, Glasschmelzversuchsanlagen mit magnetischer Strömungsbeeinflussung, eine modulare frequenzvariable Hochfrequenzspannungsquelle sowie ein supraleitendes Hochfeldmagnetsystem mit einer maximalen Magnetfeldstärke von 5 T zur Verfügung.

Ein Beispiel für grundlagenorientierte Arbeiten auf dem Gebiet der elektromagnetischen Strömungsbeeinflussung ist die Erforschung von Kanalströmungen unter dem Einfluss eines homogenen Magnetfeldes senkrecht zur Strömungsrichtung. Diese Strömungsform wird als Hartmann-Strömung bezeichnet. Seit über 70 Jahren ist bekannt, dass bei einer laminaren Hartmann-Strömung die Lorentzkräfte zu einem nahezu konstanten Geschwindigkeitsprofil mit dünnen Randschichten an den Kanalwänden – den sogenannten Hartmann-Schichten – führen, in denen die Geschwindigkeit auf Null abklingt. Doch die Frage, bei welchen Geschwindigkeiten und Magnetfeldstärken eine laminare Hartmann-Strömung in den turbulenten Zustand übergeht, war bis vor kurzem unbeantwortet. In den letzten Jahren konnten durch systematische Computersimulationen die Mechanismen des Turbulenzübergangs in der Hartmann-Strömung aufgeklärt werden. Die in aufwendigen Simulationsserien an Hochleistungsrechnern ermittelten Schwellenwerte für die Turbulenzentstehung [27] stimmen quantitativ mit neuen experimentellen Resultaten [28] überein. Diese Arbeiten werden derzeit durch aufwendige Direkte Numerische Simulationen der turbulenten Hartmann-Strömung fortgesetzt [29]. Die CFD-Simulationen erfolgen mit einem Forschungscode aus Eigenentwicklung, der effizient auf Parallelrechnern eingesetzt werden kann. Das in Bild 8 dargestellte Geschwindigkeitsprofil stammt aus einer CFD-Simulation, die etwa 4 000 Stunden Rechenzeit

auf einem Prozessor benötigt hätte. Obwohl die Strömung turbulent ist, befindet sich in der Mitte des Kanals ein flaches Profil ohne Fluktuationen. Die Turbulenz ist also auf die Hartmann-Schichten beschränkt. Der Aufwand der Simulation resultiert daraus, dass alle Wirbelstrukturen der Strömung auf dem numerischen Gitter dargestellt werden. Die gewonnenen Daten können für die Weiterentwicklung von Turbulenzmodellen für kommerzielle Strömungssimulationsprogramme verwendet werden.

Ein Beispiel für anwendungsorientierte Arbeiten auf dem Gebiet der elektromagnetischen Strömungsmessung ist die Entwicklung des berührungslosen Strömungsmessverfahrens der Lorentzkraft-Anemometrie [30]. Das Grundprinzip, das auf Arbeiten des englischen Forschers Arthur Shercliff aus den 60er-Jahren zurückgeht, ist in Bild 9 dargestellt. Strömt eine elektrisch leitfähige Flüssigkeit, wie z. B. eine Metallschmelze, durch ein von außen angelegtes stationäres Magnetfeld, so werden in der Schmelze elektrische Wirbelströme induziert. Dadurch entsteht in der Schmelze eine bremsende Lorentzkraft, die proportional zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit und damit zur Durchflussmenge ist. Aufgrund der Gleichheit von Kraft und Gegenkraft ruft die bremsende Lorentzkraft eine gleich große beschleunigende Kraft auf das felderzeugende Magnetsystem (in Bild 9 ein oder mehrere Permanentmagnete) hervor. Die Messung der auf das Magnetsystem wirkenden Kraft erlaubt eine präzise

Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit und der Durchflussrate der Flüssigkeit. Mehrere Prototypen von Lorentzkraft-Anemometern wurden erfolgreich in Unternehmen der Sekundäraluminiumindustrie getestet. Seither erfolgt eine Weiterentwicklung der Technologie für diese und andere Anwendungen.

Ausblick

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über die im VDEh-Arbeitskreis „Strömungsmechanik und Strömungssimulation“ bisher bearbeiteten Themengebiete. Diese und darüber hinaus noch andere Themen, wie z. B. die Behandlung der Reaktionskinetik oder der numerischen Lösungsverfahren in den CFD-Programmen, bieten auch zukünftig noch ein erhebliches Entwicklungspotenzial, einerseits wegen ständig weiterentwickelter Modellansätze, andererseits aufgrund der kontinuierlich steigenden Rechenleistung. Der Arbeitskreis wird sich zukünftig besonders mit den im Stahlwerk auftretenden strömungstechnischen Fragestellungen beschäftigen und versuchen, Lösungsansätze aufzuzeigen. Darüber hinaus werden mit dem derzeit durchgeführten CFD-Benchmark für einen realen Stranggießverteiler auch grundlegende Themen bearbeitet. Von den Erfahrungen der Benchmark-Teilnehmer und den geführten Diskussionen zu diesen zeitaufwendigen CFD-Simulationen profitieren alle Mitglieder bzw. teilnehmenden Institutionen des Arbeitskreises.

juergen.odenthal@sms-demag.com

Literatur

- [1] Odenthal, H.-J.; Javurek, M.; Kirschen, M.: CFD benchmark for a single strand tundish (Part I), steel res. intern. 80 (2009) Nr. 2 (geplant).
- [2] Ferziger, J. H.; Peric, M.: Computational Methods for Fluid Dynamics, 2. Aufl. Springer Verlag, 1999.
- [3] Launder, B. E.: Intern. J. for Numerical Methods in Fluids 9 (1989), S. 963/85.
- [4] Launder, B. E.; Spalding, D. B.: Lectures in mathematical models of turbulence, Academic Press, London, Großbritannien, 1972.
- [5] Craft, T. J.; Gant, S. E.; Gerasimov, A. V.; Iacovides, H.; Launder, B. E.: Fluid Dynamics Res. 38 (2006) Nr. 2-3, S. 127/44.
- [6] Fluent 12.0 User's Guide, 2008.
- [7] Sagaut, P.: Large Eddy Simulation for incompressible flows, an introduction, 2. Aufl., Springer Verlag, 1998.
- [8] Menter, F.; Egorov, Y.: Turbulence modeling of aerodynamic flow, Proc. Intern. Aerospace CFD Conf., 18.-19. Juni 2007, Paris, Frankreich, S. 1/17.
- [9] Arien, B.: 2003 aSCHLIM Final Report EU 5 FP Project FISS-2001-2001
- [10] Smolentsev, S.; Abdou, M.: Development and adjustment of "k-ε" turbulence model for MHD channel flows with large aspect ratio in a transverse magnetic field, Proc. 4. Intern. Conf. MHD at dawn of third Millennium, 18.-22. Sept. 2000, Giençe, Frankreich.
- [11] Bröder, D.; Sommerfeld, M.: Measurement Sc. Techn. 18 (2007), S. 2 513/28.
- [12] Göz, M. F.; Bunner, B.; Sommerfeld, M.; Tryggvason, G.: Simulation of bidisperse bubbly gas-liquid flows by a parallel finite-difference/front-tracking method, [in:] Krause, E.; Jäger, W. [Hrsg.], High Performance Computing in Science and Engineering, Springer Verlag, 2002, S. 298/308.
- [13] Lain, S.; Sommerfeld, M.: Powder Techn. 184 (2008), S. 76/88.
- [14] Bourloutski, E.; Sommerfeld, M.: Transient RANS/Lagrange calculations of two- and three-phase flows in bubble columns, [in:] Rodi, W.; Fuero, N. [Hrsg.], Engineering Turbulence Modelling and Measurements 5, Elsevier Science, 2002, S. 969/78.
- [15] Sommerfeld, M.; Bourloutski, E.; Bröder, D.: Canadian J. Chem. Eng. 81 (2003), S. 508/18.
- [16] Ludwig, A.; Wu, M.: Metall. Mater. Trans. 33A (2002), S. 3 673.
- [17] Wu, M.; Ludwig, A.: Adv. Eng. Mater. 5 (2003), S. 62.
- [18] Ludwig, A.; Gruber-Pretzler, M.; Mayer, F.; Ishmurzin, A.; Wu, M.: Mat. Sci. Eng. A, 413-414 (2005), S. 485/89.
- [19] Ludwig, A.; Gruber-Pretzler, M.; Wu, M.; Kuhn, A.; Riedel, J.: Int. J. Fluid Dynamic Materials Proc. 1 (2006), S. 285/300.
- [20] Wu, M.; Ludwig, A.: Metall. Mater. Trans. A, 38 (2007), S. 1 465/75.
- [21] Wu, M.; Ludwig, A.; Luo, J.: Mater. Sci. Forum 475 (2005), S. 2 725.
- [22] Wu, M.; Ludwig, A.: Metall. Mater. Trans. A 37 (2006), S. 1 613/31.
- [23] Umbrashko, A.; Baake, E.; Nacke, B.; Jakovics, A.: Metallurg. Mater. Trans. B 37B (2006) Nr. 5, S. 831/38.
- [24] Baake, E.; Umbrashko, A.; Jakovics, A.: steel res. intern. 78 (2007) Nr. 5, S. 413/18.
- [25] Kirpo, M.; Jakovics, A.; Nacke, B.; Baake, E.: Particle transport in recirculated liquid metal flows, Proc. Intern. Sympos. on Heating by Electromagnetic Sources, 19.-22. Juni 2007, Padua, Italien, S. 153/60.
- [26] Baake, E.; Umbrashko, A.; Behrens, H.; Jakovics, A.: LES-Modeling of turbulent flows, heat and mass transfer in industrial induction applications, Proc. 5. Intern. Sympos. on Electromagnetic Processing of Materials, 23.-27. Okt. 2006, Sendai City, Japan, S. 214/19.
- [27] Krasnov, D.; Zienicke, E.; Zikanov, O.; Boeck, T.; Thess, A.: J. Fluid Mech. 504 (2004), S. 183/211.
- [28] Moresco P.; Alboussiere, T.: J. Fluid Mech. 504 (2004), S. 167/81.
- [29] Boeck, T.; Krasnov, D.; Zienicke, E.: J. Fluid Mech. 507 (2007), S. 179/88.
- [30] Thess, A.; Votyakov, E.; Kolesnikov, Y.: Lorentz Force Velocimetry, Phys. Rev. Lett. 96 (2007) 164501.