

# Die Stranggießforschung am Lehrstuhl für Metallurgie: Entwicklung, Status und Ausblick

C. Bernhard

Die vorliegende Arbeit beleuchtet die Entwicklung der Stranggießforschung am Lehrstuhl für Metallurgie unter dem Eindruck der zu Ende gehenden Laufzeit des Christian-Doppler-Labors für „Metallurgische Grundlagen von Stranggießprozessen“. Die wesentlichen Forschungsschwerpunkte werden dargestellt, und es wird ein Ausblick auf Nachfolgeprojekte gegeben, der zeigt, dass die bisherigen Aktivitäten in unverändertem und teils sogar erhöhtem Umfang weitergeführt werden.

*Continuous Casting Research at the Chair of Metallurgy: Past, Present and Future.* This paper deals with the development of continuous casting research at the Chair of Metallurgy under the viewpoint of the approaching end of the Christian Doppler Laboratory for “Metallurgical Fundamentals of Continuous Casting Processes”. The main research subjects are highlighted and an outlook is given on currently starting projects, underlining that the research activities will continue on the same or even on a larger scale.

## 1. Einleitung

Die Stranggießmetallurgie hat sich, den internen strategischen Konzepten des Lehrstuhls für Metallurgie folgend, als Forschungsschwerpunkt mit langfristiger Perspektive etabliert. Der steile Aufschwung der letzten Jahre war geprägt von der Einrichtung des Christian-Doppler-Labors für „Metallurgische Grundlagen von Stranggießprozessen“ im Jahr 2002. Dies wurde von den aufeinander folgenden damaligen Institutsvorständen, Professor Herbert Hiebler und Professor Wilfried Krieger, maßgeblich gefördert.

Blickt man in der Stranggießforschung am damaligen Institut für Eisenhüttenkunde zurück, so wurden nach eher vereinzelt Diplomarbeiten in den 1960er- und 70er-Jahren die Arbeiten ab der zweiten Hälfte der 1980er-Jahre intensiviert. Es entstanden in immer steigender Anzahl Diplomarbeiten und mit Beginn der 1990er-Jahre auch Dissertationen auf Basis experimenteller Arbeiten am Institut<sup>1,2</sup>. Diese wurden durch die Übernahme von Versuchseinrichtungen von Professor Wilfried Kurz von der EPF Lausanne ermöglicht. Der später als „Submerged Split-Chill Tensile“- (SSCT)-Test bezeichnete Versuchsaufbau legte den Grundstein zur heutigen experimentellen Kompetenz in der Stranggießforschung<sup>3,4</sup>. Geprägt wurde diese Zeit auch durch das unterstützende Wirken von Manfred Wolf in Forschung und Lehre und eine verstärkte internationale Vortrags- und Publikationstätigkeit. Manfred Wolf habilitierte 1996 im Fach Stranggießen, seine Habilitationsschrift wurde weltweit zu einem Standardwerk über das Verhalten peritektischer Stähle im Stranggießprozess<sup>5</sup>.

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Bernhard, Lehrstuhl für Metallurgie, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben / Österreich.

2001 erfolgte schließlich auf Initiative des designierten Professors für Metallurgie, Wilfried Krieger, der Antrag auf Einrichtung des Christian-Doppler-Labors für „Metallurgische Grundlagen von Stranggießprozessen“ (CDL-MCC). Das Labor wurde genehmigt und 2002 eingerichtet. Mit Ende 2008 endete die Laufzeit des Labors, und es bietet sich an, über den Status und die Zukunft der Arbeitsgruppe am Lehrstuhl für Metallurgie zu berichten. Dies soll nachfolgend gegliedert nach Themengebieten erfolgen.

## 2. Fehlerbildung während der Erstarrung

Wie bereits in der Einleitung angesprochen, wurde Anfang der 1990er-Jahre eine Versuchseinrichtung von der EPF Lausanne übernommen, die später als SSCT-Test bezeichnet wurde<sup>3,4</sup>. Die Anordnung erlaubt die kontrollierte Zugbelastung von erstarrendem Stahl<sup>6-8</sup>. Bedingt durch die kontrollierte Belastung des Zweiphasengebiets können Fehler erzeugt werden, wie sie auch im Stranggießprozess entstehen<sup>9</sup>. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber konventionellen Heißzugprüfmaschinen, in denen die Probe vollständig zerrissen wird und deshalb anschließend aus der Bruchseinschnürung auf die Duktilität geschlossen werden muss.

Im SSCT-Versuch kann das Ausmaß der Belastung mit dem Auftreten von Fehlern korreliert werden<sup>10,11</sup>. Dadurch ist die Bestimmung kritischer Grenzen der Verformung in Abhängigkeit von Stahlzusammensetzung sowie Erstarrungs- und Verformungsbedingungen möglich. Diese Kennwerte sind sowohl für die Auslegung von Stranggießanlagen als auch für deren gesicherten Betrieb notwendig.

Die intensive Zusammenarbeit des CDL-MCC mit Siemens VAI Metals Technologies und Voestalpine

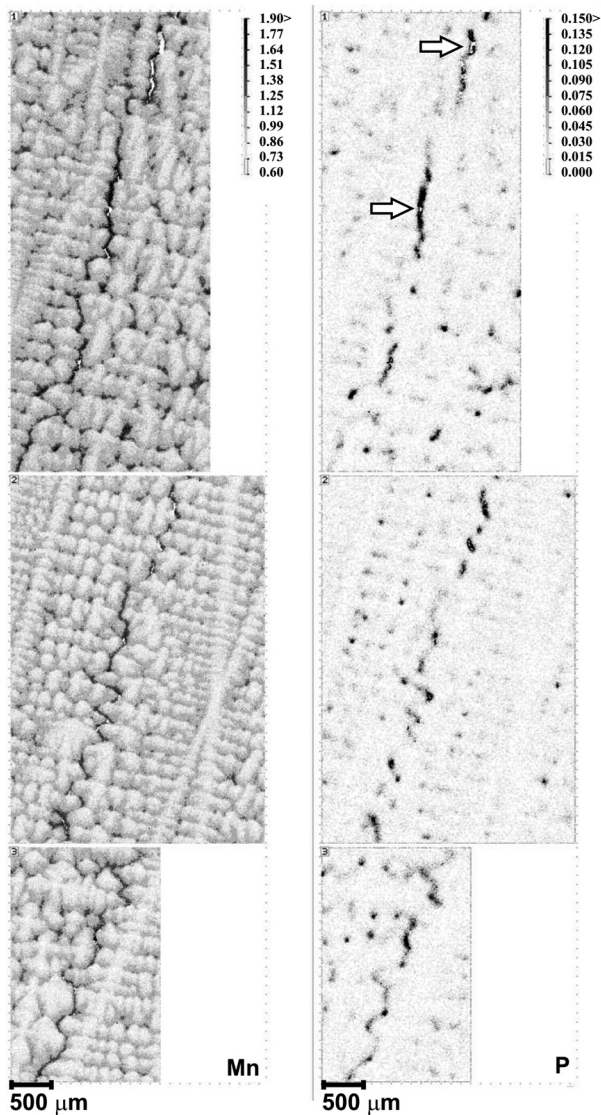


Abb. 1: Konzentrationsverteilung von Mangan und Phosphor in einer Heißrisseigerung<sup>9,13</sup>

Stahl führte zu einem vollkommen neuen Verständnis des Phänomens der Heißrissebildung, das in der Habilitationsschrift des Autors zusammengefasst wurde<sup>12</sup>. Als wesentliche Punkte können genannt werden:

- Heißrisse in Stählen werden eigentlich zu unrecht als *Risse* bezeichnet. Es geht um ein Seigerungsphänomen<sup>13</sup>: Die Fehler erscheinen im Schlibbild optisch einem Riss sehr ähnlich, sind jedoch mit angereicherter Schmelze gefüllt, die zu einer verstärkten Ausbildung von Ausscheidungen während der Erstarrung und der Bildung von Härtegefügen während der nachfolgenden Abkühlung führen können. Die Bezeichnung Heißrisseigerung (HRS) wurde eingeführt, um die unterschiedlichen Phänomene klar voneinander abzugrenzen. Die Existenz von HRS konnte auch an Brammen nachgewiesen werden<sup>9</sup>. Abbildung 1 zeigt die Konzentrationsverteilung für Mangan und Phosphor in einem Halbseitenriss einer Bramme mit 0,51 Masse-% C, 0,96 Masse-% Mn und 0,015 Masse-% P<sup>9</sup>. Die Konzentrationsanreicherung erreicht für Mangan den Faktor 2 zur Ausgangskonzentration und für Phosphor den Faktor 10.
- Der Mechanismus der Bildung von Heißrisseigerungen lässt sich über die verformungsbedingte Erwei-

terung der Zwischenräume zwischen Erstarrungskörnern, die folglich verminderte Rückdiffusion der angereicherten Elemente, die Ausscheidung von Sulfiden oder Carbonitriden und letztendlich die Bildung von Poren erklären, welche bei fortgesetzter Verformung zu offenen Rissen koagulieren können<sup>12</sup>.

- Die Vorstellung der Akkumulation von Dehnungen in primären Kornzwischenräumen und die damit verbundene kontinuierliche Zunahme der Anreicherung durch Verlängerung der Rückdiffusionswege erklären, dass es keine universal gültige kritische Dehnung gibt, sondern man eine solche nur im Hinblick auf die geforderte Produktqualität definieren kann<sup>12</sup>.

Die angeführten Überlegungen ermöglichen es, den Einfluss veränderter Erstarrungsbedingungen auf die Heißrissempfindlichkeit ebenso zu berücksichtigen wie den Einfluss sich ändernder Verformungsgeschwindigkeiten<sup>11</sup>. Das Modell der Akkumulation von Dehnungen wurde mittlerweile umgesetzt und soll in weiterführenden Projekten validiert sowie vertieft und auch erweitert werden<sup>10–13</sup>.

Die Gültigkeitsprüfung der Modelle an einer Stranggießanlage und die Integration in ein Qualitätssicherungssystem werden im Rahmen eines Projekts im K1-Zentrum für „Advanced Metallurgical and Environmental Process Development“ (K1-MET) verfolgt.

Die Erweiterung der Modelle auf bisher nicht berücksichtigte Legierungen sowie die Vertiefung des Grundlagenwissens sind Inhalt des bereits gestarteten Projekts „Characterization of phase transformation and damage during the solidification of steel“ im Rahmen des K2-Zentrums für „Integrated Research in Materials, Processing and Product Engineering“ (K2-MPPE).

Die bisherigen Aktivitäten am CDL-MCC können somit am Lehrstuhl für Metallurgie nicht nur weitergeführt, sondern auch vom Umfang her ausgeweitet werden.

### 3. Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Stahl während der Erstarrung

Ein weiteres Ergebnis des SSCT-Versuchs ist die Bestimmung von Kraft-Verlängerungs-Kurven für die untersuchten Stähle. Da die Erstarrungszeit im Versuchsablauf begrenzt ist, sind die belasteten Proben dünn und die Versuchstemperaturen hoch. Es wird somit der besonders kritische Bereich der Anfangserstarrung erfasst, der mit anderen Untersuchungsmethoden nur schwer erfassbar ist.

Im Kokillenbereich spielt auch das Kontraktionsverhalten des Stahls eine wichtige Rolle. Deshalb wurde die SSCT-Versuchsanordnung für die Bestimmung des Kontraktionsverhaltens von Stahl adaptiert<sup>14,15</sup>. Die Abwandlung des SSCT-Versuchs wird als „Submerged Split-Chill Contraction“ (SSCC)-Test bezeichnet. Es konnte in Experimenten gezeigt werden, dass Proben aus erstarrenden peritektischen Stählen, die an der Kontraktion gehindert werden, besonders hohe Kräfte aufbauen und dementsprechend auch besonders heißrissempfindlich sind. Der SSCC-Test soll in Kombination mit anderen Experimenten im oben angeführten K2-MPPE-Projekt für die Charakterisierung der peritektischen Umwandlung und die damit verbundene Kontraktion weiterentwickelt werden.



Abb. 2: Die im Jahr 2007 in Betrieb genommene IMC-Apparatur am Lehrstuhl für Metallurgie<sup>17</sup>

Die im SSCC-Versuch ermittelten Kraftkurven konnten anschließend durch numerische Modelle beschrieben werden<sup>16</sup>; die weitere Verbesserung der Ergebnisse ist gegenwärtig Inhalt einer Kooperation mit Professor Brian Thomas von der University of Illinois<sup>20</sup>.

#### 4. Fehlerbildung während der Abkühlung

Die Existenz eines zweiten Duktilitätstiefs für Stähle, verursacht durch Nitrid- und Carbonitridausscheidungen sowie durch die Ausbildung von pro-eutektoiden Ferrit-säumen entlang von Austenitkorngrenzen, ist seit den 1960er-Jahren bekannt, eine Zusammenfassung von veröffentlichten Ergebnissen findet sich in<sup>18</sup>. Herkömmliche Kühlstrategien in Stranggießanlagen sehen vor, kritische Temperaturen an der Oberfläche in der Richtzone zu vermeiden. Konkrete Grenzwerte für die Belastung sind jedoch rar und aus konventionellen Heißzugversuchen auch nur schwer abzuleiten.

Diese Überlegungen waren der Ausgangspunkt einer Neuentwicklung, die das Grundkonzept des SSCC-Versuchs durch eine nachfolgende Abkühlung der Probe unter Schutzgas und eine Belastung der Probe auch bei Temperaturen von weniger als 1000 °C ermöglicht. Das Konzept erwies sich in ersten Versuchen als tauglich und wurde von Siemens VAI Metals Technologies als „In-situ Materials Characterization“ (IMC)-Test patentiert<sup>21</sup>. Im Jahr 2007 wurde die weltweit erste IMC-Anlage am Lehrstuhl für Metallurgie in Betrieb genommen (Abb. 2). Im Rahmen eines laufenden FFG-Projektes wird die Methode derzeit weiterentwickelt, erste Ergebnisse wurden bereits präsentiert<sup>17</sup>.

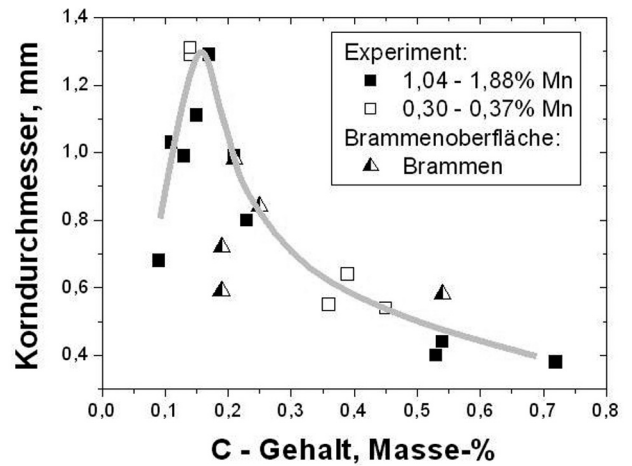


Abb. 3: Austenitkorngößen für Stähle aus einem Erstarrungsexperiment und an der Oberfläche von Brammen über den Kohlenstoffgehalt<sup>22,23</sup>

#### 5. Gefügeentwicklung während der Abkühlung

In Zusammenhang mit dem zweiten Duktilitätstief wird immer wieder auf die Bedeutung der Austenitkorngöße verwiesen<sup>18</sup>. Grobe Austenitkörner dürften die Duktilität von Stahl im Bereich des zweiten Duktilitätstiefs drastisch vermindern. Zu einer Grobkornbildung kann es vor allem unter Einziehungen und Oszillationsmarken kommen, aber auch die Stahlzusammensetzung hat einen großen Einfluss. Deshalb wurde in Laborexperimenten das Austenitkornwachstum unter kontrollierten Erstarrungs- und Abkühlbedingungen untersucht<sup>22</sup>.

Abbildung 3 zeigt den flächengleichen Kreisdurchmesser von ehemaligen Austenitkörnern in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehalts für Mangangehalte von rund 1,5 bzw. 0,35 Masse-%. Alle Proben durchliefen die gleiche Abkühlung. Es zeigt sich ein ausgeprägtes Maximum der Korngröße bei rund 0,17 Masse-% C. Die Körner sind um den Faktor 3 größer als bei höhergekohlten Stählen.

Die Ergebnisse wurden in ein Austenitkornwachstumsmodell übertragen und dieses wurde für die Berechnung des Austenitkornwachstums an der Oberfläche von Stranggussbrammen verwendet<sup>22,23</sup>. Damit konnte gezeigt werden, dass die Vergrößerung des Austenitkorns unter Oszillationsmarken von nur wenigen Millimetern Tiefe auch rechnerisch nachvollziehbar ist<sup>23</sup>.

#### 6. Metallografisch/analytische Bewertung von Mikrostruktur und Fehlern

Unverzichtbar für die Detektion und Bewertung von Fehlern sowie der Mikrostruktur sind metallografische Untersuchungen. Die Entwicklung metallografischer Methoden hat in allen bisher angeführten Arbeiten einen zentralen Raum eingenommen. Einige erwähnenswerte Ergebnisse sind:

- Die Entwicklung von Ätzmethoden für die Sichtbarmachung und anschließende Vermessung ehemaliger Austenitkorngrenzen in Kohlenstoffstählen<sup>24</sup>.
- Die Bewertung der Konzentrationsanreicherung und Ausscheidungsbildung in Heißrisseigerungen mittels Mikrosonde und die anschließende Darstellung in

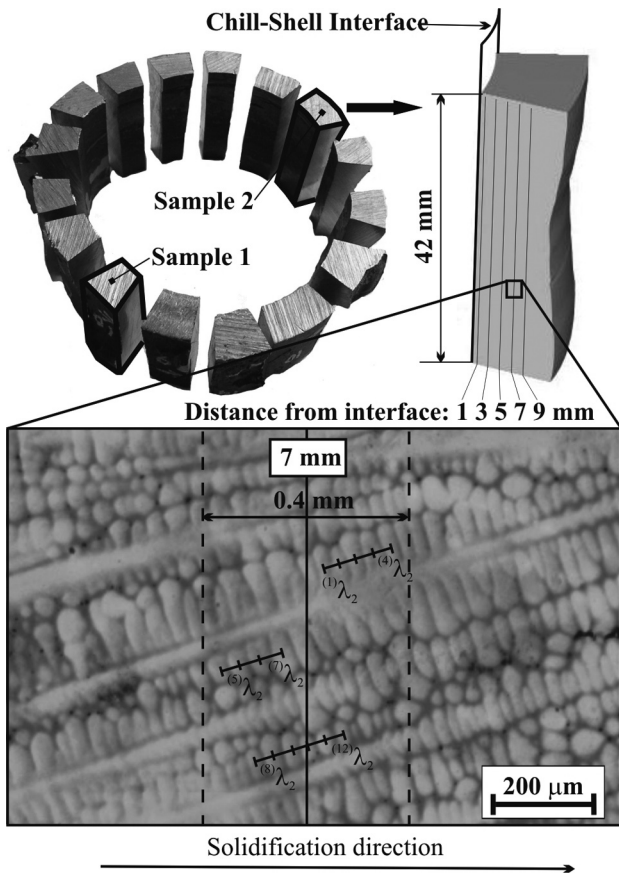


Abb. 4: Primärätzung (11 g CrO<sub>3</sub>, 55 g NaOH, 100 ml H<sub>2</sub>O) eines Stahls mit 0,7% Kohlenstoff und Sekundärarmen sowie eingezeichneten Sekundärarmabständen<sup>25</sup>

„Concentration Mappings“ gemeinsam mit Voestalpine Stahl<sup>9</sup>.

- Die Entwicklung von Ätzmethoden für die Sichtbarmachung und anschließende Vermessung von Sekundärarmabständen in Kohlenstoffstählen<sup>25,26</sup>. Abbildung 4 zeigt die Lage von Schlitzen in einer erstarrten Probe aus einem SSCT-Versuch mit einer Chromsäure-Primärätzung. Im Stahl mit 0,7 Masse-% C sind Sekundärarmabstände deutlich zu erkennen.

Ein aktuelles Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Software als Basis für die automatische Bestimmung von Primärkorngößen in Erstarrungsstrukturen.

## 7. Experimentelle Simulation der beschleunigten Erstarrung

Mit Start des CDL-MCC im Jahr 2002 wurde gemeinsam mit Siemens VAI Metals Technologies das Thema Dünbandgießen von Kohlenstoffstählen in Angriff genommen. In mehr als zweijähriger Arbeit wurde ein Versuchsstand konzipiert, der die Erstarrung eines dünnen Metallplättchens an der Oberfläche eines Substrats ermöglicht, das für wenige Zehntel Sekunden in eine Schmelze eintaucht<sup>27</sup>. Material, Beschichtung und Oberfläche des Substrats werden an die Gießrollenbeschaffenheit der Dünbandgießanlage angepasst. Der Tauchversuch läuft unter Schutzgas ab, was eine weitere wichtige

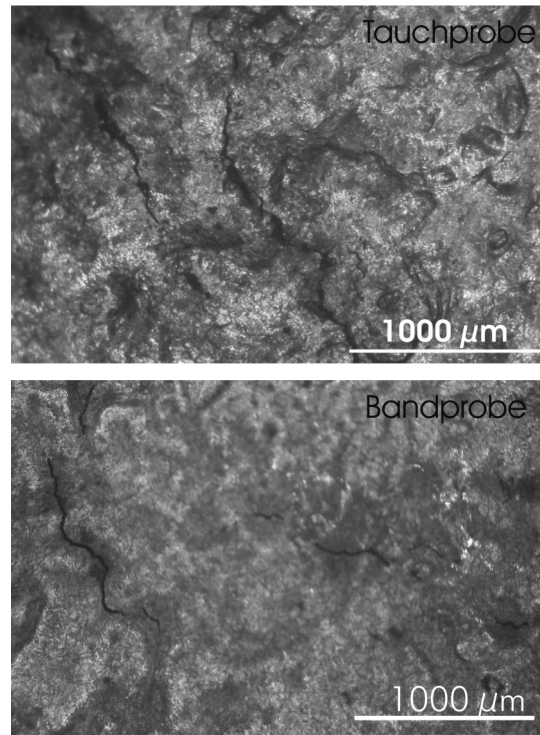


Abb. 5: Mikrorisse in der Oberfläche von Tauchproben und artgleichem, bandgegossenem Material (0,07 % C)

Voraussetzung ist, um das Benetzungsverhalten des flüssigen Stahls auf dem Substrat zu simulieren.

Die erstarrten Plättchen werden nachfolgend einer metallografisch/analytischen Untersuchung unterzogen. Die Ausbildung von Mikrorissen an der Oberfläche wird ebenfalls bewertet. Dadurch lässt sich im Parameterfeld aus Stahlzusammensetzung, metallurgischer Vorbehandlung der Schmelze und den eigentlichen Versuchsparametern die Eignung einer Kombination aus Werkstoff und Substrat für den Dünbandgießprozess abschätzen<sup>28</sup>. Abbildung 5 zeigt die Ausbildung von Mikrorissen in der Oberfläche eines erstarrten Plättchens aus einem niedrigkohligen Stahl mit 0,07 Masse-% C im Vergleich mit einer Probe aus artgleichem, bandgegossenem Material.

Die laufenden Aktivitäten sehen vor, das Fenster der Erstarrungs- und nachfolgenden Abkühlbedingungen in Richtung des Dünbrammengießens zu öffnen. Parallel wurde die Verfolgung der Abkühlung der erstarrten Plättchen durch optische Temperaturmessung in Angriff genommen; die Möglichkeit der gezielten Beeinflussung der Abkühlbedingungen wird derzeit studiert. Die Bestimmung von Werkstoffkennwerten aus den erstarrten Proben ist eine weitere wichtige Entwicklung, die auch das Tor in Richtung einer verfahrensspezifischen Werkstoffentwicklung öffnet. Diese Aktivitäten werden nach Auslaufen des CDL-MCC gemeinsam mit Siemens VAI Metals Technologies und Voestalpine Stahl weitergeführt.

## 8. Numerische Simulation von Gießprozessen

Die numerische Simulation ist heute unverzichtbar zum Verständnis von Laborexperimenten und wesentlich,

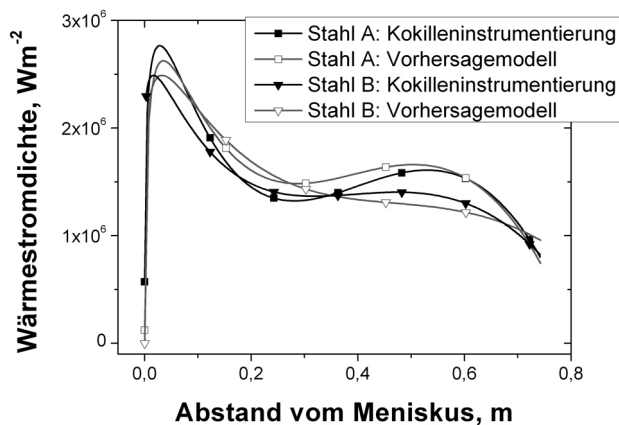


Abb. 6: Berechnete und gemessene Wärmestromdichte über die Höhe einer Rundstrangkokille für einen mittelkohligen (Stahl A) und einen höherkohligen Stahl (Stahl B)<sup>40</sup>

um deren Ergebnisse in den großindustriellen Maßstab übertragen zu können. Im Rahmen des CDL-MCC wurde in Zusammenarbeit mit Voestalpine Stahl Donawitz ein thermisches Modell der Donawitzer Rundstranggießanlage entwickelt<sup>29,30</sup>. Um die Rechenzeiten des ursprünglichen 2D-Finite-Elemente-Modells zu verringern, wurde ein axisymmetrisches 1.5D-Finite-Volumen-Modell konzipiert, das heute lokal beim Industriepartner installiert ist. Der Software sind zahlreiche Stahlmarken hinterlegt, die Gieß- und Abkühlbedingungen können gezielt variiert werden<sup>31</sup>. Damit wurde ein Werkzeug geschaffen, das dem Industriepartner vollständige Unabhängigkeit bei der Anwendung der numerischen Simulation im Hinblick auf Anlagenoptimierungen gibt.

Als zentrales Thema der numerischen Simulation wurde die Bestimmung von Randbedingungen erkannt<sup>32–35</sup>. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit Voestalpine Stahl und Voestalpine Stahl Donawitz wurden mehrfach Temperaturmesskampagnen mit instrumentierten Stranggießkokillen durchgeführt<sup>36–38</sup>. Aus den gemessenen Temperaturen wurden über inverse Modelle die Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Strang und Kokille bestimmt. In weiteren Arbeiten wurde auf Basis eines Gießpulververbrauchsmodells ein Vorhersagemodell für den Wärmeübergang in Rundstranggießkokillen erstellt<sup>39–42</sup>. Das solcherart generierte Modell erlaubt die Vorhersage thermischer Randbedingungen in der Kokille für Kombinationen aus Stahlzusammensetzung, Gießpulver und Gießbedingungen: Abbildung 6 zeigt den Vergleich von Wärmestromdichten aus besagtem Vorhersagemodell mit jenen aus Kokilleninstrumentierungen für einen mittelkohligen Stahl (mit Stahl A bezeichnet) und einen hochkohligen Stahl (Stahl B).

Darüber hinaus erwies sich die Bestimmung von thermischen Randbedingungen in der Sekundärkühlzone als noch schwieriger. Die Literatur bietet zahlreiche Beziehungen an, die aber einer breiten Streuung unterworfen sind. Optische Temperaturmessungen, aber auch Temperaturmessungen mit Schleppthermoelementen sind mit Ungenauigkeiten behaftet, die eine Rückrechnung auf Wärmeübergangskoeffizienten erschweren. Konventionelle Verfahren der Bestimmung von Wärmeübergängen im Labor sind aufwendig. Deshalb wird im Rahmen eines K1-MET-Projektes mit Voestalpine Stahl Donawitz ein neuer Ansatz für die Bestimmung von Wär-

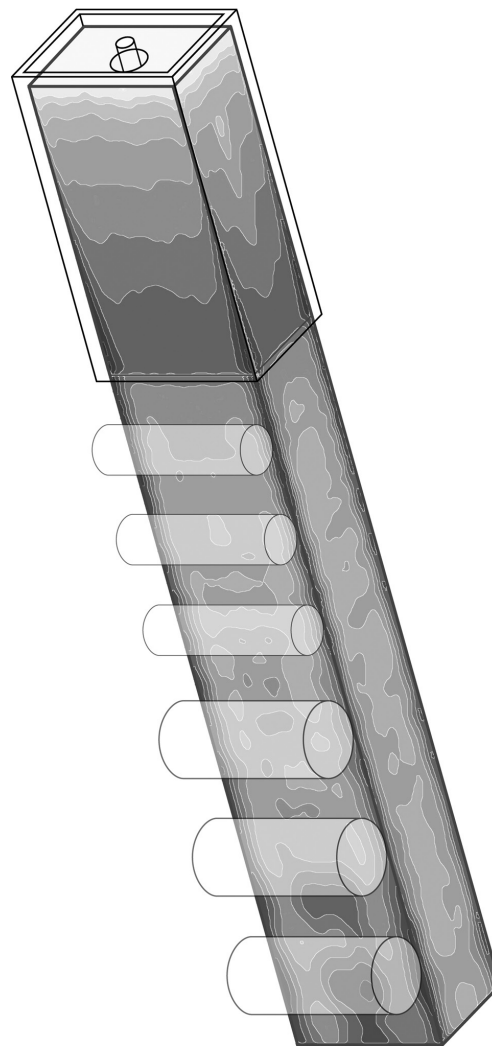


Abb. 7: Temperaturverteilung an der Oberfläche eines Vorblocks mit angedeuteten Stützrollen

meübergangskoeffizienten bei der Spritzwasserkühlung untersucht.

In weiteren Arbeiten im Rahmen des CDL-MCC wurde in Zusammenarbeit mit RHI die Wechselwirkung aus Strömung in der Kokille und der Anfangserstarung untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass es in Brammenstranggießkokillen durch eine starke Anströmung der Brammenschmalseite zu einem lokalen Wiederaufschmelzen kommen kann. In weiterer Folge bilden sich an der Oberfläche Bereiche mit deutlich höherer Temperatur („hot spots“), die wiederum zur Bildung von Oberflächenfehlern oder oberflächennahen Fehlern führen können<sup>32</sup>.

Die derzeitigen Arbeiten mit Voestalpine Stahl Donawitz haben die Erstellung eines 2.5D-Finite-Volumen-Modells der Vorblockstranggießanlage CC2 zum Inhalt, mit dem Ziel, ein ausreichend schnell rechnendes, selbstständiges Werkzeug für Berechnungen an der Anlage zu generieren<sup>44</sup>. Der entsprechende Modul im CDL-MCC wird im kommenden Jahr fortgesetzt. In Abbildung 7 ist beispielhaft die mit einem thermischen Modell berechnete Oberflächentemperatur im obersten Bereich der Stranggießanlage (Kokille und Beginn Sekundärkühlzone) dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung ist ein Teil der Gießanlage schematisch skizziert.

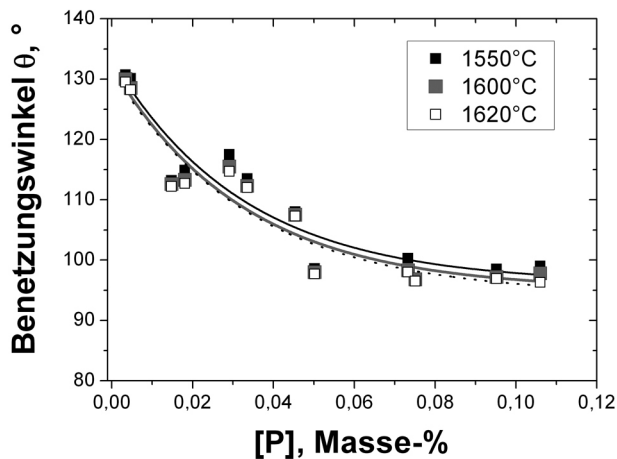


Abb. 8: Benetzungswinkel zwischen einer Fe-P-Legierung und Tonerde in Abhängigkeit des P-Gehalts<sup>45</sup>

## 9. Benetzungsverhalten zwischen Stahl und Keramik

In Zusammenhang mit unterschiedlichsten Phänomenen des Stranggießens spielen Grenzflächeneigenschaften eine große Rolle: Agglomeration und Abscheidung nicht-metallischer Einschlüsse, Ablagerung von Einschlüssen im Eintauchguss, Korrosion von Eintauchgüssen, Einziehung von Schlacke, Ausbildung des Meniskus und die Bildung von Oszillationsmarken sind die wichtigsten Beispiele<sup>44</sup>.

Um das Benetzungsverhalten zwischen Stahl und Keramik experimentell untersuchen zu können, wurde im Jahr 2003 am Lehrstuhl für Metallurgie ein Tropfenkonturanalysesystem, basierend auf der Methode des liegenden Tropfens, angeschafft. Parallel wurde gemeinsam mit Voestalpine Stahl am CDL-MCC ein Modul mit dem Ziel gestartet, ein umfangreiches System aus Fe-X-Zweistoffsystemen und Fe-X-Y-Dreistoffsystemen in Kontakt mit Tonerde zu vermessen. Hintergrund der Arbeit war auch, Rückschlüsse auf die Auswirkung der Stahlzusammensetzung auf Cloggingscheinungen beim Stranggießen zu bewerten.

Abbildung 8 zeigt die gemessenen Kontaktwinkel zwischen Stahlschmelzen und Tonerde für zunehmende P-Gehalte<sup>45</sup>. Bereits 0,02 Masse-% P reichen aus, um den Benetzungswinkel von rund 140 ° für Reineisen bei 1600 °C auf rund 115 ° abzusenken. Dadurch ändern sich auch die Bedingungen für die Agglomeration von Tonerdepartikeln in einer Schmelze und die Abscheidung der Tonerdepartikel an Feuerfestwerkstoffen.

Grenzflächeneigenschaften spielen eine zentrale Rolle in allen metallurgischen Systemen. Deshalb soll in weiterer Folge die vorhandene Tropfenkonturanalytik in ein neues K2-MPPE-Projekt eingebracht werden und im Rahmen dieses Projekts unterschiedliche Systeme aus Stählen, Schlacken, Feuerfestwerkstoffen und nichtmetallischen Einschlüssen untersucht werden. Parallel wird die Einrichtung auch für die Messung der Dichte flüssiger Schlacken adaptiert.

## 10. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit fasst wesentliche Ergebnisse aus sieben Jahren Stranggießforschung am Christian-Doppler-Labor für „Metallurgische Grundlagen von Stranggießprozessen“ zusammen.

In einzelnen Themengebieten, wie der Bildung von Fehlern während der Erstarrung im Stranggießprozess, konnte auch international die Themenführerschaft erreicht werden. Wesentliche neue Themen wurden erschlossen, dazu gehören neben der numerischen Simulation die experimentelle Untersuchung der Erstarrung bei beschleunigter Abkühlung sowie die experimentelle Bestimmung von Grenzflächeneigenschaften in metallurgischen Systemen.

Parallel zum Auslaufen des Christian-Doppler-Labors mit Ende des Jahres 2008 wurden bereits neue Projekte gestartet, die auch in den nächsten Jahren eine unverminderte und teils sogar verstärkte Fortführung der Aktivitäten erlauben werden.

## Danksagung

Im Namen der Mitarbeiter des Christian-Doppler-Labors für „Metallurgische Grundlagen von Stranggießprozessen“ und im Namen des Autors sei an dieser Stelle Professor Wilfried Krieger für die Initiative zur Gründung des Labors, für die beständige Motivation und Unterstützung über viele Jahre und vor allem für den Freiraum zur selbstständigen Entwicklung gedankt.

## Literaturverzeichnis

- <sup>1</sup> Xia, G.: Untersuchungen über das mechanische Verhalten von erstarrendem Stahl unter stranggießähnlichen Bedingungen. Dissertation, Institut für Eisenhüttenkunde, Montanuniversität Leoben, 1992.
- <sup>2</sup> Zirngast, J.: Zugversuche an direkt aus der Schmelze erstarrten Stahlschalen mit einem Erstarrungssimulator. Dissertation, Institut für Eisenhüttenkunde, Montanuniversität Leoben, 1993.
- <sup>3</sup> Ackermann, P., W. Kurz und W. Heineemann: In situ tensile testing of solidifying aluminium and Al-Mg shells. *Materials Science and Engineering* 75 (1985), 1–2, 79–86.
- <sup>4</sup> Wagnieres, J. D., und P. Ackermann: Le laboratoire d'aujourd'hui pour les brames de demain. *La Revue Politechnique* 6 (1985), 669–673.
- <sup>5</sup> Wolf, M.: Continuous Casting, Volume 9: Initial Solidification and Strand Surface Quality of Peritectic Steels. The Iron & Steel Society, Warrendale, 1997.
- <sup>6</sup> Bernhard, C., H. Hiebler und M. Wolf: Experimental simulation of subsurface crack formation in continuous casting. *La Revue de Métallurgie* 97 (2000), 3, 333–344.
- <sup>7</sup> Bernhard, C., H. Hiebler und M. Wolf: Simulation of shell strength properties by the SSCT-test. *ISIJ International, Suppl. Science and Technology of Steelmaking* 36 (1996), 163–166.
- <sup>8</sup> Hiebler, H., und C. Bernhard: Mechanical properties and crack susceptibility of steel during solidification. *Steel Research* 69 (1999), 8+9, 349–355.
- <sup>9</sup> Ilie, S., J. Reiter, J. Fluch, H. Presslinger und C. Bernhard: Characterization of hot tear segregations in continuous casting of slabs. 6<sup>th</sup> European Continuous Casting Conference, Riccione, Italien, 3.–6. Juni, (2008), Vortrag Nr. 122.
- <sup>10</sup> Bernhard, C., R. Pierer und C. Chimani: A new hot tearing criterion for the continuous casting of steel. 5<sup>th</sup> Decennial International Conference on Solidification Processing, Sheffield, Großbritannien, 23.–25. Juli (2007), 525–530.
- <sup>11</sup> Pierer, R., C. Bernhard und C. Chimani: A contribution to hot tearing in the continuous casting process. *La Revue de Métallurgie* (2007), 2, 72–83.
- <sup>12</sup> Bernhard, C.: Über Zusammenhänge zwischen Prozess und Produktqualität beim Stranggießen von Stahl am Beispiel der Heißrissbildung. Habilitationsschrift, Lehrstuhl für Metallurgie, Montanuniversität Leoben, 2007.
- <sup>13</sup> Pierer, R., J. Reiter, S. Griesser und C. Bernhard: On the phenomenon of the formation of segregated hot tears. Vortrag auf der 2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Solidification Processes (ICASP-2), Seggau, Österreich, 17.–20. Juni (2008).
- <sup>14</sup> Bernhard, C., und G. Xia: Influence of alloying elements on the thermal contraction of

peritectic steels during initial solidification. *Ironmaking and Steelmaking* 33 (2006), 1, 52–56. – <sup>15</sup> *Bernhard, C., und G. Xia*: Influence of alloying elements on thermal contraction of peritectic steels during initial solidification. 4<sup>th</sup> European Continuous Casting Conference, Birmingham, Großbritannien, 14.–16. Oktober (2002), 131–138. – <sup>16</sup> *Pierer, R., und C. Bernhard*: High temperature behavior during solidification of peritectic steels and continuous casting conditions. *Materials Science & Technology (MS&T '06)*, Cincinnati, USA, 15.–19. Oktober (2006), 793–803. – <sup>17</sup> *Tubikanec, A., C. Chimani und C. Bernhard*: The newly developed In-situ Material Characterization (IMC-) test: installation, start-up and first results. 6th European Continuous Casting Conference, Riccione, Italien, 3.–6. Juni (2008), Vortrag Nr. 86. – <sup>18</sup> *Mintz, B.*: The influence of composition on the hot ductility of steels and to the problem of transverse cracking. *ISIJ International* 39 (1999), 9, 833–855. – <sup>19</sup> *Bernhard, C., R. Pierer, A. Tubikanec und C. Chimani*: Experimental characterization of crack sensitivity under continuous casting conditions. CCR'04 – Continuous Casting and Hot Rolling Conference, Linz, Österreich, 14.–15. Juni (2004), Vortrag Nr. 6.3. – <sup>20</sup> *Rowan, M., B.G. Thomas, R. Pierer und C. Bernhard*: Solidification stresses in steel for continuous casting conditions. TMS 2009 – 138th Annual Meeting and Exhibition, San Francisco, USA, 15.–19. Februar (2009). – <sup>21</sup> *Chimani, C., C. Bernhard und A. Tubikanec*: Verfahren zur Ermittlung von mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen sowie Vorrichtung hierzu. Patentschrift AT 413243 B, (2005). – <sup>22</sup> *Bernhard, C., J. Reiter und H. Preßlinger*: A model for predicting the austenite grain size at the surface of continuously cast slabs. *Met. Trans. B*, 39 (2008), 885–895. – <sup>23</sup> *Bernhard, C., J. Reiter und H. Preßlinger*: Simulation of austenite grain growth in continuous casting. AISTech 2007, The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Indianapolis, USA, 7. – 10. Mai (2007). – <sup>24</sup> *Reiter, J., und C. Bernhard*: Austenite grain size in the continuous casting process: metallographic methods and evaluation. *Materials Characterization* 59 (2008), 737–746. – <sup>25</sup> *Pierer, R., und C. Bernhard*: On the influence of carbon on secondary dendrite arm spacing in steel. *Journal of Materials Science* 43 (2008), 6938–6943. – <sup>26</sup> *Reiter, J., S. Ilie, R. Pierer und C. Bernhard*: Über den Zusammenhang zwischen Primärstruktur und erstarrungsbedingten Fehlern am Beispiel der Heißrissbildung beim Stranggießen. 42. Metallographie-Tagung, Jena, Deutschland, 17.–19. September (2008), 185–190. – <sup>27</sup> *Linzer, B., C. Bernhard und G. Hohenbichler*: Experimentelle Simulation von gegossenen Dünnbändern. BHM 149 (2004), 107–111. – <sup>28</sup> *Bernhard, C., G. Eckersdorfer, G. Hohenbichler und B. Linzer*: Verfahren zur Herstellung eines Stahlbandes. Patentschrift AT 504225 B1, (2008). – <sup>29</sup> *Lechner, M., W. Rauter und J. Reiter*: Erstellung und Validierung numerischer Modelle für das Stranggießen von Stahl. 10. Internationaler Studententag der Metallurgie, Leoben, Österreich, 3.–5. April (2003), 90–94. – <sup>30</sup> *Bernhard C., M. Lechner, M. Forsthuber, E. Doring und W. Rauter*: Numerical simu-

lation of solidification in continuous casting of rounds. *Continuous Casting of Billets and Modelling of Steelmaking Processes*, Trinec, Tschechische Republik, 21.–23. Oktober (2003), 251–259. – <sup>31</sup> *Michelic, S.*: Thermal modelling of a continuous casting machine, 12. Internationaler Studententag der Metallurgie, Ostrava, Tschechische Republik, 26.–28. Mai (2005), 61–69. – <sup>32</sup> *Lechner, M., J. Reiter, C. Bernhard, M. Forsthuber und O. Zach*: Bestimmung und Bedeutung der Randbedingungen für die Simulation von Stranggießprozessen. BHM 149 (2004), 101–106. – <sup>33</sup> *Forsthuber, M., W. Rauter, E. Doring, C. Bernhard und C. Chimani*: Einsatz moderner Messtechnik zur Beurteilung der Erstarrungsvorgänge beim Stranggießen. BHM 149 (2004), 77–83. – <sup>34</sup> *Bernhard, C., J. Reiter, M. Lechner, K. Koenig und S. Michelic*: Metallurgical aspects of the numerical simulation of continuous casting. EuroPAM 2005, Potsdam, Deutschland, 06. Oktober (2005). – <sup>35</sup> *Reiter, J., S. Michelic, M. Lechner und C. Bernhard*: Thermische Randbedingungen beim Stranggießen von Stahl. Strömungssymposium, Wurzeralm, Österreich, 1.–4. März (2006). – <sup>36</sup> *Doring, E.*: Untersuchung der Wärmeabfuhr in der Stranggießkokille. Diplomarbeit, Institut für Eisenhüttenkunde, Montanuniversität Leoben, 2000. – <sup>37</sup> *Rauter, W.*: Einfluss ausgewählter Gießparameter auf die Wärmeabfuhr in der Rundstranggießkokille. Diplomarbeit, Institut für Eisenhüttenkunde, Montanuniversität Leoben, 2001. – <sup>38</sup> *Tince, T.*: Einfluss der Kokillenkonizität auf die Wärmestromdichte. Diplomarbeit, Institut für Eisenhüttenkunde, Montanuniversität Leoben, 2003. – <sup>39</sup> *Arth, G., S. Michelic, J. Schmidl und S. Wallner*: Gießpulververbrauch beim Stranggießen von Stahl. Bakkalaureatsarbeit, Lehrstuhl für Metallurgie, Montanuniversität Leoben, 2004. – <sup>40</sup> *Michelic, S., C. Bernhard und R. Pierer*: Numeric modelling of the heat transfer in the continuous casting mould. *SteelSim 2007*, Graz/Seggau, Österreich, 12.–14. September (2007), 209–215. – <sup>41</sup> *Rauter, W., M. Erker, W. Brandl, S. Michelic und C. Bernhard*: Heat transfer in a round cc mould: measurement, modelling and validation. 6th European Continuous Casting Conference, Riccione, Italien, 3.–6. Juni (2008), Vortrag Nr. 30. – <sup>42</sup> *Michelic, S., C. Bernhard, W. Rauter und A. Sormann*: On the interrelation of heat withdrawal and crack formation in the continuous casting. 2nd International Conference on Advances in Solidification Processes (ICASP-2), Graz/Seggau, Österreich, 17.–20. Juni (2008). – <sup>43</sup> *Michelic, S.*: Evaluation of solution algorithms for modelling solidification processes, Junior Euromat, Lausanne, Schweiz, 14.–18. Juli (2008), Vortrag K234. – <sup>44</sup> *Karasangabo, A., und C. Bernhard*: Castability of Steels: Influence of the interfacial properties on the continuous casting process. BHM 149 (2004), 83–89. – <sup>45</sup> *Bernhard, C., A. Karasangabo, H. Presslinger und P. Reisinger*: Determination of the nature of liquid steel-alumina interfacial interactions from sessile drop measurements: cases of Fe-Ti and Fe-P alloys. 2<sup>nd</sup> Chinese-German Seminar on Metallurgical Fundamentals of Metallurgy, Düsseldorf, Deutschland, 18.–19. Juni (2007).