

Die interaktive Stranggießsimulation auf www.steeluniversity.org

The interactive continuous casting simulation at www.steeluniversity.org

C. Bernhard und T. Sjökvist

Entwicklungsstand der internetbasierenden, interaktiven Lernplattform www.steeluniversity.org des International Iron and Steel Institute (IISI) – Entwicklung der Stranggießsimulation am Christian Doppler – Labor für „Metallurgische Grundlagen von Stranggießprozessen“ – Umsetzung, metallurgische Hintergründe und Lernziele.

Status of the internetbased, interactive e-learning platform www.steeluniversity.org, developed by the International Iron and Steel Institute (IISI) – Development of the storyboard for the continuous casting simulation – Realization by MATTER at University of Liverpool – Metallurgical background and learning outcomes.

1. Einleitung

Die Entwicklung der internetbasierenden, interaktiven Lernplattform www.steeluniversity.org ist ein Leitprojekt des International Iron and Steel Institute (IISI) mit einem Gesamtbudget von mehr als 2,5 Mio. Euro. Über den Entwicklungsstand wurde mehrfach berichtet^{1,2}. Ziel des Projektes ist, junge Menschen aus dem universitären, aber auch dem industriellen Umfeld, in zeitgemäßer Art und Weise mit der Metallurgie der Stahlherstellung und dem Werkstoff Stahl vertraut zu machen. Mit Ende des Jahres 2005 waren sechs Module fertiggestellt, weitere neun Module befinden sich in der Entwicklungsphase. Die Entwicklung der einzelnen steeluniversity.org - Module beginnt mit der Vorbereitung eines sogenannten „Storyboards“ durch einen Fachmann, meist aus dem universitären Bereich. Das Storyboard

beinhaltet die Entwicklung und Formulierung der Zusammenhänge für ein Modell des betrachteten Prozesses, sowie eine Beschreibung der technischen Hintergründe. Darauf aufbauend wird von MATTER an der Universität von Liverpool eine interaktive Simulation programmiert, wobei Softwareentwickler und Autor in ständigem Austausch stehen. Fachleute aus der Industrie werden frühzeitig miteinbezogen. Die Entwicklungsdauer für ein einzelnes Module kann, je nach Komplexität, deutlich mehr als ein Jahr betragen. Die Entwicklung des Stranggießmoduls begann 2004, im Juni 2005 wurde eine Evaluierungsversion auf der Homepage von steeluniversity.org veröffentlicht und zeitgleich bei der „European Continuous Casting Conference“ in Nizza vorgestellt³.

2. Prozessmodelle

Eine der Vorgaben für die Entwicklung des Stranggießmoduls war es, jene vier Stahlsorten in einer Sequenz von drei Chargen zu vergießen, die im Sekundärmetallurgiemodul hergestellt werden können, **Tabelle 1**.

Eine spätere Kopplung der beiden Module ist vorgesehen. Die vier vorgegebenen Stähle sollen an bestimmten Stranggießanlagen vergossen werden. **Tabelle 2** zeigt die wichtigsten Daten der konzipierten Brammen-, Vorblock- und Knüppelstranggießanlage.

Stahlsorte	A	B	C	D
Typ	Höherfester Baustahl	Nb- und Ti-legierter ULC-Stahl	Mikrolegierter Röhrenstahl	Baustahl
C, %	0,145	< 0,003	0,07	0,42
Si, %	0,20	0,21	0,18	0,40
Mn, %	1,40	0,75	1,05	0,75
Sonstige	Nb, Al	P, Nb, Ti, Al	Nb, Al	Cr, Ni, Mo, B, Al

Tabelle 1: Bezeichnung und Zusammensetzung der zu vergießenden Stahlsorten in Gewichtsprozent

Auf Grund der komplexen Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Produktqualität erwies sich die Abbildung des Stranggießprozesses in Modellen als besondere Herausforderung: Die Zusammenhänge sollten authentisch sein, aber zugleich für den Anwender in einem begrenzten Zeitraum beherrschbar. Aus der Vielzahl von Qualitätsmerkmalen für stranggegossenes Halbzeug wurden deshalb nur jene ausgewählt, die sich für die Vermittlung der Lernziele eignen.

2.1 Erstarrungsmodell

Eingangsgrößen für die Erstarrungsberechnung sind Gießtemperatur, Gießgeschwindigkeit, Gießformat und Anlagenkonfiguration sowie die Kühlwassermenge in der Sekundärkühlzone. Die Wärmeabfuhr in der Kokille hängt von der Gießgeschwindigkeit ab, kann vom Anwender aber nicht beeinflusst werden. Ausgangsgrößen für die gekoppelten Modelle sind das Schalenwachstum, die Oberflächentemperatur und die metallurgische Länge.

Die drei Stranggießanlagen wurden mit Hilfe des Softwarepakets calcsoft2D abgebildet. **Abbildung 1** zeigt das Layout der Brammenstranggießanlage mit den gewählten Rollenabständen, sowie der Einteilung der Sekundärkühlung in Kühlzonen. Zwischen den einzelnen Kühlzonen wurde ein bestimmtes Verhältnis der Kühlwassermengen vorgegeben, die Gesamtkühlwassermenge pro Kilogramm vergossenem Stahl kann vom Anwender gewählt werden. Die Randbedingungen für die Berechnungen wurden der Literatur entnommen⁴.

Tabelle 3 zeigt einen Überblick über die berücksichtigten Qualitätsmerkmale, sowie die Qualitätskriterien und damit zusammenhängende Prozessgrößen.

Stranggießanlage	Bramme	Vorblick	Knüppel
Stahlsorten	B, C	A	D
Pfanneninhalt, t	250	100	100
Verteilerinhalt, t	60	30	30
Radius, m	9	12	8
Anzahl der Stränge	2	5	6
Gießgeschwindigkeit, m/min	1,0 – 2,0	1,2 – 1,8	3,0 – 5,0
Format, mm x mm	1200x230	250x250	130x130

Tabelle 2: Wichtigste Daten der drei Stranggießanlagen

Für jede virtuelle Stranggießanlage und jede Stahlsorte wurde ein Modell entwickelt, das die Prozessparameter mit den Qualitätskriterien verknüpft. Im Folgenden werden diese Modelle kurz beschrieben.

	Fehlerart	Fehlerkriterien und zusammenhängende Prozessgrößen	
Oberflächenqualität	Oberflächenquerisse im zweiten Duktilitätstief	Dehnung an der Oberfläche	> Kritische Dehnung
		Gießgeschwindigkeit (Sekundär-kühlung Softrreduction)	Stahlsorte Oberflächentemperatur Oszillationsmarkentiefe
Oberflächenqualität	Tiefe Oszillationsmarken	Oszillationsmarkentiefe	> Kritische Oszillationsmarkentiefe
		Hub und Frequenz Gießgeschwindigkeit	Stahlsorte
Innenqualität	Heißrisse	Dehnung im Zweiphasengebiet	> Kritische Dehnung
		Gießgeschwindigkeit Rollenversatz Softrreduction	Stahlsorte Dehnrates
Innenqualität	Zentrumsseigerungen	Seigerungsindex	> Kritischer Seigerungsindex
		Gießgeschwindigkeit Gießformat Softrreduction (Bramme) EMS (Bloom, Knüppel)	Stahlsorte
Reinheitsgrad	Reinheitsgrad	Verweildauer	< Kritische Verweildauer
		Füllhöhe im Verteiler Gießgeschwindigkeit	Stahlsorte

Tabelle 3: Qualitätsmerkmale, Fehlerkriterien und zusammenhängende Prozessgrößen

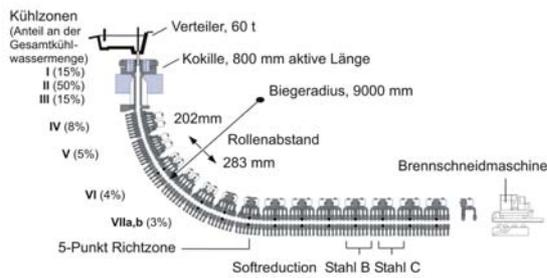


Abb 1: Layout der Brammenstranggießanlage mit wesentlichen Anlagenelementen und der Unterteilung in Kühlzonen

Abbildung 2 zeigt den Temperaturverlauf an der Oberfläche für drei unterschiedliche Kombinationen von Gießgeschwindigkeit und Kühlwassermenge für den Stahl C. Die errechneten metallurgischen Längen liegen zwischen 17,7 und 38,6 m. Die Position der Sumpfspitze ist vor allem für den richtigen Einsatz der Softreduction von Bedeutung.

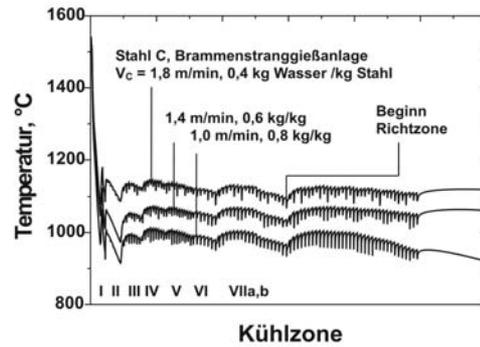


Abb 2: Temperaturverlauf an der Oberfläche für drei Kombinationen aus Gießgeschwindigkeit und Kühlwassermenge, Stahl C, Brammenstranggießanlage

Die Oberflächentemperatur liegt bei einer Gießgeschwindigkeit von 1 m/min und der Kühlwassermenge 0,8 kg pro kg vergossenem Stahl beim Eintritt in die Richtzone bei unter 1000 °C, also in einem Bereich, in dem es bei mikrolegierten Stählen zur Bildung von Oberflächenrissen kommen kann (dazu Kapitel 2.3 „Oberflächenrisse“).

2.2 Innenqualität

Qualitätskriterien für die Beurteilung der Innenqualität sind das Auftreten von Innenrissen und die Überschreitung der

vorgegebenen Limits für den Seigerungskoeffizienten im Strangzentrum.

2.2.1 Innenrissbildung

Innenrisse bilden sich, wenn die Dehnung im Zweiphasengebiet die kritische Dehnung überschreitet. Die Berechnung der Dehnung im Zweiphasengebiet erfolgte nach folgenden empirischen Formeln für Biegen und Richten, Ausbauchen, sowie Rollenschlag und Softreduction⁵⁻⁷:

Für die Dehnung auf Grund von Biegen und Richten, ε_{BS} in %, gilt an der Rolle n:

$$\varepsilon_{BS} = 100 \cdot \left(\frac{d}{2} - S \right) \cdot \left| \frac{1}{R_{n-1}} - \frac{1}{R_n} \right| \quad (1)$$

wobei d die Dicke des Halbzeugs in mm, S die lokale Strangschalendicke an der Rolle n in mm und R_{n-1} und R_n die Biege- bzw. Richtradien an den Rollen n-1 und n sind (beide in mm). Es wurde eine Fünfpunktbiege- und -richtzone angenommen.

Die Dehnung im Zweiphasengebiet durch das Ausbauchen der Strangschale, ε_B (%), wird für die n-te Rolle nach

$$\varepsilon_B = \frac{0,101972 \cdot P \cdot l^3}{3800 \cdot S^3} \cdot 100 \quad (2)$$

berechnet. P ist der lokale ferrostatische Druck in N/mm^2 und l der Rollenabstand in mm.

Für die Dehnung durch Rollenversatz und Softreduction, ε_M in %, gilt vereinfacht:

$$\varepsilon_M = 1,15 \cdot \frac{3 \cdot S \cdot \delta_M}{l^2} \cdot 100 \quad (3)$$

wobei δ_M der Rollenversatz in mm ist. Für den Anwender besteht die Möglichkeit, seine Stranggießanlage vor Gießbeginn

auf Rollenversatz überprüfen zu lassen. Macht er davon keinen Gebrauch, werden während des Gießens nach dem Zufälligkeitsprinzip Rollen versetzt. Es besteht, im Gegensatz zur Praxis, die Möglichkeit den Rollenversatz während des Gießens zu beheben.

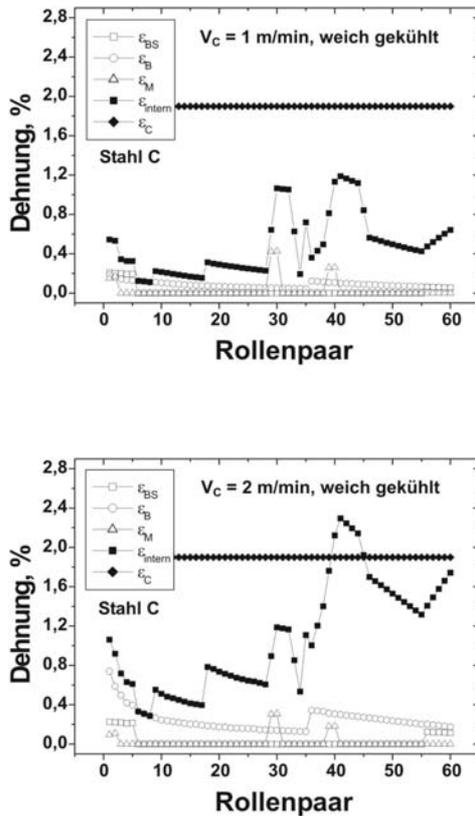


Abb 3: Dehnung auf Grund von Biegen, Richten, Rollenversatz und Ausbauchen beim Vergießen des Stahls C mit 1 bzw. 2 m/min und einer Kühlwassermenge von 0,4 kg pro kg vergossenem Stahl

2.2.2 Zentrumsseigerungen

Die Beschreibung von Zentrumsseigerungen ist noch immer Gegenstand laufender Forschungsaktivitäten und entzieht sich einer einfachen Berechnung. Um Zentrumsseigerungen als wichtiges Qualitätsmerkmal in der Simulation berücksichtigen zu können, wurde auf eine empirische Formel von Wolf⁹, basierend auf einer Auswertung von Literaturdaten, zurückgegriffen, **Abbildung 4**. Darin wird die Kohlenstoffanreicherung mit V_E , einer

Die gesamte Dehnung im Zweiphasengebiet, $\varepsilon_{\text{intern}}$ in %, wird als

$$\varepsilon_{\text{intern}} = \varepsilon_{BS} + \varepsilon_B + \varepsilon_M \quad (4)$$

berechnet und im Zweiphasengebiet akkumuliert.

Für die Berechnung der kritischen Dehnung, ε_C in %, wurde ein Ansatz von Won übernommen⁸:

$$\varepsilon_C = \frac{\varphi}{\dot{\varepsilon}^m \cdot \Delta T_B^n} \quad (5)$$

φ ist eine Konstante und beträgt 0,148, $\dot{\varepsilon}$ ist die lokale Dehnrates in 1/s, ΔT_B die Breite des kritischen Temperaturintervalls in K, m und n betragen 0,0048 bzw. 0,62². Die kritische Dehnung ist damit von der Stahlzusammensetzung abhängig, und liegt für die Stähle B und C bei etwa 2%, für die Stähle A und D bei weniger als 1%. Überschreitet die Dehnung im Zweiphasengebiet die kritische Dehnung kommt es zur Bildung von Innenrisen.

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der akkumulierten Gesamtdehnung für die Gießgeschwindigkeit von 1 m/min (oben) und 2 m/min beim Vergießen des Stahls C an der Brammenstranggießanlage. Im ersten Fall wird die kritische Dehnung nicht erreicht, im Zweiten kommt es zur Bildung von Innenrisen. Dies ist in der Aufzeichnung der Produktqualität ersichtlich und kann durch Veränderung der Gießgeschwindigkeit und Behebung eines eventuellen Rollenversatzes verhindert werden.

dimensionslosen, sogenannten „äquivalenten Gießgeschwindigkeit“ korreliert:

$$V_E = V_C \cdot D \cdot K^{-2} \left(\frac{W}{D} \right)^{-0.25} \quad (6)$$

V_C ist die Gießgeschwindigkeit in m/min, D die Gießdicke in m, K die Erstarrungskonstante in m/ $\sqrt{\text{min}}$ und W die Gießbreite in m. Mit steigender äquivalenter Gießgeschwindigkeit steigt der Seigerungskoeffi-

zient. Für jede Stahlsorte wurde ein kritischer Seigerungskoeffizient definiert, für Stahl C liegt dieser bei 1,2. Wird der Grenzwert überschritten, wird die Zentrumsseigerung zum Fehler.

Gegenmaßnahmen bilden die Softreduction für die Brammenstranggießanlage und das elektromagnetische Rühren für die Vorblock- und Knüppelstranggießanlage. Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der Softreduction ist die richtige Positionierung der Sumpfspitze: liegt die Position der Sumpfspitze vor der Softreduction ist diese wirkungslos, liegt sie dahinter wirkt die Softreduction negativ. Die Lage der Sumpfspitze wird durch Überhitzung, Gießgeschwindigkeit und Kühlwassermenge reguliert.

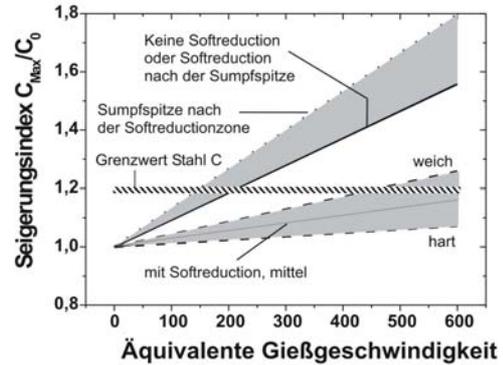


Abb 4: Seigerungsindex in Abhängigkeit der dimensionslosen äquivalenten Gießgeschwindigkeit und Auswirkung der Softreduction nach Wolf⁹

2.3 Oberflächenqualität

Die Oberflächenqualität kann durch tiefe Oszillationsmarken und Oberflächenrisse,

welche sich im zweiten Duktilitätstief bilden, beeinträchtigt werden.

2.3.1 Oberflächenrisse

In ähnlicher Weise wie für das Zweiphasengebiet wird die Dehnung an der Strangoberfläche, ε_{surf} in %, als Summe der Dehnungen durch Biegen und Richten, ε_{BS} , Ausbauchen, ε_B , und thermische Kontraktion, ε_{th} , berechnet¹⁰:

$$\varepsilon_{surf} = \varepsilon_{BS} + \varepsilon_B + \varepsilon_{th} \quad (7)$$

Für die Berechnung der Biege- und Richtdehnungen gilt sinngemäß Gleichung (1), die Oberflächendehnung durch Ausbauchen ist gleich jener im Zweiphasengebiet.

Die thermische Dehnung wird als

$$\varepsilon_{th} = \alpha \cdot \Delta T \cdot 100 \quad (8)$$

berechnet, wobei der thermische Expansionskoeffizient α in $1/K$ stahlsortenspezifisch und ΔT als Oberflächentemperaturdifferenz zwischen der Rolle n-1 und n errechnet wird.

Die Bildung von Oberflächenrisen spielt in der Simulation nur für die Niobmikrolegierten Stähle eine Rolle. Bei diesen Stählen kommt es unter der Nb(C,N) Ausscheidungstemperatur zu einer deutlichen Verminderung der Zähigkeit¹⁰. Neben der Ausscheidungstemperatur spielt auch die Tiefe der Oszillationsmarken eine große Rolle: Oszillationsmarkentiefen von 0,2 mm oder mehr vermindern die kritische Dehnung um bis zu 75 %. Dies wurde der Berechnung der stahlsorten- und temperaturspezifischen kritischen Dehnungswerte zugrundegelegt, die im ungünstigsten Fall bei nur 8% liegen können. Wird die kritische Dehnung überschritten, kann der Anwender vor allem durch eine Veränderung der Gießgeschwindigkeit reagieren. Eine Veränderung der Kühlwassermenge ist während der Simulation noch nicht möglich.

2.3.2 Oszillation, Oszillationsmarken und Gießpulver

Um die Tiefe der Oszillationsmarken in einfacher Weise von den Oszillationsparametern und der Gießgeschwindigkeit abhängig zu machen, wurden Messergebnisse von Schürmann¹¹ mit der Hubhöhe und der „Negative strip time“, t_N in s,

$$t_N = \frac{60}{\pi \cdot f} \cdot \arccos \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot f \cdot H} \quad (9)$$

korreliert. Hier ist f die Hubfrequenz in 1/min, H der Hub in mm und V_c die Gießgeschwindigkeit in m/min. Eine Zunahme von Hub und t_N führt zu tieferen Oszillationsmarken. Überschreitet die Oszillationsmarkentiefe einen für jede Stahlsorte festgelegten Maximalwert, werden die Oszillationsmarken als Oberflächenfehler bewertet.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Festlegung der Oszillationsparameter ist der Gießpulververbrauch. Dem Anwender stehen fünf Gießpulver zur Verfügung, von denen Viskosität und „Break temperature“, also jene Temperatur bei deren Unterschreitung es zu einem starken Anstieg der Viskosität kommt, bekannt sind,

Abbildung 5.

Für die Gießpulverauswahl wurde nach Wolf¹² und Normanton¹³ angenommen, dass für rissempfindliche, im Bereich der peritektischen Umwandlung liegende Stahlsorten (A, C) Gießpulver mit hoher „Break temperature“ und für Stähle die zu „Schalenhängern“ neigen (B), eher Gießpulver mit niedriger „Break temperature“ Verwendung findet. Mit zunehmender Gießgeschwindigkeit sollte die Viskosität des ausgewählten Gießpulvers geringer sein. Liegt der Anwender in seiner

Entscheidung deutlich falsch, folgt bereits bei Gießbeginn ein Ausbruch.

Für die Berechnung des Gießpulververbrauchs Q in kg/m^2 Strangoberfläche wurde folgender empirische Ansatz nach¹⁴ verwendet:

$$Q = \frac{1,7 \cdot t_N}{\sqrt{\eta \cdot V_c}} \quad (10)$$

η ist die Viskosität des Gießpulvers bei $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ in Pas. Wird ein Mindestgießpulververbrauch von $0,3 \text{ kg/m}^2$ Strangoberfläche ($0,15 \text{ kg/m}^2$ für die Knüppelstranggießanlage) unterschritten, ist die notwendige Schmierwirkung nicht mehr gegeben, und es kommt zum Ausbruch.

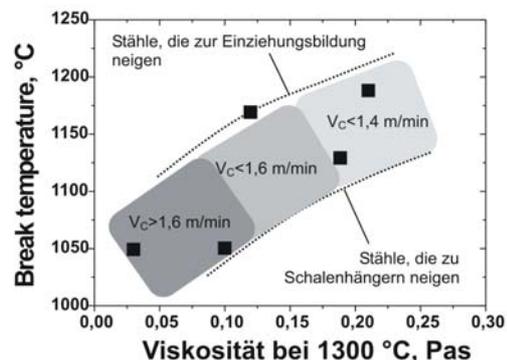


Abb 5: „Break temperature“ und Viskosität bei $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ für die verfügbaren Gießpulver mit Richtlinien für die Auswahl nach Wolf¹³ und Normanton¹⁴

Damit entsteht für die Auswahl der Oszillationsbedingungen ein Betriebsfenster, das t_N nach oben durch die Maximaltiefe der Oszillationsmarken und nach unten durch den minimalen Gießpulververbrauch begrenzt.

3. Simulationsoberfläche

Die Benutzeroberfläche der Simulation ist in **Abbildung 6** dargestellt. Um den Anwender auch nach erfolgter Vorauswahl der Gießparameter zu beschäftigen, erfolgt die Durchflusskontrolle von der Pfanne in den Verteiler und vom Verteiler in die Kokille manuell. Der Füllstand im Verteiler sollte 80 % nicht unterschreiten, da sonst der Reinheitsgrad nicht ausreichend sein könnte. Dies hängt allerdings von den Anforderungen an die jeweilige Stahlsorte und die Gießgeschwindigkeit ab.

In verschiedenen Kontrollfenstern hat der Anwender die Möglichkeit, die wichtigsten Prozessparameter laufend zu kontrollieren. Nach dem erfolgreichen Durchlaufen der Simulation erhält der Anwender Informationen über die erzielte Produktqualität, sowie die entstandenen Produktionskosten.

Wie schon in Tabelle 3 zusammengefasst, wird die Produktqualität hinsichtlich Oberflächenrissen, tiefen Oszillationsmarken und Reinheitsgrad beurteilt. **Abbildung 7** zeigt ein Beispiel für die Produktqualität über eine Sequenz beim Vergießen des Stahls C. Zeigt die Oberfläche lokal Fehler, wird die gesamte Bramme geflämt und das Produkt mit den entstandenen Kosten belastet. Zeigt die Bramme lokal Innenrisse, überkritische

4. Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht werden die metallurgischen Hintergründe der im Auftrag des International Iron and Steel Institute für die Internetplattform

Zentrumsseigerungen oder einen unzureichenden Reinheitsgrad wird die entsprechende Bramme abgewertet. Zeigen sich auf einer Bramme mehr als zwei Fehler, wird sie verschrottet. Entsprechend erhöhen sich die Produktionskosten pro Bramme mit ausreichender Qualität.

Um dem Anwender ein Gefühl für unterschiedliche Qualitätsanforderungen der

vier Stähle zu geben, wurde jedem Stahl ein eigenes Bewertungsschema zugrunde gelegt. So ist Stahl C besonders empfindlich gegenüber Innenfehlern, Stahl B besonders gegenüber Oberflächenfehlern und einem unzureichenden

Reinheitsgrad. Die Stähle A und D sind weniger empfindlich als die Stähle B und C. Damit würde das im oberen Teil von **Abbildung 7** gezeigte Qualitätsprofil für jeden der vier Stähle zu einem anderen Ausbringen führen.

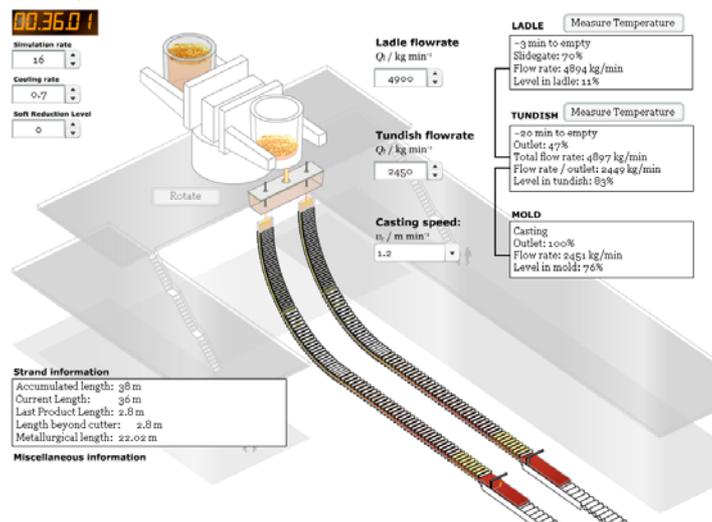


Abb 6: Benutzeroberfläche der Stranggießsimulation

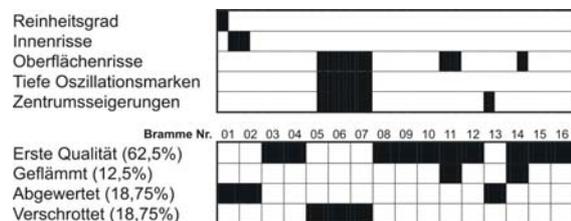


Abb 7: Qualitätsbeeinträchtigungen über die Länge einer Sequenz und Bewertung der erzeugten Brammen

Steeluniversity.org entwickelten Stranggießsimulation vorgestellt. Die Simulation hat das Ziel, dem Anwender in ansprechender und zeitgemäßer Form ein

möglichst authentisches Gefühl für die komplexen Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Produktqualität zu geben. Die Simulation ist unter

www.steeluniversity.org kostenlos zugänglich, eine detaillierte Beschreibung wird zum Herunterladen angeboten.

Danksagung

Die Autoren danken David Naylor, dem IISI - Direktor des steeluniversity.org - Projektes, Andrew Green von MATTER an der Universität von Liverpool, Augustin Karasangabo, Markus Lechner, Bernd Linzer, Sebastian Michelic und Robert Pierer vom Christian Doppler – Labor für „Metallurgische Grundlagen von Stranggießprozessen“ sowie Markus Forsthuber, Voestalpine Stahl Donawitz, und Christian Chimani, SIEMENS-VAI, für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

¹ Naylor, D.: Latest development at steeluniversity.org, Steel Grips, 3 (2005), 476-479 – ² Michelic, S. und C. Bernhard: Steeluniversity.org – An Interactive E-Learning Resource on Steel Processing Technologies, Vortrag am 13. Internationalen Studententag der Metallurgie, Leoben, Österreich, 30. März – 1. April 2006 – ³ Naylor, D.J., C. Bernhard, A.M. Green und T. Sjökvist: Learn how to continuously cast steel on the internet at steeluniversity.org, 5th European Continuous Casting Conference, Nizza, Frankreich, 20.-22. Juni 2005, 602-608 – ⁴ Reiners, U.: Wärmeübertragung durch Spritzwasserkühlung heißer Oberflächen im Bereich der stabilen Filmverdampfung, Dissertation, TU Clausthal, 1987 – ⁵ Han, Z., K. Chai und B. Liu: Prediction and Analysis of Internal Cracks in Continuous Cast Slabs by Mathematical Models, ISIJ International, 41 (2001), 1473-1480 – ⁶ Morita, Y., H. Kawashima und M. Nakamura: Strain analysis on internal cracks in continuously cast steel slab, The Sumitomo Search, 30 (1985), 19-30 – ⁷ The AISE Steel Foundation: The Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition, Casting Volume, Pittsburgh, USA, 2003 – ⁸

Won, Y.M., T.J. Yeo, D.J. Seol und K.H. Oh: A New Criterion for Internal Crack Formation in Continuously Cast Steels, Met. Mat. Trans 31B (2000), 779-794 – ⁹ Wolf, M.M.: Center Segregation versus Casting Speed, CAMP ISIJ, 9 (1996), 844 – ¹⁰ Suzuki, M., H. Hayashi, H. Shibata, T. Emi und I.J. Lee: Simulation of transverse crack formation on continuously cast peritectic medium carbon steels slabs, steel research, 70 (1999), 412-419 – ¹¹ Schürmann, E., L. Fiege, H.P. Kaiser und T. Klages: Einfluss der Kokillenzillation auf die Oberflächenqualität von Stranggussbrammen, Stahl und Eisen, 106 (1986), 1196-1201 – ¹² Wolf, M.M.: Mold Oscillation Guidelines, Steelmaking Conference Proceedings, 74 (1991), Washington, USA, 14.-17. April 1991, 51-71 – ¹³ Normanton, A.: Development of mold powders and an expert system for their selection at higher casting speeds, CCC 2000, Linz, Österreich, 5.-7. Juni 2000 – ¹⁴ Wolf, M. M.: Mould powder consumption - a useful criterion? METEC Congress 94, 2nd European Continuous Casting Conference, Düsseldorf, Deutschland, 20.-22. Juni 1994, 78-85