

## UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER TAUCHROHRPOSITION BEIM KONTINUIERLICHEN STRANGGUSS VON DÜNNBRAMMEN MITTELS PIV

### THE INFLUENCE OF THE SUBMERGED ENTRY NOZZLE'S POSITION TO THE FLOWPATTERN IN THE CSP - MOULD INVESTIGATED BY PIV

**Rüdiger Bahrmann, Herbert Pfeifer**

RWTH Aachen University, Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, IOB  
Mies-van-der-Rohe-Straße 10, 52074 Aachen

Einfluss der Tauchrohrposition, Dünnbrammenkokille  
Submerged Entry Nozzle's Position, CSP - mould

#### Zusammenfassung

Mittels physikalischer Simulation an einem Wassermodell (Maßstab 1:1) werden die Auswirkungen von Positionsänderungen des Tauchrohres auf die grundlegenden Strömungsstrukturen in einer CSP-Kokille untersucht. Im Herstellungsprozess von Stahl ist es notwendig, diese Positionsänderungen durchzuführen, um die schlackebedingte Erosion des Tauchrohres über eine größere Fläche zu verteilen, und dadurch die punktuelle Erosion zu minimieren. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass die Strömung asymmetrischen Strukturen unterworfen ist.

#### Einleitung

Der in Deutschland hergestellte Rohstahl wird zu ca. 97% auf modernen Stranggießanlagen vergossen. Der technologische Stand der konventionellen Stranggießtechnik ist weit vorangeschritten. Dennoch erfordern die Veränderungen auf den Weltmärkten neue technologische Wege. Vor allem der Energieverbrauch birgt großes Sparpotential. Zum Beispiel wird durch das endabmessungsnahe Gießen der Arbeitsschritt des Walzens bezüglich Zeit- und Energieaufwand reduziert. Die positiven Folgen für Umwelt und Wettbewerbsfähigkeit liegen auf der Hand.

Der Dünnbrammenstrangguss birgt im Vergleich zum konventionellen Strangguss aber auch Nachteile. Beispielsweise erzeugt das Verfahren eine spezifisch größere Oberfläche beim Gießen bei gleichzeitig geringerem Strömungsvolumen in der Kokille, so dass an dieser Stelle große Anstrengungen unternommen werden müssen, damit Produkte aus einer weiten Palette von Stahlsorten mit guter Oberfläche und gutem Reinheitsgrad erzeugt werden können.

Strömungstechnische Untersuchungen in Schmelzen sind nur begrenzt möglich. Da Schmelzen und Wasser annähernd die gleiche kinematische Viskosität ( $\nu_{\text{Stahl } 1510^\circ} = 0.872 \cdot$

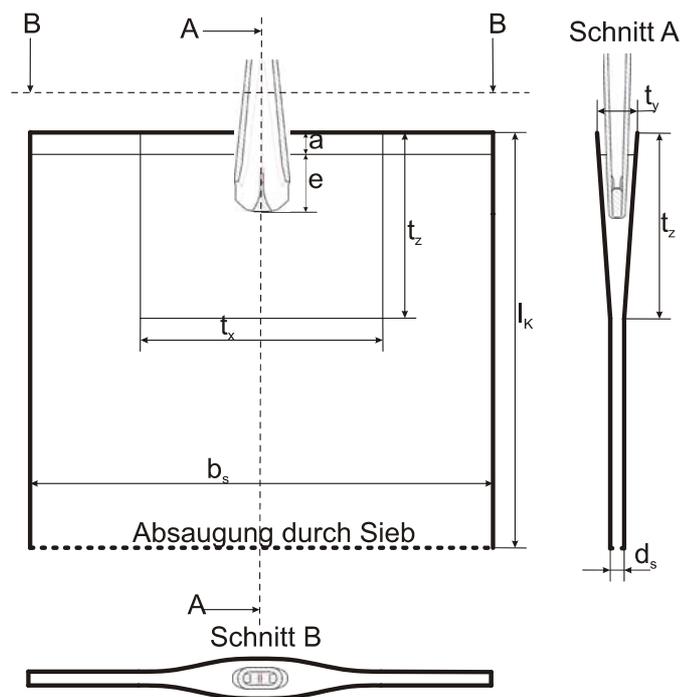
$10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ,  $v_{\text{Wasser } 20^\circ} = 1.006 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ) und somit nahezu identische Fließeigenschaften aufweisen, können laseroptische Messungen an Wassermodellen durchgeführt werden.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Form des Tauchrohres von entscheidender Bedeutung für die Strömung in der Kokille ist (siehe Hülstrung 2006 und Li-Wei 2006). Während des Stranggusses wird jedoch auch die Position des Tauchrohres verändert, da der Gießspiegel in der Kokille mit Schlacke beaufschlagt ist, die wiederum den Werkstoff der Kokille erodieren lässt. Um die punktuelle Intensität dieser Erosion gering zu halten, wird das Tauchrohr in seiner Längsachse von Zeit zu Zeit verschoben.

Die Messungen sollen zeigen, welchen Einfluss diese Positionsänderungen auf die Strömungscharakteristik in der Kokille haben.

## Versuchsstand und Versuchsdurchführung

Bei dem am IOB verwendeten Wassermodell einer Kokille (Abb. 1) im Maßstab 1:1 handelt es sich um eine sog. CSP-Kokille für den Dünnbrammenstrangguß. Die Besonderheit dieser Kokille ist neben der Strangdicke von nur  $d_s = 63 \text{mm}$  die trichterförmige Ausbuchtung an den Breitseiten im Bereich des Tauchrohres. Diese Aufweitung ist notwendig, um den Tauchausguss in die Kokillenschmelze eintauchen zu lassen. Des Weiteren hat man dadurch mehr Gestaltungsspielraum bezüglich der Form des Tauchausgusses.



- a Entfernung des Wasserspiegels von der Oberkante der Kokille
- e Eintauchtiefe des Tauchrohres
- $b_s$  Strangbreite
- $d_s$  Strangdicke
- $l_k$  Länge der Plexiglaskokille
- $t_x$  Breite des Trichters
- $t_y$  Maximale Dicke des Trichters
- $t_z$  Länge des Trichters

Abb. 1: Wichtige Abmessungen der Kokille

Tabelle 1: Geometrische Daten der Kokille

$a[mm]$	$e[mm]$	$b_s[mm]$	$d_s[mm]$	$l_K[mm]$	$t_x[mm]$	$t_y[mm]$	$t_z[mm]$
100	305	2100	63	1900	1100	183	850

Die für die Versuche eingestellten Maße sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Dabei ist es wichtig zu erwähnen, dass die Eintauchtiefe  $e$  variiert wird. Tabelle 2 sind die Bezeichnungen der verschiedenen Konfigurationen zu entnehmen.

Tabelle 2: Geometrische Konfigurationen

$e[mm]$	335	305	255	205
Bezeichnung	unten	mitte	oben	obenoben

Abbildung 2 zeigt den Schaltplan der Versuchsanlage. Nach dem Füllen der prozessrelevanten Anlagenteile (Verteiler, Kokille) wird über die Pumpe der Volumenstrom eingestellt. Im Experiment wird der Volumenstrom im Intervall von  $\dot{V} = 266 \dots 933 \text{ l/min}$  variiert. Dies entspricht den typischen Gießgeschwindigkeiten von  $v_G = 2 \dots 7 \text{ m/min}$ . Nach dem Einstellen des Volumenstromes wird mittels der Stopfenregelung ein stationärer Zustand eingestellt. Dabei wird darauf geachtet, dass in der Kokille das Maß für die Entfernung des Wasserspiegels von der Oberkante der Kokille genau eingehalten wird.

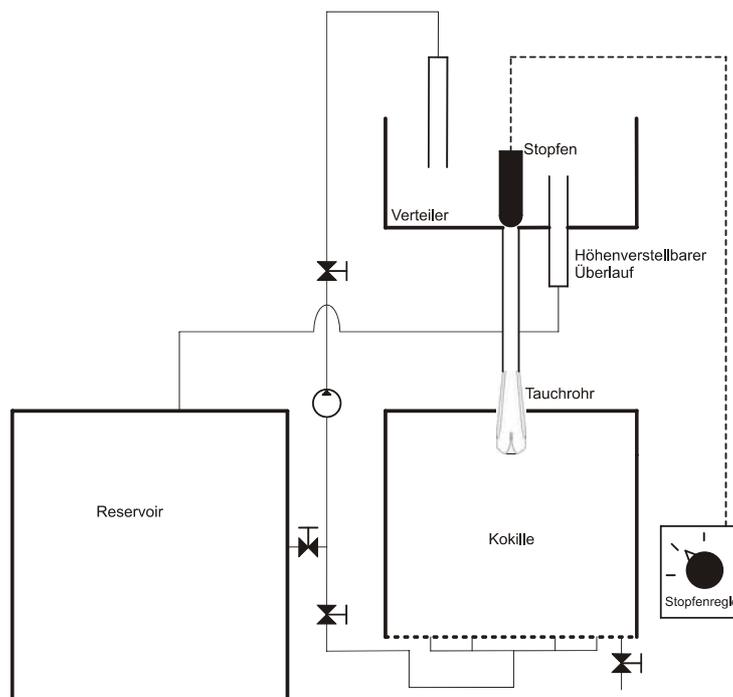


Abb. 2: Schaltplan des Versuchsstandes

## Ähnlichkeitsbetrachtung

Die Wiedergabe der Strömung im Modellversuch wird durch eine Wasserströmung in einem Plexiglasmodell der Originalkokille erreicht. Der Maßstab des Modells ist 1:1. Die dynamische Ähnlichkeit wird durch die gleichzeitige Einhaltung der Reynolds- ( $Re$ ) und Froude-Zahl ( $Fr$ ) erreicht. Die Reynoldszahl berechnet sich mit einer charakteristischen Länge  $d$  und der mittleren Durchströmgeschwindigkeit  $\bar{u}$ :

$$Re = \frac{d * \bar{u}}{\nu}$$

Die Froudezahl berechnet sich mit der mittleren Erdbeschleunigung  $g$  zu:

$$Fr = \frac{\bar{u}}{\sqrt{g * d}}$$

Anhand der Formeln kann man den Vorteil eines 1:1 Modells deutlich erkennen: Die beiden Ähnlichkeitskennzahlen können gleichzeitig eingehalten werden.

## Ergebnisse

Bei den PIV-Messungen im Mittelschnitt der Breitseite wurden für jede Konfiguration 120 Doppelbilder mit einer Frequenz von  $f = 1\text{Hz}$  gemacht.

In Abbildung 3 sind die Geschwindigkeitsverteilungen für die beiden Konfigurationen „mitte“ und „oben“ bei einer Gießgeschwindigkeit von  $v_G = 2\text{ m/min}$  dargestellt. Es handelt sich dabei um die Auswertung je eines Doppelbildes. Deutlich zu erkennen ist die starke Asymmetrie, die bei den Konfigurationen gegenläufig ist. Für den Gießprozess ist ein solches Strömungsbild qualitätsschädigend, da dadurch einerseits die Gefüge- und Partikelverteilung im Stahl inhomogen sein kann. Andererseits konzentriert sich der Impulstransport nur einseitig auf die freie Oberfläche (Wasserspiegel in der Kokille). Eine gleichmäßige Verteilung des Impulstransportes wird jedoch angestrebt, um den Einzug von Gießschlacke zu verringern.

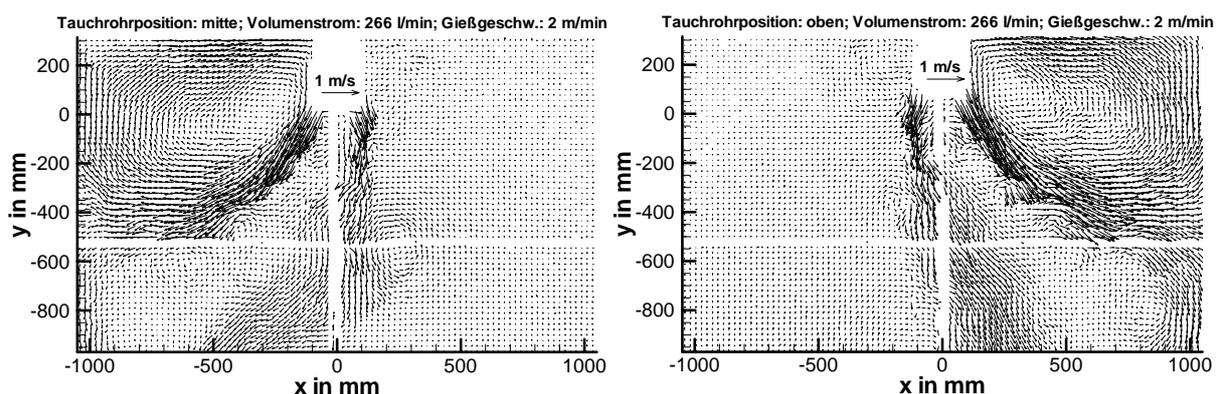


Abb. 3: Geschwindigkeitsverteilungen in der Kokille für verschiedene Tauchrohrpositionen

Das asymmetrische Verhalten soll im Folgenden näher untersucht werden. Es werden zwei Punkte, welche sich im Bezugssystem Kokille symmetrisch zueinander befinden, ausgewählt (siehe Abbildung 4). Sie befinden sich unmittelbar unter der freien Oberfläche.

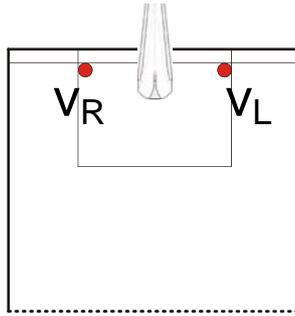


Abb. 4: Lage der Messpunkte für die Geschwindigkeiten  $v_R$  und  $v_L$

Für diese Punkte werden nun die Beträge der Geschwindigkeiten  $v_R$  und  $v_L$  für den gesamten Messzeitraum der einzelnen Konfigurationen in Diagrammen aufgetragen (siehe Abbildung 5).

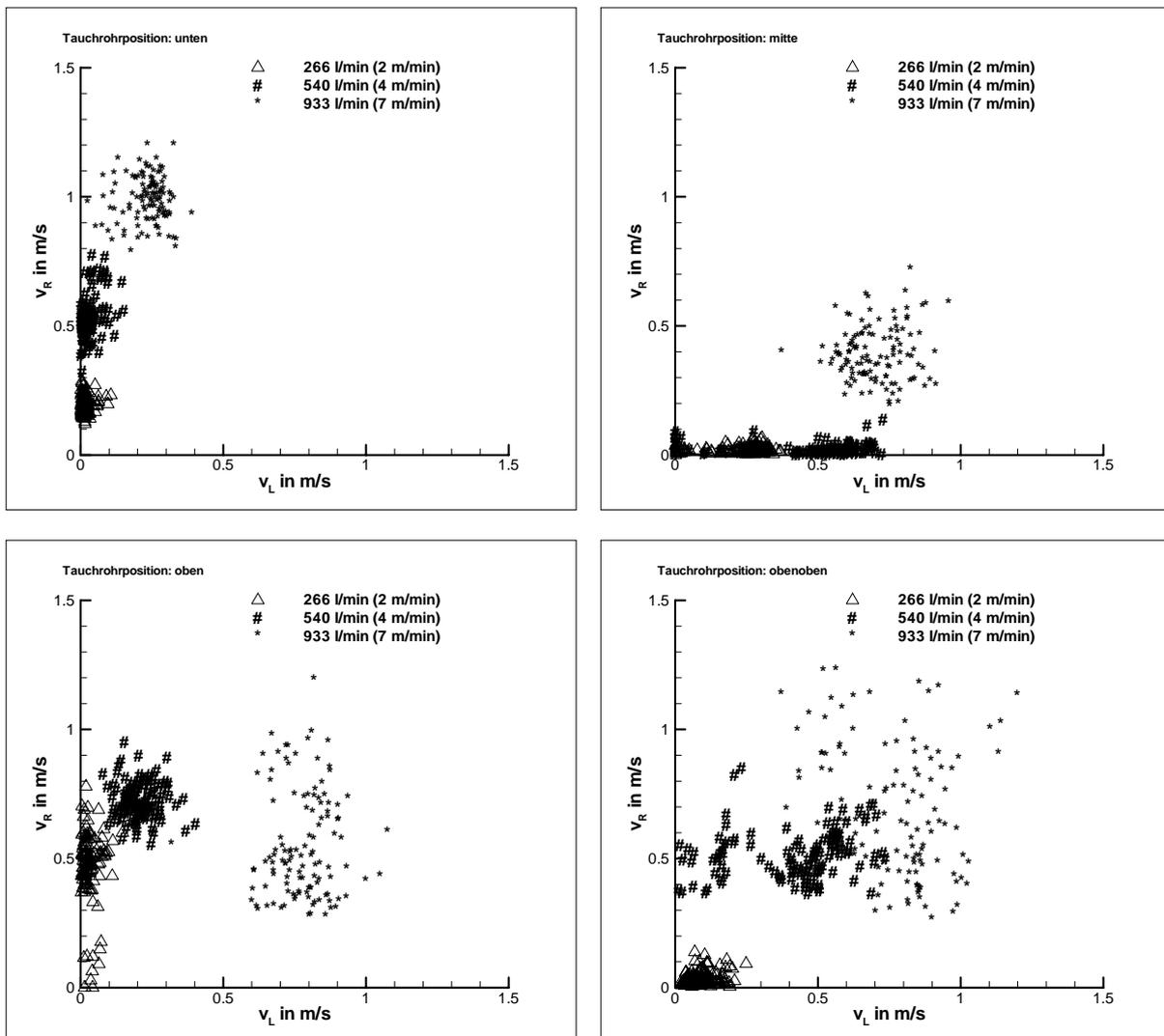


Abb. 5: Verteilungen der Geschwindigkeiten  $v_R$  und  $v_L$  bei verschiedenen Tauchrohrpositionen und Gießgeschwindigkeiten

Die Diagramme zeigen, dass besonders bei kleinen Volumenströmen eine starke Asymmetrie in der Kokille herrscht. Es zeigt sich außerdem, dass es nicht vorhersagbar ist, auf welcher Seite der Impuls an der freien Oberfläche größer ist. Der Freistrahls aus dem Tauchrohr beaufschlagt, immer eine Seite mehr als die andere. In sich ist das Strömungsfeld stabil. Ein "Umschwingen" des stärkeren Freistrahls auf die jeweils andere Seite erfolgt im eingestellten Messzeitraum nicht.

Eine Erhöhung des Volumenstromes bewirkt, dass die Strömung im Mittel tendenziell symmetrischer wird. Das Verhältnis von  $v_L$  zu  $v_R$  nähert sich im Mittel dem Wert 1.

Dieser Effekt wird durch die Verringerung der Eintauchtiefe  $e$  verstärkt.

## Zusammenfassung und Bedeutung der Ergebnisse

Es wurde das Strömungsfeld in einer Dünnbrammenkokille mittels PIV – Messungen untersucht. Es wurde beobachtet, dass die Strömungsstruktur Asymmetrien aufweist. Ein Umschlagen dieser Asymmetrien ist im untersuchten Zeitraum nicht geschehen. In sich sind die Strömungsstrukturen – gerade bei kleinen Volumenströmen – stabil. Die transienten Abweichungen zum mittleren Strömungsfeld sind gering.

Bei großen Volumenströmen wird beobachtet, dass die Strömung im Mittel tendenziell symmetrisch ist. Hier weist die Strömung allerdings ein im hohen Maß transientes Verhalten auf, was durch die Reduzierung der Eintauchtiefe des Tauchrohres verstärkt wird.

An der freien Wasseroberfläche herrscht also immer ein relativ hoher und transienter Impulsaustausch, der zur Wellenbildung führt. Für den Gießprozess ist das von Nachteil, da dadurch der Schlackeeinzug begünstigt wird.

Ein asymmetrisches bzw. transientes Strömungsverhalten begünstigt ausserdem eine inhomogene Verteilung von Einschlüssen wie z.B. Aluminiumoxidpartikeln, die sich in der Stahlschmelze befinden ...Javurek 2005.

In Bahrmann 2009 wird davon ausgegangen, dass die Strömungsasymmetrie in der Kokille ihre Ursache in etwaigen Fertigungstoleranzen der Tauchrohre hat. Diese Theorie ist nicht haltbar. Die dieser Arbeit zur Grunde liegenden Messungen wurden mit ein und dem selben Tauchrohr durchgeführt. Die Strömungsstrukturen unterscheiden sich in ihrer Ausrichtung jedoch immens (siehe Abbildung 3). Herstellungsbedingte Abweichungen der Tauchrohrgeometrien können ein Grund für unterschiedliche Strömungsstrukturen in der Kokille sein. Sie sind jedoch nicht die alleinige Ursache dafür. Die Vermutung liegt nahe, dass es sich hier um ein zunächst instabiles System handelt, welches in zwei Richtungen kippen kann, in denen es stabil ist.

## Literatur

Hülstrung, J.: "Entwicklung und Einsatz eines optimierten Tauchrohres für das Dünnbrammengießen unter Anwendung der numerischen Strömungsmechanik", Dissertation, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik, RWTH Aachen, 2006

Li-Wei, Shen-Hou-fa, 2006: "Influences of nozzle configuration on fluid flow in CSP mold", Iron and Steel Vol. 41 (2006), p. 467/471

Javurek, M., Rössler, R., Fürst, C.: „Simulations of nonmetallic inclusions in a continuous casting strand“, Steel Research Vol. 76 (2005), p. 64/70

Bahrmann, R., Pfeifer, H.: "Einflüsse von Fertigungstoleranzen von Tauchrohren auf die Strömung in der CSP – Kokille im Stranggußprozess“, Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, 8.-10. September 2009, Erlangen

