

Konzentrationsmessungen im Wassermodell eines Stranggießverteilers mittels der PLIF-Technik

R. Koitzsch, H.-J. Odenthal, H. Pfeifer

RWTH Aachen, Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik - IOB

1 Einleitung

Mit 902 Mio. t im Jahr 2002 steht Stahl an erster Stelle der produzierten Metalle. Der weitaus größte Teil davon, in Deutschland 96.3%, wird in Stranggießanlagen vergossen und zu Walzprodukten weiterverarbeitet. In der Stranggießanlage strömt der flüssige Stahl aus der Stahlgießpfanne über das Schattenrohr (SR) in den Stranggießverteiler. Von dort fließt der Stahl durch das Tauchrohr (TR) in die wassergekühlte Kokille, wo der Stahl erstarrt und kontinuierlich abgezogen wird [4,5,6]. Der Stranggießverteiler stellt das Bindeglied zwischen diskontinuierlicher Pfannenmetallurgie und kontinuierlicher Strangbildung dar. Der erstarrte Strang wird in Brammen geschnitten, die zu Blechen gewalzt werden. Die Stahlqualität wird nach Kundenwünschen optimiert und kann unter Umständen von Pfanne zu Pfanne variieren. Zur Beurteilung der Stahlqualität sind die Mischungsvorgänge im Stranggießverteiler von entscheidender Bedeutung. Dabei ist von Interesse, wann sich am Austritt des Stranggießverteilers die neue Stahlqualität einstellt und über welchen Zeitraum Mischbrammen mit geringerer Qualität produziert werden.

Da die kinematischen Viskositäten von Wasser und flüssigem Stahl nahezu gleich groß und die Fließeigenschaften somit ähnlich sind, kann Wasser zur physikalischen Modellierung von Schmelzenströmungen eingesetzt werden. An solchen Wassermodellen werden Untersuchungen mit laseroptischen Messmethoden durchgeführt. Ergebnisse von physikalischen Simulationen stationärer und instationärer Verteilerströmungen wurden auf der GALA 2001 und 2002 [4,5] vorgestellt. In der vorliegenden Arbeit werden instationäre Konzentrationsmessungen am Wassermodell eines Stranggießverteilers mit der PLIF-Messtechnik durchgeführt, um Aussagen zu Mischungseffekten zu erhalten.

2 Physikalische Simulation

2.1 PLIF-Technik

Die PLIF-Technik (Planar Laser Induced Fluorescence) ist ein berührungsloses, flächenhaftes, laseroptisches Verfahren zur Messung von Konzentrations- oder Temperaturverteilungen in Fluiden. Das PLIF-Prinzip beruht auf der spontanen Photonenemission (Fluoreszenz) von Molekülen bzw. Atomen nach einer vorangegangenen Absorption von Laserlicht geeigneter Wellenlänge. Man spricht von Fluoreszenz, wenn die Emission spontan auftritt und nach Beendigung der Einstrahlung aufhört. Das PLIF-Signal beinhaltet alle notwendigen Informationen zur Konzentration bzw. Temperatur des zu untersuchenden Mediums.

Bei der Fluoreszenz handelt es sich um eine quantenmechanische Wechselwirkung zwischen einfallenden Photonen und den Elektronen eines Moleküls. Voraussetzung für die Fluoreszenz ist eine hohe Zahl an delokalisierten π -Elektronen, die sich besonders leicht anregen lassen. Dadurch werden die π -Elektronen auf ein höheres, instabiles Energieniveau angehoben. Die Elektronen gelangen wieder auf das Grundniveau zurück und emittieren dabei frequenzverschobenes Licht. Eine CCD-Kamera, die mit einem geeigneten optischen Filter versehen ist, detektiert ausschließlich dieses Licht. Unter Vernachlässigung von Abschwächungseffekten des emittierten Lichtes zwischen Messebene und CCD-Kamera lässt sich die beobachtete Fluoreszenz-Intensität I an einem beliebigen Punkt des Lichtschnittes detektieren. Die Intensität ist proportional zur Konzentration des Fluoreszenzstoffes. Auf diese Weise lassen sich Konzentrationen im ppm-Bereich nachweisen.

Für die quantitative messtechnische Untersuchung der Strömung im Wassermmodell steht am IOB eine 3D-DPIV-Anlage der Fa. Dantec zur Verfügung, mit der bereits eine Reihe von Messungen an Wassermodellen von Stranggießverteiltern und Kokillen durchgeführt wurden [4,5] und die auf ein PLIF-System aufgerüstet worden ist. Das PLIF-System besteht aus zwei 140 mJ Nd:YAG-Lasern, dem 1.80 m Lichtführungsarm, zwei Kodak Megaplug ES 1.0 CCD-Kameras und der Auswertesoftware FlowManager 3.71, Tabelle 1. Die beiden Kameras wurden mit monochromatischen Filtern ($\lambda = 570 \text{ nm}$) versehen. Als Fluoreszenzfarbstoff kommt Rhodamin B (CAS 81-88-9) zum Einsatz, das sehr gut in Wasser löslich ist. Es besitzt einen hohen Quantenwirkungsgrad und eignet sich wegen seines Absorptions- und Emissionspektrums ($\lambda_{\text{abs,opt}} = 526 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{emiss,opt}} = 578 \text{ nm}$) gut in Kombination mit Nd:YAG-Laser der Anregungsfrequenz $\lambda = 532 \text{ nm}$. Rhodamin B ist temperatursensitiv, d. h. die Intensität des fluoreszierenden Lichtes variiert um ca. $\pm 2 \text{ \%}/\text{K}$ im Bereich von ca. $10 - 70^\circ\text{C}$.

Tabelle 1: Technische Daten der PLIF-Anlage

Doppelt gepulster Nd:YAG-Laser mit Lichtführungsarm (1.80 m)	Wellenlänge λ	532 nm
	Taktrate f	15 Hz
	max. Pulsenergie E_{max}	140 mJ
	Pulsdauer t	4.3 ns
	Zeit zwischen zwei Pulsen $\Delta t_{\text{DPIV, min}}$	1 μs
	Dicke des Lichtschnitts Δy_0	2 mm
Zwei Kodak Megaplug ES 1.0 CCD-Kameras (Klasse-II-Chip)	Auflösung	1008 x 1018 Pixel
	Bild-Aufnahmerate f (Doppelaufnahme)	7 Hz
	Zellengröße	$9 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$
	Chipgröße	9.07 mm x 9.16 mm

2.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Bild 1 zeigt den Versuchsstand, das Rohrleitungssystem und den prinzipiellen Aufbau der Messeinrichtung für die PLIF-Messung. Der Versuchsstand besteht aus einem Plexiglasmodell des Stranggießverteilter im Maßstab 1:4. In Tabelle 2 sind die Hauptabmessungen des Originalverteilter und des Wassermodells wiedergegeben. Mit dem aus der Zylinderlinse austretenden Laserlichtschnitt können beliebige Ebenen des Verteilter vermessen werden. Das Rohrleitungssystem ermöglicht es, über die Stellung der Ventile 1 und 2, den Stranggießverteilter im offenen Kreislauf (Frischwasser wird über den Zulauf zugeführt, vom Tauchrohr wird in den Ablauf gepumpt) oder im geschlossenen Kreislauf (das Wasser wird im Kreis gepumpt) zu betreiben.

Zur Aufnahme des Laserlichtschnitts werden die beiden CCD-Kameras parallel nebeneinander montiert. Dadurch kann der gesamte Strömungsraum im Modell simultan erfasst werden.

Im Versuch am verkleinerten Modell müssen die Ähnlichkeiten für die Strömung berücksichtigt werden. Entscheidend für die Wiedergabe der Strömung ist die Einhaltung der Re- und Fr-Ähnlichkeit. Diese Ähnlichkeiten können an verkleinerten Wassermodellen nicht gleichzeitig eingehalten werden. Für die Beschreibung der Strömungsstrukturen ist die Re-Ähnlichkeit die typische Kenngröße. Da unter Berücksichtigung der geometrischen Ähnlichkeit der einzustellende Volumenstrom und die Schattenrohr Austrittsgeschwindigkeit zu groß werden (Tabelle 3), erfolgen alle Untersuchungen mit einem reduzierten Volumenstrom von $V = 0.67 \text{ l/s}$; hierfür ergibt sich $Re = 4453$ und $Fr = 8.08 \cdot 10^{-5}$. Da die Strömung im Verteilter auch in diesem Fall turbulent ist, bleiben die grundsätzlichen Strömungsstrukturen erhalten.

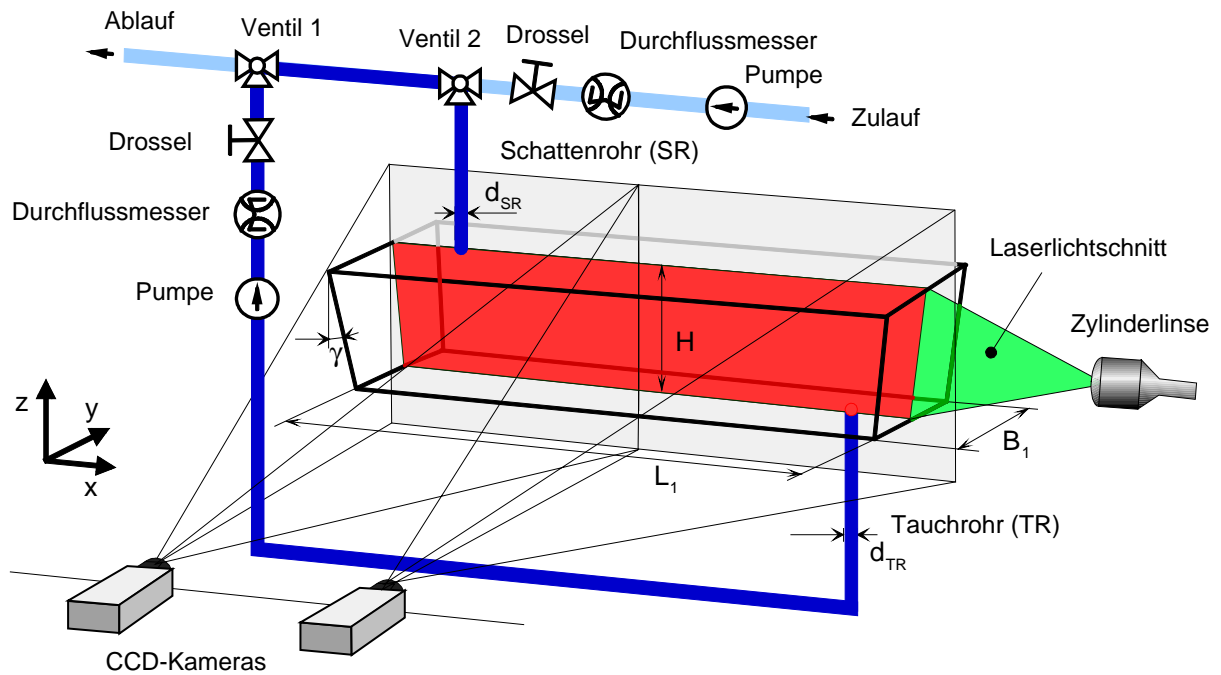


Bild 1: Wassermmodell des Stranggießverteilers, Rohrleitungssystem und PLIF-Technik

Tabelle 2: Abmessungen des 16 t-Stranggießverteilers und des Wassermodells

	Bezeichnung	Original	Wassermmodell Maßstab 1:4
Verteilervolumen bei H	V in m^3	2.275	0.036
Bodenlänge Verteiler	L_1 in m	3.140	0.785
Bodenbreite Verteiler	B_1 in m	0.780	0.190
Neigung der Seitenwände	γ in $^\circ$	7	7
Füllstand stat. Gießen	H in m	0.800	0.200
Durchmesser Schattenrohr	d_{SR} in m	0.068	0.017
Durchmesser Tauchrohr	d_{TR} in m	0.070	0.018
durchströmter Querschnitt	A in m^2	0.703	0.036
hydraulischer Durchmesser	d_{hydr} in m	1.175	0.294

Tabelle 3: Volumenströme, mittlere Durchströmgeschwindigkeiten und Schattenrohr-austrittsgeschwindigkeiten im Original und Wassermmodell (Maßstab 1:4), Re-Ähnlichkeit, maximal realisierte Ähnlichkeit, Fr-Ähnlichkeit

	Bezeichnung	Original	Wassermmodell Maßstab 1:4		
			Re	reduziert	Fr
Volumenstrom	\dot{V} in l/s	5.41	1.56	0.67	0.17
mittlere Durchströmgeschwindigkeit	\bar{u} in m/s	0.0077	0.0356	0.0152	0.0039
Schattenrohr-austrittsgeschwindigkeit	w_{SR}	1.49	6.88	2.93	0.75
Re-Zahl	Re	10380	10380	4453	1121
Fr-Zahl	Fr	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$4.42 \cdot 10^{-4}$	$8.1 \cdot 10^{-5}$	$5.2 \cdot 10^{-6}$

PLIF-Messungen wurden in je zwei Verteilerebenen (Längs- und Querrichtung) im Wassermodell durchgeführt (Bild 2).

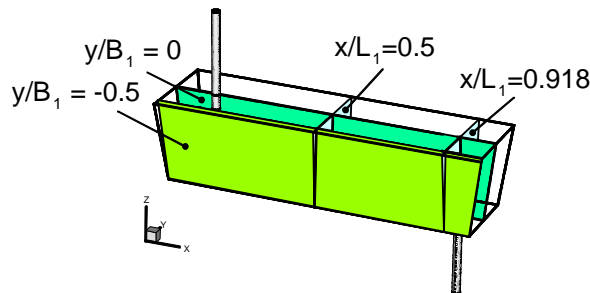


Bild 2: Messebenen im Wassermodell

Vor der Messung wird eine Kalibrierung vorgenommen. Dabei werden bei definierten Konzentrationen C/C_{End} zwischen 0 und 100 % Aufnahmen mit den CCD-Kameras gemacht. Für jeden Bildpunkt $P(i,j)$ der Kameras wird die bekannte Konzentration der aufgezeichneten Lichtintensität $I(i,j)$ zugeordnet. In einem Anfangsbereich ist der Zusammenhang zwischen Konzentration und Intensität linear und es ergibt sich eine Kalibriergerade (Bild 3). Nimmt die Konzentration C weiter zu, treten nichtlineare Sättigungseffekte auf. Beim Einsatz von Rhodamin B als Fluoreszenzstoff mit einer Konzentration von Rhodamin B zu Wasser von bis zu

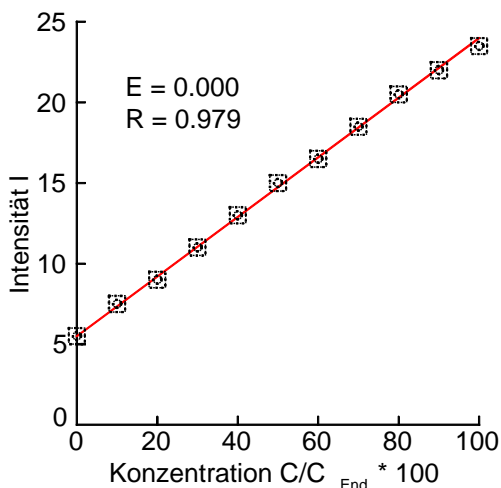


Bild 3: Kalibriergerade, Intensität I über Konzentration C/C_{End}

$C_{\text{End}} = 70 \mu\text{g/l}$ können die nicht linearen Effekte ausgeschlossen werden. Rhodamin B wurde in 10 %-Schritten bezogen auf C/C_{End} des Verteilervolumens dem Verteiler zugegeben. Begonnen wurde mit der Konzentration $C = 0$ (frisches Wasser). Nach jeder Erhöhung der Konzentration im Verteiler wurde das Wasservolumen im geschlossenen Kreislauf gut durchmischt und anschließend zehn Aufnahmen mit den CCD-Kameras gemacht. Die Graustufenwerte dieser zehn Aufnahmen wurden bildpunktweise statistisch gemittelt. Die Erstellung der Kalibriergeraden erfolgte mit den gemittelten Aufnahmen. Durch die Mittelung werden Schwankungen in der Laserleistung ausgeglichen. Zum Abschluss der Kalibrierung liegt im Verteiler die maximale Konzentration $C/C_{\text{End}} = 100 \%$ ($\hat{=} 70 \mu\text{g/l}$) vor. Bild 3 zeigt eine mit der FlowManager-Software ermittelte Kalibriergerade.

Während der ca. 40 minütigen Kalibrierung wurde die Temperatur auf $\pm 1 \text{ K}$ konstant gehalten, um den Einfluss der Temperaturabhängigkeit von Rhodamin B gering zu halten.

Mit Beginn der Messung wurde vom geschlossenen Kreislauf auf den offenen Kreislauf umgeschaltet und dem Stranggießverteiler über Ventil 2 reines Wasser zugeführt. Es wurde die Abnahme der im Verteiler vorhandenen Konzentration an Rhodamin B gemessen. Die Kalibrierung wurde aus zwei Gründen auf diese Weise durchgeführt: Erstens dauern die Mischungsvorgänge mehrere Minuten und es hätte eine große Menge an Rhodamin B Lösung bereitgestellt werden müssen. Zweitens ist die Kalibrierung an dem Aufbau vorgenommen worden, an dem unmittelbar danach die Messung durchgeführt wurde.

Bei der Auswertung der Messungen zeigte sich eine Verschiebung der Intensität. Die Zuleitung zum Schattenrohr ist sehr kurz und wurde bei den eingestellten Volumenströmen in weniger als zwei Sekunde durchspült. Obwohl frisches Wasser zugeführt wurde, wird im Bereich unmittelbar unter dem Schattenrohr über einen längeren Zeitraum eine von Null verschiedene Konzentration gemessen. Dies liegt daran, dass die aus dem Laserlichtschnitt

emittierte Lichtstrahlung die benachbarten Moleküle ebenfalls anregt und diese Licht emittieren, das von den Kameras aufgenommen wird. Es handelt sich um eine lineare Zunahme der Intensität I mit der Konzentration C . Die Messergebnisse wurden um diese Anteile korrigiert.

3 Numerische Simulation

Die Ergebnisse der physikalischen Simulation werden zur Validierung von CFD-Simulationen herangezogen. Die CFD-Simulationen wurden mit dem Strömungslöser FLUENT 6.0 durchgeführt. Die Grundlage der numerischen Simulation für die isotherme Wasserströmung bilden die RANS-Gleichungen (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) für turbulente Strömungen. Die Reynoldsspannungen werden mit dem *Realizable k - ϵ Modell* von Shih et al. [7] modelliert.

Für die Berechnung der Wassermittel-Strömung wurde ein strukturiertes Gitter mit ca. 516.000 Elementen generiert. Aufgrund der Symmetrie in Längsrichtung wird nur eine Verteilerhälfte vernetzt. Am Eintritt in das Schattenrohr wird ein konstantes Geschwindigkeitsprofil mit $|w_{SR}| = 0.75$ m/s für Froude-Ähnlichkeit und einem Turbulenzgrad von $Tu = 3$ % vorgegeben. Als Austrittsbedingung werden am Tauchrohr die Gradienten aller Strömungsgrößen (außer dem Druck) in Normalenrichtung null gesetzt. An der freien Oberfläche wird die Symmetriebedingung verwendet.

Zur numerischen Lösung wird ein Segregated Solver mit impliziter Linearisierung verwendet. Als Konvergenzkriterium für die unbekanntenen physikalischen Größen gilt der Residualwert $R < 10^{-5}$. Die Diskretisierung der diffusiven Terme in den Systemgleichungen erfolgt mit dem Zentralfdifferenzen-Schema, die konvektiven Terme werden mit einem Upwind-Schema 2. Ordnung diskretisiert. Die Druckkorrektur geschieht mithilfe des SIMPLE-Verfahrens. Die Berechnungen werden im Netzwerk auf PC's Pentium-III 1 GHz mit 1 GB-RAM durchgeführt.

Die Konzentration C wird mittels einer Transportgleichung für die Konzentration C im Post-processing auf dem berechneten Geschwindigkeitsfeld bestimmt. Die Transportgleichung lautet mit dem Fickschen Ansatz für die molekulare Diffusion, für ein binäres Gemisch mit den Komponenten C_1 und C_2 ($C_1 = \bar{C}$, $C_2 = 1 - \bar{C}$)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{C}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \bar{C}) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} \right) = 0, \quad (3.1)$$

\bar{C} : Massenkonzentration,
 D_{eff} : effektiver Diffusionskoeffizient.

Der effektive Diffusionskoeffizient wird aus dem laminaren- und turbulenten Diffusionskoeffizienten gebildet.

$$D_{\text{eff}} = D_{\text{lam}} + D_{\text{turb}} \cdot \quad (3.2)$$

Der turbulente Diffusionskoeffizient berücksichtigt die Diffusion durch Turbulenz. Für die Diffusionskoeffizient von Wasser findet man $D_{\text{lam}} = 1.4 \cdot 10^{-9}$ m²/s und $D_{\text{turb}} = 1$ m²/s ($Sc_{\text{turb}} = 1$), [2].

4 Ergebnisse

Im folgenden werden exemplarische Ergebnisse der PLIF-Messungen am Wassermittel des Stranggießverteilers bei Fr-Ähnlichkeit vorgestellt. Bild 4 zeigt zunächst das mit DPIV gemessene mittlere Geschwindigkeitsfeld im Mittelschnitt des Stranggießverteilers.

Der eintretende Schattenrohrstrahl trifft mit $|w_{SR}| = 0.75$ auf den Verteilerboden. Um den Schattenrohrstrahl baut sich ein Wirbelsystem auf, in dem die Strömung auf dem ersten Drittel des Stranggießverteilers gut durchmischt wird. Am Stranggießverteilerboden breitet sich der Schattenrohrstrahl bis auf eine Länge von $x/L_1 = 0.63$ aus, wo er vom Boden ablöst

24.6

und ein Rezirkulationsgebiet induziert. Um den Schattenrohrstrahl baut sich ein ringförmiger Wirbel auf der in einen gegenläufigen Doppelwirbel in x-Richtung übergeht. Dieses Wirbelsystem sorgt für eine gute Durchmischung im Verteiler.

Eine charakteristische Größe für den Stranggießverteiler ist die theoretische Verweilzeit

$$\bar{t} = \frac{V}{\dot{V}}, \quad (4.3)$$

V : Stranggießverteilervolumen,
 \dot{V} : Volumenstrom.

Alle Zeiten t werden mit der theoretischen Verweilzeit \bar{t} normiert

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}}, \quad (4.4)$$

Bild 5a-d zeigt die mit PLIF gemessene Konzentrationsverteilung C für vier verschiedene Zeiten. In Bild 5a wird die gute Durchmischung um das Schattenrohr deutlich. Am Verteilerboden wird auf Grund der erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten Fluid mit einer höheren Konzentration C bis auf eine Länge von $x/L_1 = 0.63$ transportiert. In den folgenden Bildern zeigt sich die Zunahme der Konzentration über die Verteilerlänge. In Bild 5b und c ist das Rezirkulationsgebiet anhand einer geringeren Konzentration zu erkennen. In Bild 5d ist die Konzentration auch im Rezirkulationsgebiet auf $C = 1$ angestiegen. Lediglich in einer dünnen Schicht an der Verteileroberfläche ist noch ein Gebiet mit verminderter Konzentration zu sehen. Die PLIF-Messung verdeutlichen, dass die vollständige Durchmischung des Verteilers ca. das 1.5fache der mittleren Verweilzeit beträgt.

Bild 6 zeigt die berechnete Konzentrationsverteilung \bar{C} zum Zeitpunkt $\theta = 0.1$ ($t = 21$ s). Die Rechnung zeigt, in Übereinstimmung mit der Messung, den eintretenden Schattenrohrstrahl mit der erhöhten Konzentration entlang des Verteilerbodens. Die Durchmischung im ersten Drittel des Verteilers wird gut wiedergegeben. Die Absenkung der Konzentration im Ringwirbel bei $x/L_1 = 0.04$ und $z/H = 0.25$ ist gut zu erkennen.

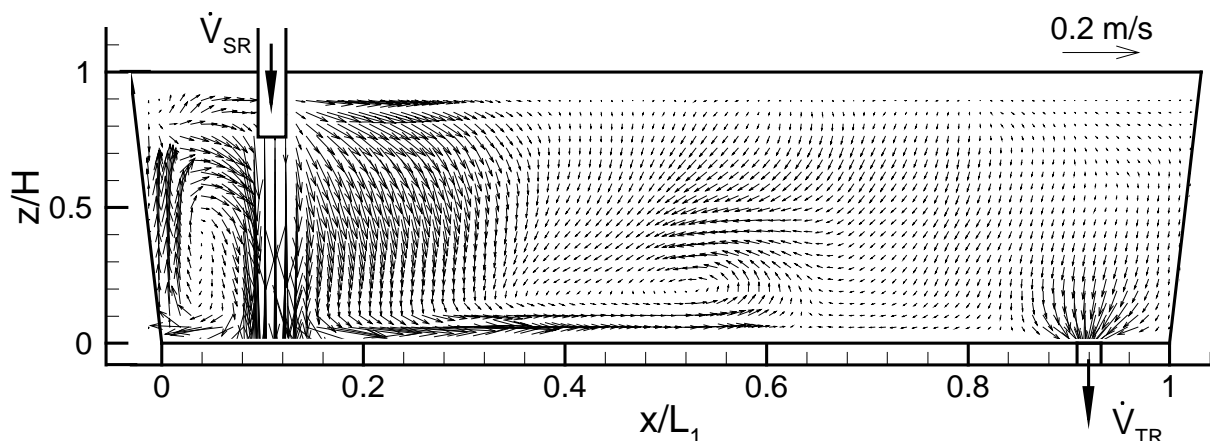


Bild 4: Mit DPIV gemessene Geschwindigkeitsfeld im Mittelschnitt ($y/B_1 = 0$) des Wassermodells (Maßstab 1:4) des Stranggießverteilers, [3]

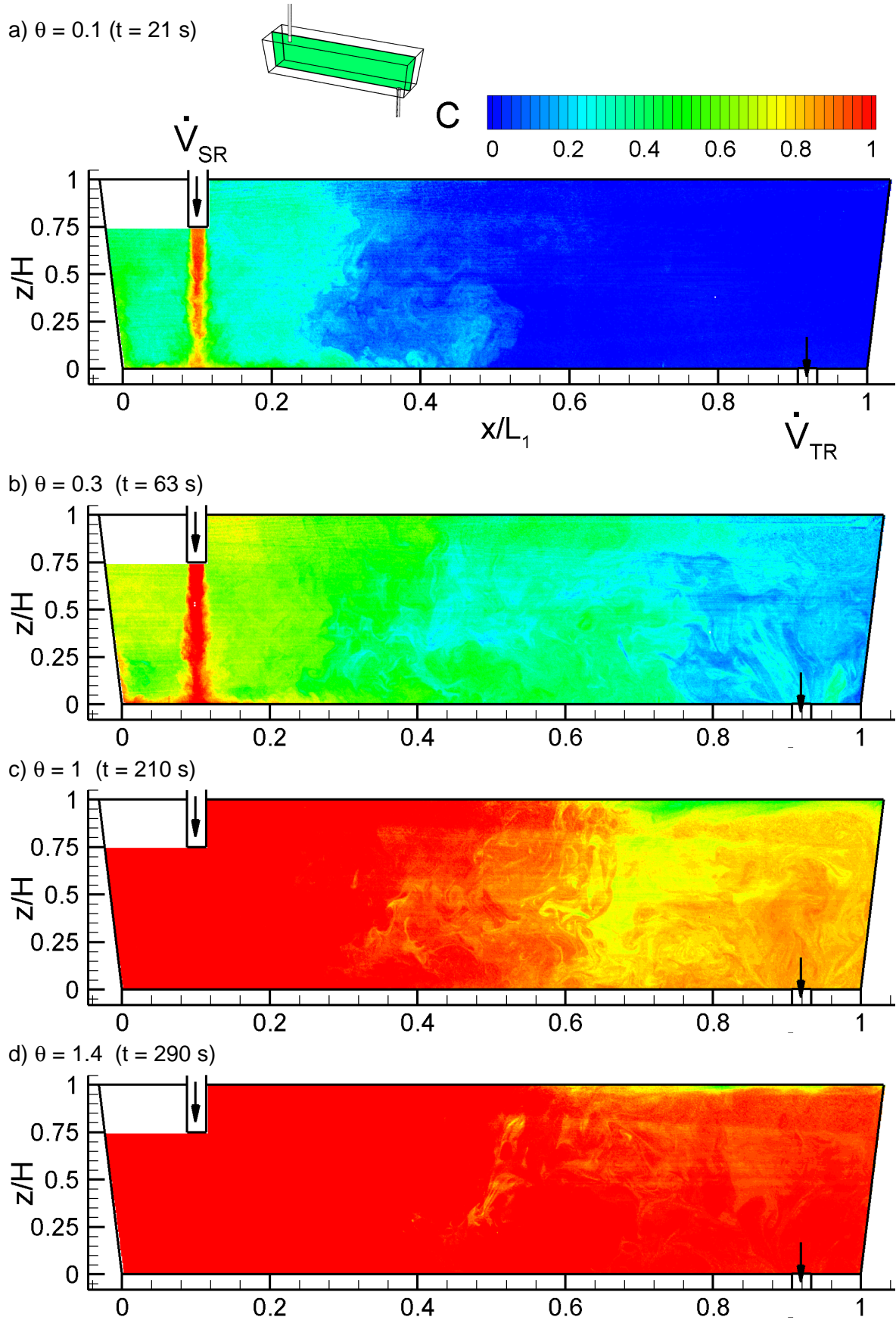


Bild 5: PLIF-Konzentrationsmessungen im Mittelschnitt ($y/B_1 = 0$) des Wassermodells (Maßstab 1:4) des Stranggießverteilers, $Re = 1121$, $Fr = 5.2 \cdot 10^{-6}$ (Fr-Ähnlichkeit)

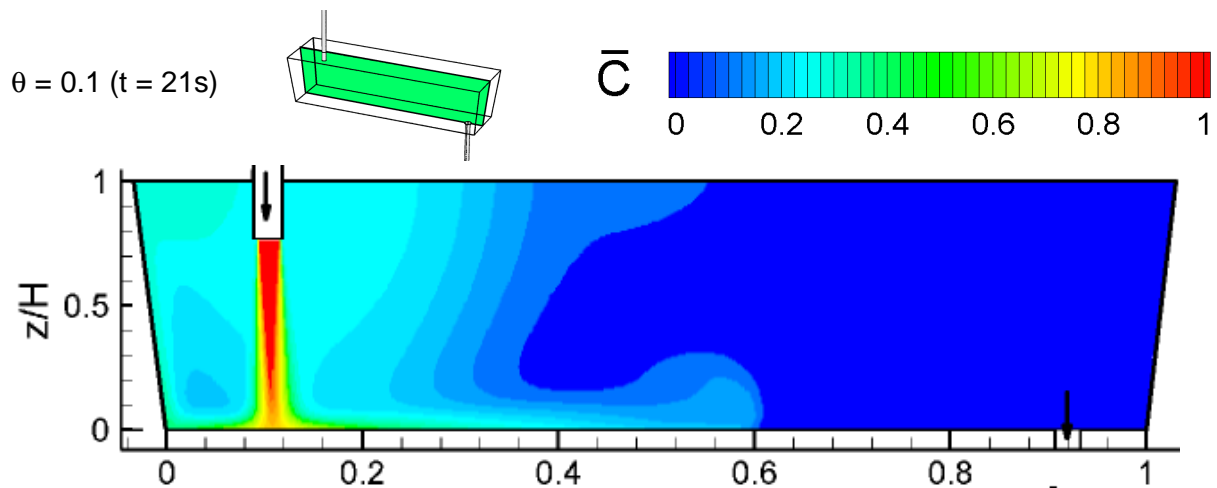


Bild 6: CFD-Simulation der Konzentrationsverteilung \bar{C} im Mittelschnitt ($y/B_1 = 0$) eines Wassermodells (Maßstab 1:4) des Stranggießverteilers nach $\theta = 0.1$ ($t = 21$ s), $Re = 1121$, $Fr = 5.2 \cdot 10^{-6}$ (Fr-Ähnlichkeit)

5 Ausblick

Zur Zeit werden die meisten Strömungen noch qualitativ in Wassermodellen von metallurgischen Reaktoren durch Farbeinspritzungen und Videoaufzeichnungen untersucht. Mit der PLIF-Messtechnik kann eine quantitative Aussage zur Konzentrationsverteilung getroffen werden. Mit den Ergebnissen aus den Messungen können Diffusionsmodelle bzw. Mehr-Phasen-Modelle in der CFD-Simulation validiert werden. Anschließend können diese Modelle in der CFD-Simulation unter Änderung der Randbedingungen auf die thermische Strömung übertragen werden und Rückschlüsse auf die Stahlströmung erfolgen.

6 Literatur

- [1] **Fluent:** User's Guide, 2002
- [2] **Jischa, M.:** Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch, 1. Auflage, Vieweg Verlag, München, 1982
- [3] **Klaas, M.:** Geschwindigkeitsmessungen in einem Wassermodell-Verteiler für eine Stranggießanlage mittels der Particle Image Velocemetry, Studienarbeit, RWTH Aachen, Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, 1999
- [4] **Odenthal, H.-J.; Bölling, R.; Pfeifer, H.:** Analyse dynamischer Strömungsphänomene im Stranggießverteiler mit Turbostopper mittels LDA-, PIV- und CFD-Methoden, 9. GALA Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Shaker Verlag, Winterthur, 18.-20.09.2001, S. 40.1-8
- [5] **Odenthal, H.-J.; Bölling, R.; Pfeifer, H.:** Untersuchung instationärer und thermischer Strömungseffekte in Stranggießverteilern, 10. GALA Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Rostock, 10.-12.09.2002, S. 45.1-11
- [6] **Ohler, C.; Odenthal, H.-J.; Pfeifer, H.; Lemanowicz, I.:** Numerische Simulation der Strömungs- und Erstarrungsprozesse in einer Dünnbrammengießanlage, stahl und eisen 122 (2002), Nr. 3, S 55-63
- [7] **Shih, T.-H.; Liou, W.W.; Shabbir, A.; Yang, Z.; Zhu, J.:** A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows, Computers Fluids, Vol. 24 (1995), No. 3, p. 227-238