

PHYSIKALISCHE SIMULATION DER PARTIKELBEWEGUNG IN STRANGGIEßVERTEILERN MIT HILFE DER KOMBINIERTEN DPIV/PLIF-TECHNIK

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

RWTH Aachen, Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, IOB
Kopernikusstr. 16, 52074 Aachen

Abstract

Zur Bestimmung der Abscheiderate in einem Stranggießverteiler mit Hilfe ist die Kenntnis der Partikelbewegung unerlässlich. Dazu wird die Partikelbewegung im Wassermodell eines Stranggießverteilers im Maßstab 1:3 unter Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze untersucht. Mit einem kombinierten DPIV und PLIF Messsystem werden die Geschwindigkeitsfelder der fluiden und dispersen Phase simultan gemessen. Die fluide Phase wird durch fluoreszierende Kunststoffpartikel, die disperse Phase durch Glashohlkugeln wiedergegeben. Anhand der gewonnenen Messergebnisse sollen numerischen Methoden validiert werden.

Einleitung

Die Anforderungen an den Reinheitsgrad von Stahl wachsen mit der Weiterentwicklung der Produktionsprozesse und den Einsatzmöglichkeiten moderner Stahlbauteile. Der Reinheitsgrad von Stählen wird durch Anzahl und Größe der nichtmetallischen Partikel (Al_2O_3 , SiO_2) bestimmt. Nichtmetallische Partikel stören das Metallgefüge und führen bei der Weiterverarbeitung, Umformung oder im Einsatz unter Wechsellasten zu Rissen im Material und zum Bruch der Bauteile. Leichte und dünnwandige Konstruktionen sowie schnellere Produktionszyklen erfordern hohe Festigkeiten der Bauteile, aber auch ein hohes Maß an Umformbarkeit. In Abb.1 a ist ein nichtmetallisches Partikel sphärischer Form im Schliffbild gezeigt. Zwei Beispiele zeigen stellvertretend die Auswirkungen nichtmetallischer Partikel bei der Weiterverarbeitung. Abb. 1 b zeigt einen gerissenen Draht mit Einschluss, Abb. 1 c Fehler in der Lochblende eines Monitors.

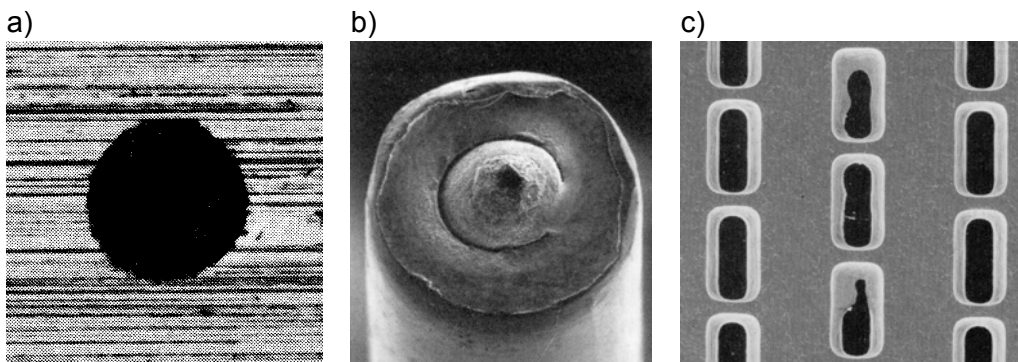


Abb. 1: a) Sphärisches Al_2O_3 -Partikel mit 120 μm Durchmesser, b) Gerissener Draht mit Einschluss, c) Lochblende einer Bildröhre, Jakobi 1994 und 1996

Nichtmetallische Partikel entstehen prozessbedingt bei hohen Temperaturen von über 1550° C in Stahlschmelzen durch Abrasion des Feuerfestmaterials oder bei der Reoxidation mit Sauerstoff. Die erste Maßnahme zur Erzielung eines hohen Reinheitsgrades ist der Einsatz geeigneter Feuerfestmaterialien und die Abschirmung der Schmelze vor Luftsauerstoff durch Schlacken und Schutzgas.

In einer Stranggießanlage wird die Stahlschmelze in Pfannen mit einem Fassungsvermögen von bis zu 360 t angeliefert. Die Schmelze fließt aus der Pfanne in den Stranggießverteiler. Dieser dient während des Pfannenwechsels als Materialpuffer für den kontinuierlichen Erstarrungsprozess in der Kokille und unterstützt die Abscheidung nichtmetallischer Partikel in die Schlacke. Die Abscheiderate β berechnet sich nach

$$\beta = \frac{N_{\text{ein}} - N_{\text{aus}}}{N_{\text{aus}}} \quad (1)$$

$N_{\text{ein}}, N_{\text{aus}}$: Anzahl der Partikel am Ein- und Austritt des Verteilers.

Strömungstechnische Untersuchungen in Schmelzen sind nur begrenzt möglich. Da Schmelzen und Wasser annähernd dieselbe kinematische Viskosität ($\nu_{\text{Stahl } 1510^\circ} = 0.872 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu_{\text{Wasser } 20^\circ} = 1.006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) und somit nahezu identische Fließeigenschaften besitzen, können laseroptische Messungen an Wassermodellen durchgeführt werden.

Ähnlichkeit und Versuchsauslegung

Die Wiedergabe der Strömung im Modellversuch wird durch die Einhaltung der geometrischen und dynamischen Ähnlichkeit erreicht. Unter geometrischer Ähnlichkeit versteht man die Einhaltung eines Längenmaßstabes für alle Größen im Wassermodell. Die dynamische Ähnlichkeit wird durch die Einhaltung der Reynolds- (Re) und Froude-Zahl (Fr) erreicht. Die Re-Zahl berechnet sich mit dem hydraulischen Durchmesser d_{hyd} und der mittleren Durchströmgeschwindigkeit \bar{u} und den in Abb. 2 gezeigten geometrischen Größen zu

$$\text{Re} = \frac{d_{\text{hyd}} \bar{u}}{\nu} \quad , \quad \text{mit} \quad d_{\text{hyd}} = \frac{4A}{U} \quad \text{und} \quad \bar{u} = \frac{\dot{V}_{\text{SR}}}{A} \quad , \quad (2)$$

und die Fr-Zahl mit

$$\text{Fr} = \frac{\bar{u}}{\sqrt{g d_{\text{hyd}}}} \quad . \quad (3)$$

Bei Einhaltung der Re-Zahl werden die Strömungsstrukturen (Wirbel, Ablösepunkte), bei Einhaltung der Fr-Zahl die Oberflächenwellenstruktur wiedergegeben. Beide Kennzahlen lassen sich im verkleinerten Wassermodell nicht gleichzeitig einhalten. Hier führt die Einhaltung der Re-Zahl zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten und damit zur Ausbildung starker Oberflächenwellen. Deshalb wird im Modellversuch eine kleinere Re-Zahl gewählt, die aber deutlich im turbulenten Bereich liegt. Für den Modellversuch wurde $\text{Re} = 5000$ gewählt, Tabelle 1 und 2.

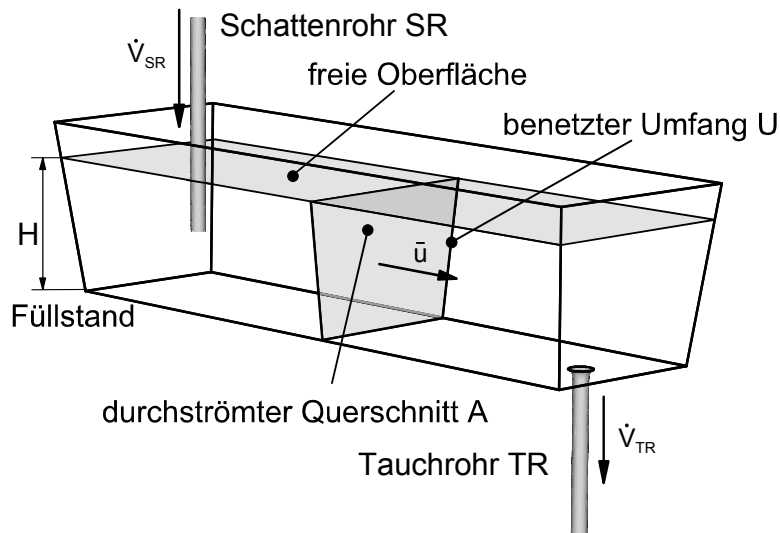


Abb. 2: Geometrische Größen zur Berechnung der Re- und Fr-Zahl

Tabelle 1: Strömungstechnische Größen des Originalverteilers, Maßstab 1:1, Schmelze

\dot{m}_{SR} in kg/s	$\dot{V}_{SR,TR}$ in l/s	\bar{u} in m/s	Re	Fr
38	5.39	0.0077	10380	$2.26 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 2: Strömungstechnische Größen des Wassermodells, Maßstab 1:3, bei unterschiedlichen Ähnlichkeiten

Ähnlichkeit	\dot{V} in l/s	\bar{u} in m/s	Re	Fr
Re-Ähnlichkeit	2.08	0.0267	10380	$1.36 \cdot 10^{-3}$
Versuch	1.03	0.0128	5000	$6.56 \cdot 10^{-3}$
Fr-Ähnlichkeit	0.35	0.0052	2011	$2.26 \cdot 10^{-3}$

Für die Partikelabscheidung im Modellversuch müssen die Auftriebskräfte und das dynamische Verhalten der Partikel korrekt wiedergegeben werden. Idealerweise wird hierbei von sphärischen Partikeln ausgegangen (Abb. 1 a). Die Kennzahlen für die stationäre Bewegung eines Partikels in einem Fluid sind die Partikel-Archimedes-Zahl

$$Ar_P = \frac{gd_P^3}{\nu^2} \left(\frac{\rho_F - \rho_P}{\rho_F} \right), \quad (4)$$

und die Partikel-Re-Zahl

$$Re_P = \frac{\rho_F d_P u_{rel}}{\mu_F}. \quad (5)$$

Die Ar_P -Ähnlichkeit lässt sich im Wassermodell nur im Maßstab 1:1 einhalten. Im verkleinerten Wassermodell führt die maßstäbliche Verringerung des Partikeldurchmessers zu geringeren Auftriebskräften und damit auch zu geringeren Aufstiegsgeschwindigkeiten. Die Partikel treffen im Modell an einer anderen Stelle an die Oberfläche als im Original. Im Modellversuch wird die Partikelauftiegs-geschwindigkeit u_{AP} derart eingestellt, dass die Partikel an der gleichen Stelle auf die Oberfläche treffen wie im Original (Abb. 3), Neifer et al. 1991.

$$\frac{\bar{u}_{St}}{u_{AP,St}} = \frac{\bar{u}_W}{u_{AP,W}} \quad (6)$$

a) Original (Maßstab 1:1, Schmelze)

b) Modell (Maßstab 1:3, Wasser)

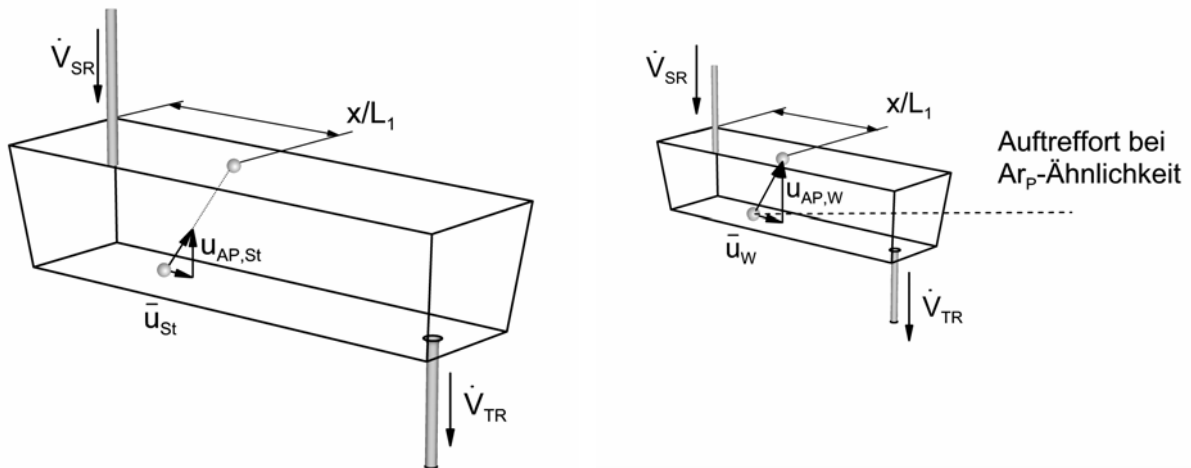


Abb. 3: Einhaltung der Geschwindigkeitsverhältnisse im Stranggießverteiler

Die allgemeine Bewegungsgleichung für sphärische Partikel in einem Newtonschen Fluid ist in Gl. 7 wiedergegeben, Maxey und Riley 1982. Diese Bewegungsgleichung vereinfacht sich für ein ruhendes Fluid ($u_F = 0$) zu der nach Boussinesq, Basset und Oseen benannten Bewegungsgleichung (BBO-Gleichung), siehe Crowe et al. 1998, Mordant et al. 2000 und Abbad et al. 2003. Sie gilt für einzelne Partikel und $Re_p < 1$ unter Verwendung der Stokesschen Näherung für den Widerstandsbeiwert c_W

$$m_p \frac{du_p}{dt} = (m_p - m_F)g + m_F \frac{Du_F}{Dt} + 6\pi d_p \mu_F (u_F - u_p) + \frac{1}{2} m_F \frac{d(u_F - u_p)}{dt} + 6d_p^2 (\pi \mu_F \rho_F)^{\frac{1}{2}} \int_0^t \frac{d(u_F - u_p)}{(t - \tau)^{\frac{1}{2}}} d\tau, \quad (7)$$

- u_F, u_p : Fluid- bzw. Partikelgeschwindigkeit,
- m_F, m_p : Fluid- bzw. Partikelmasse,
- ν_F : kinematische Viskosität.

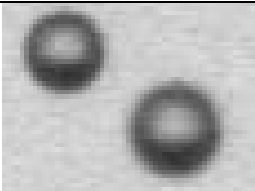
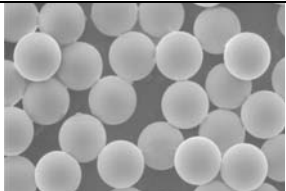
Nach einer Größenabschätzung der Einzelterme wird die BBO-Gleichung auf ein vereinfachtes Partikelgleichgewicht, welches die Auftriebs-, Gewicht- und Widerstandskräfte berücksichtigt, reduziert. In diesem vereinfachten Ansatz wird eine Näherung für c_W nach Martin 1980 eingeführt, die im Bereich $0 < Re_p < 3 \cdot 10^5$ gilt. Damit berechnet sich die theoretische Aufstiegsgeschwindigkeit der Glashohlkugeln im Wassermodell nach Gl. 8 zu $u_{AP,W} = 0.011$ m/s

$$u_{AP,W} = 18 \frac{\nu_F}{d_p} \left[\sqrt{1 + \frac{\sqrt{Ar_p}}{9}} - 1 \right]^2. \quad (8)$$

Die Geschwindigkeitsmessung der Zwei-Phasen-Strömung (Wasser/Partikel) wird mit unterschiedlichen Partikelsorten realisiert. Die fluide Phase wird durch fluoreszierende Kunststoffpartikel wiedergegeben. Diese werden durch das Laserlicht angeregt und emittieren Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 578$ nm. Die disperse Phase wird durch Glashohlkugeln charakterisiert, welche das Laserlicht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 532$ nm reflektieren, Tab. 3. Die

Lichtsignale unterschiedlicher Frequenz werden durch zwei CCD-Kameras, die mit monochromatischen Filtern ausgestattet sind, aufgezeichnet.

Tabelle 3: Daten der im Versuch verwendeten Partikel

	Glashohlkugeln	Kunststoffpartikel
d_P in μm	200 (mittlerer d_P , gesiebt)	100
ρ_P in g/cm^3	0.2	1.19
λ_{emiss} in nm	532	578
Bezeichnung	Q 21	PMMA RhB L1089-2
Bild		

Versuchsstand und Messtechnik

Bei dem am IOB verwendeten Wassermodell im Maßstab 1:3 handelt es sich um einen, bei der Firma ThyssenKrupp Nirosta eingesetzten 16 t-Stranggießverteiler. Abb. 4 zeigt den Wassermodell-Versuchsstand mit dem DPIV/PLIF-Messsystem. Die Abmaße des Original- und des Wassermodell-Verteilers werden in Abb. 5 wiedergegeben. Der Maßstab des Versuchsstandes wurde gezielt auf die Auflösung der vorhandenen CCD-Kameras und das zu erwartende Lichtsignal der fluoreszierenden Kunststoffpartikel abgestimmt.

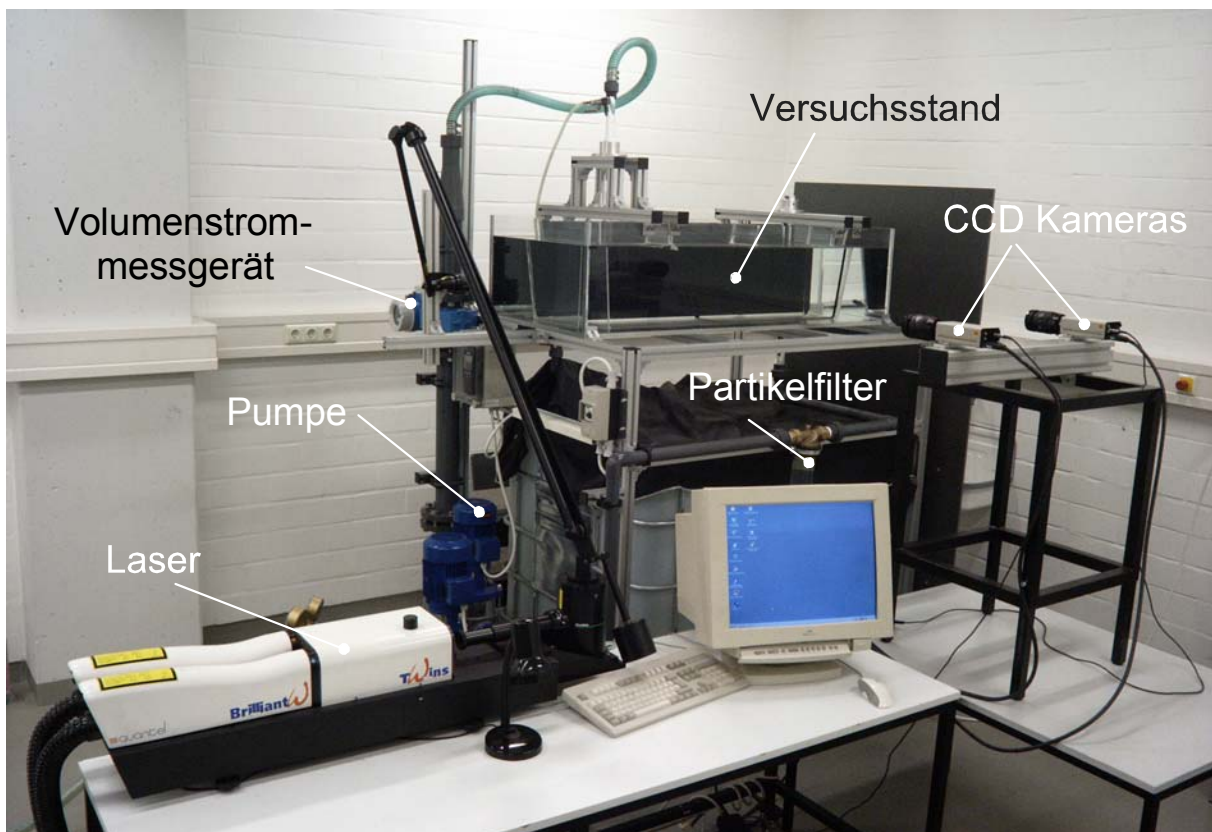
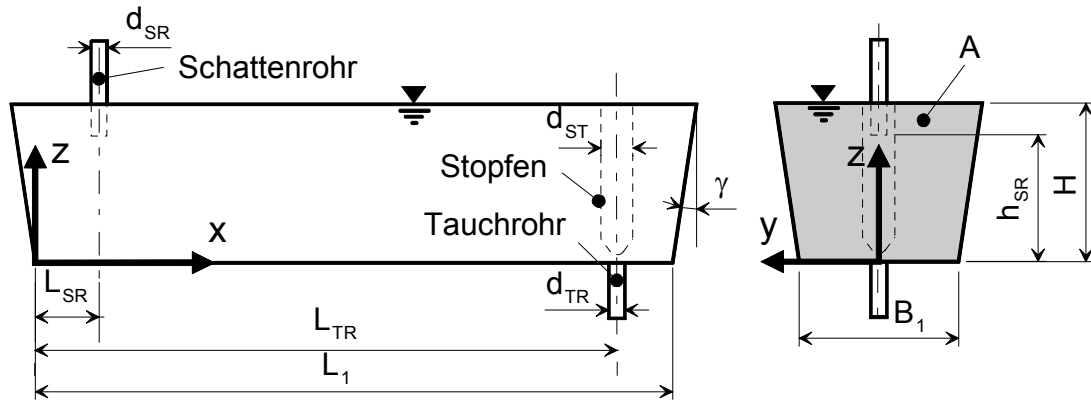


Abb. 4: Versuchsstand des Wassermodell-Verteilers im Maßstab 1:3 mit eingesetzter Messtechnik



		Original	Modell
Verteilervolumen bei H	V	2275 l	84 l
Bodenlänge Verteiler	L_1	3.140 m	1.047 m
Bodenbreite Verteiler	B_1	0.785 m	0.26 m
Neigung der Seitenwände	γ	7°	7°
Füllstand stat. Gießen	H	0.800 m	0.267 m
Position Schattenrohr	L_{SR}	0.335 m	0.112 m
Durchmesser Schattenrohr	d_{SR}	0.068 m	0.023 m
Höhe Boden-Schattenrohr	h_{SR}	0.6 m	0.2 m
Position Tauchrohr	L_{TR}	2.885 m	0.962 m
Durchmesser Tauchrohr	d_{TR}	0.070 m	0.023 m
Durchmesser Stopfen	d_{ST}	0.127 m	0.042 m
durchströmter Querschnitt	A	0.703 m ²	0.0787 m ²
hydraulischer Durchmesser	d_{hydr}	1.175 m	0.691 m

Abb. 5: Geometrische Bezeichnungen des Stranggießverteilers

Für quantitative Messungen der Wasserströmung steht am IOB eine 3D-DPIV-Anlage der Fa. Dantec zur Verfügung. Es besteht aus zwei 140 mJ Nd:YAG-Laser, einem 1.80 m Lichtführungsarm, zwei Kodak Megaplug ES 1.0 CCD-Kameras und der Auswertesoftware Flow-Manager. Die beiden CCD-Kameras wurden mit monochromatischen Filtern ($\lambda = 532 \text{ nm}$ und $\lambda = 570 \text{ nm}$) versehen und zeichnen nur das Lichtsignal der entsprechenden Partikelsorte auf.

Tabelle 4: Technische Daten des DPIV/PLIF-Messsystems

Doppelt gepulster Nd:YAG-Laser mit Lichtführungsarm (1.80 m)	Wellenlänge λ Taktrate f max. Pulsenergie E_{max} Pulsdauer t Zeit zwischen zwei Pulsen $\Delta t_{DPIV, min}$ Dicke des Lichtschnitts Δy_0	532 nm 15 Hz 140 mJ 4.3 ns 1 μ s 2 mm
Zwei Kodak Megaplug ES 1.0 CCD-Kameras (Klasse-II-Chip)	Auflösung Bild-Aufnahmerate f (Doppelaufnahme) Zellengröße Chipgröße	1008 x 1018 Pixel 7 Hz 9·10 ⁻³ mm x 9·10 ⁻³ mm 9.07 mm x 9.16 mm
monochromatische Filter	Wellenlänge λ	532 nm und 570 nm

Abb. 6 zeigt das Rohrleitungssystem des Versuchstandes mit Pumpe, Volumenstrommessgerät und Partikelfilter.

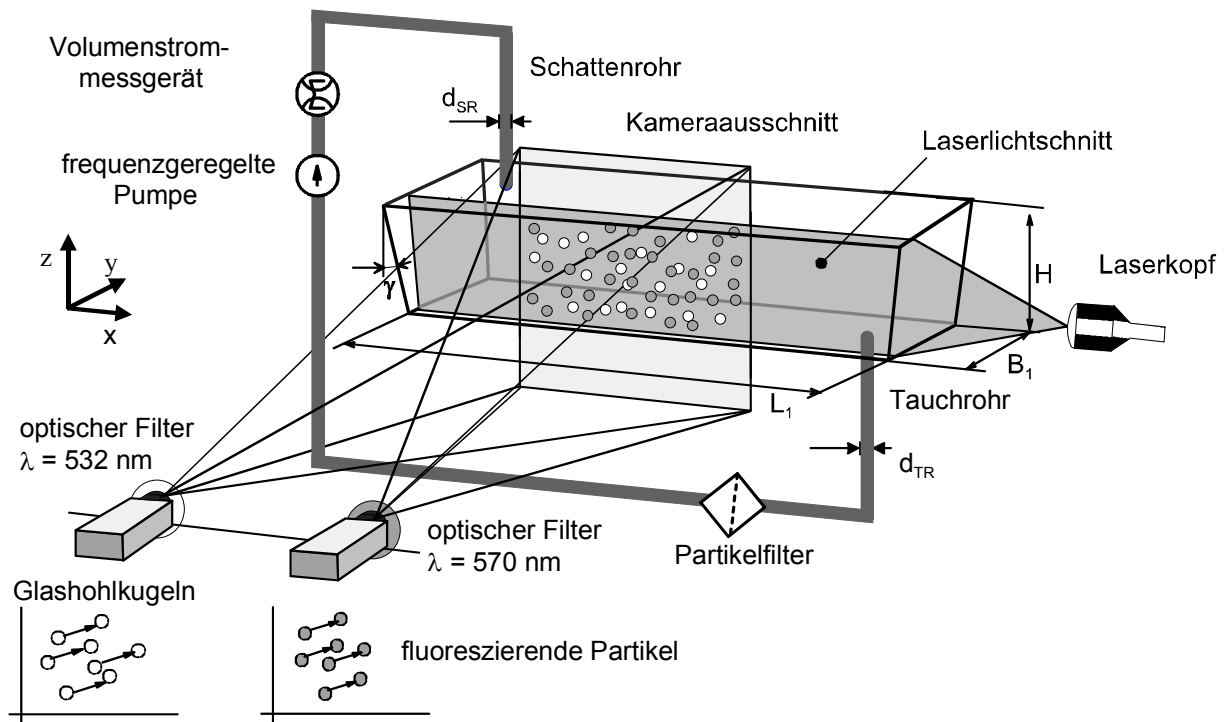


Abb. 6: Prinzipieller Aufbau des Wassermodell-Verteilers und des DPIV/PLIF-Messsystems

Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Strömung im Stranggießverteiler ist Gegenstand der Untersuchungen von Bölling 2003 und Odenthal 2004. In Abb. 7 wird das Strömungsfeld einer DPIV-Geschwindigkeitsmessung im Außenschnitt ($y/B_1 = 0.49$) des Wassermodell-Verteilers ($Re = 5000$) gezeigt. Der in den Stranggießverteiler eintretende Schattenrohrstrahl fließt radial über den Verteilerboden und trifft auf die Seitenwand, wo er zwischen $x/L_1 = 0.11$ und $x/L_1 \approx 0.8$ eine aufwärtsgerichtete Strömung erzeugt. Die Geschwindigkeiten in diesem Bereich betragen das Zehnfache der mittleren Durchströmgeschwindigkeit und erzeugen eine Kurzschlussströmung. Bei $x/L_1 = 0$ bildet sich eine aufwärtsgerichtete Strömung aus.

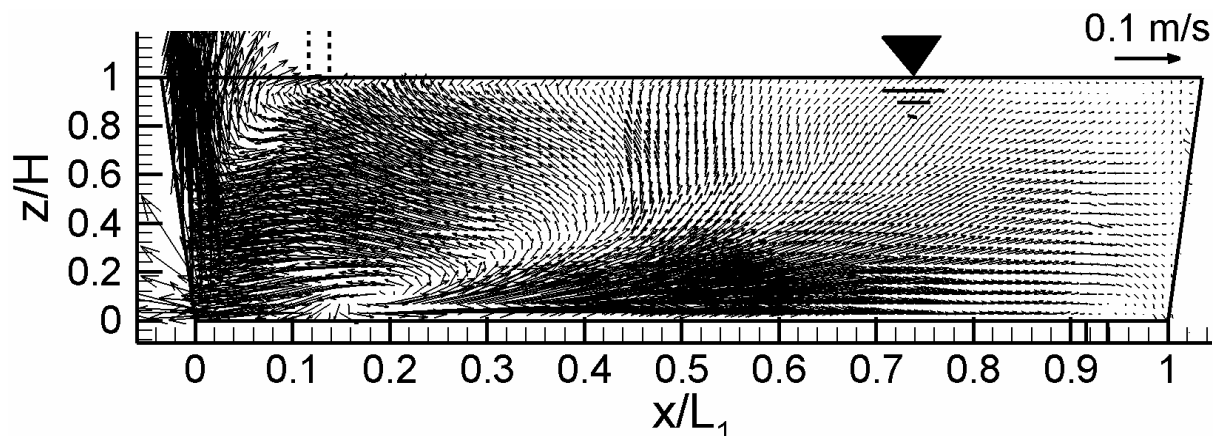


Abb. 7: DPIV-Geschwindigkeitsmessung am Wassermodell (M 1:3), $\dot{V} = 1$ l/s, $Re = 5000$, $Fr = 6.56 \cdot 10^{-3}$, 100 Doppelbilder, $\Delta t_A = 333$ ms, $\Delta t_{DPIV} = 2$ ms, 64×64 Pixel, 75 % Overlap, Außenschnitt ($y/B_1 = 0.49$)

Für die Zwei-Phasen-Messung werden die beiden CCD-Kameras auf denselben Ausschnitt im Außenschnitt des Wassermodells ausgerichtet. Die Geschwindigkeitsmessungen der fluiden und dispersen Phase werden in einem Ausschnitt der in Abb. 7 gezeigten Messebene zwischen $x/L_1 = 0.26$ und $x/L_1 = 0.62$ durchgeführt. Dieser Bereich liegt in unmittelbarer Nähe des Schattenrohres, damit ein ausreichendes Seeding der Glashohlkugeln sichergestellt wird. Die einmal durch die Strömung an die Oberfläche geführten Glashohlkugeln verbleiben an der Oberfläche. Die Aufstiegsgeschwindigkeit der Glashohlkugeln ist so gewählt, dass sie im Bereich der mittleren Durchströmgeschwindigkeit liegt und somit deutlich gemessen werden kann. Es herrscht über den gesamten Messbereich eine aufwärtsgerichtete Strömung, was die Abscheidung von Partikeln an die Oberfläche unterstützen sollte.

Abb. 8 zeigt das gemessene Geschwindigkeitsfeld der Wasserströmung, hinterlegt mit der turbulenten kinetischen Energie k . Es liegt eine gute Übereinstimmung mit der Geschwindigkeitsmessung in Abb. 7 vor. Im Bodenbereich, zwischen $x/L_1 = 0.26$ und $x/L_1 = 0.4$, liegt ein Gebiet hoher kinetischer Energie, die aus der bodennahen Strömung des Schattenrohrstrahls resultiert.

Abb. 9 zeigt die gemessene Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Phasen u_{rel} . In weiten Bereichen konnte die theoretische Aufstiegsgeschwindigkeit von $u_{AP,W} = 0.011$ m/s (Gl. 8) gemessen werden. Die genauen Ursachen für die Abweichungen von der theoretischen Aufstiegsgeschwindigkeit im Bodenbereich zwischen $x/L_1 = 0.26$ und $x/L_1 = 0.4$ und im oberen Bereich zwischen $x/L_1 = 0.26$ und $x/L_1 = 0.35$ müssen noch untersucht werden.

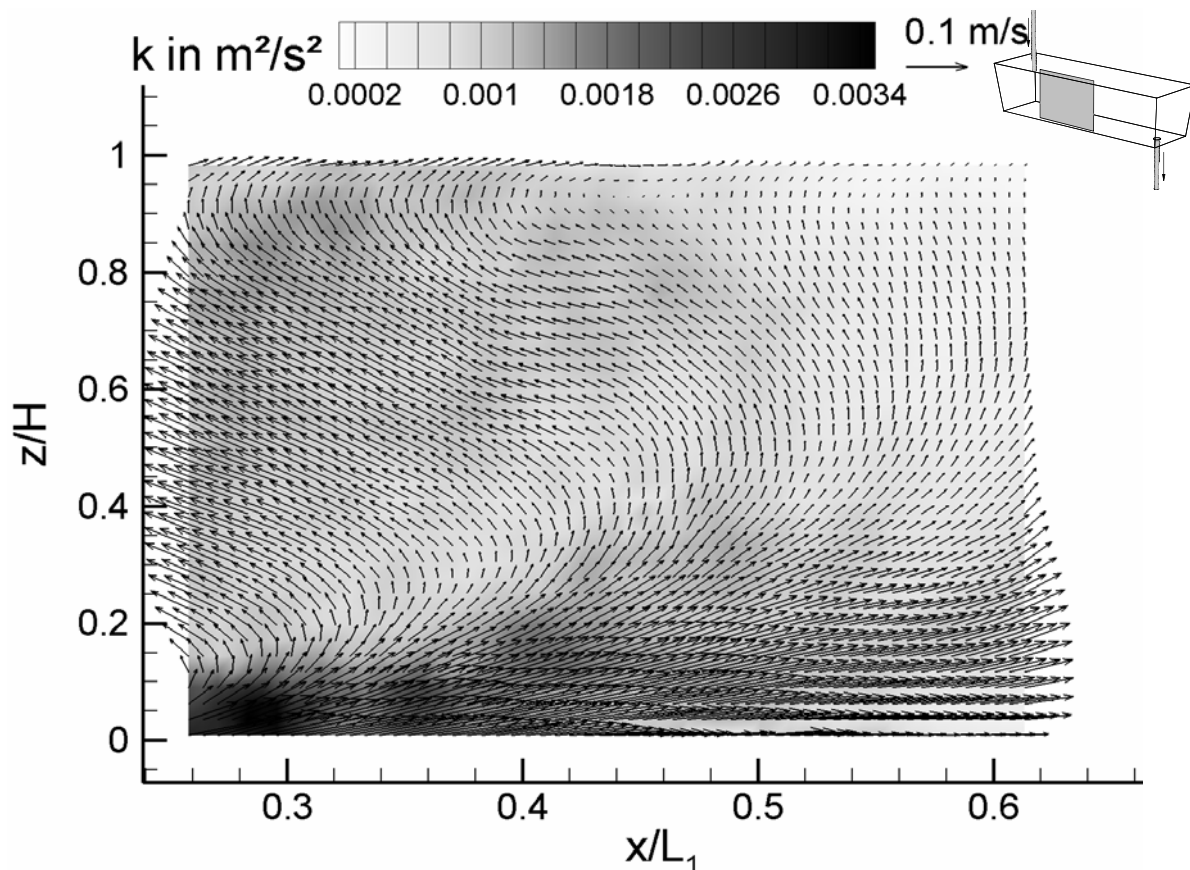


Abb. 8: DPIV-Geschwindigkeitsmessungen im Wassermodell (M 1:3), $\dot{V} = 1$ l/s, $Re = 5000$, $Fr = 6.56 \cdot 10^{-3}$, 100 Doppelbilder, $\Delta t_A = 333$ ms, $\Delta t_{DPIV} = 2$ ms, 64×64 Pixel, 75 % Overlap, Außenschnitt $y/B_1 = -0.49$

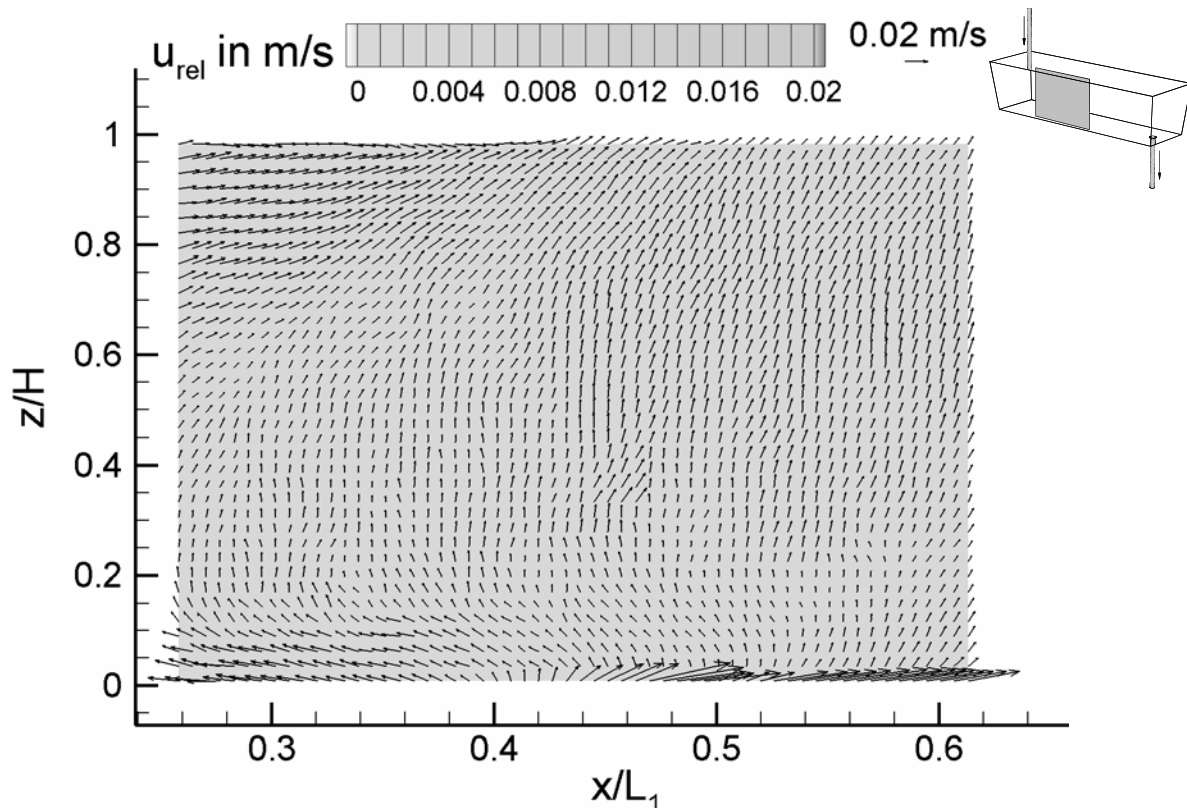


Abb. 9: Gemessene Differenzgeschwindigkeit u_{rel} zwischen der fluiden und dispersen Phase im Wassermodell (M 1:3), $\dot{V} = 1$ l/s, $Re = 5000$, $Fr = 6.56 \cdot 10^{-3}$, Außenschnitt $y/B_1 = -0.49$

Zusammenfassung und Ausblick

Am Wassermodell eines Stranggießverteilers im Maßstab 1:3 wurden mit einem DPIV/PLIF-System simultan die Geschwindigkeitsfelder einer Zwei-Phasen-Strömung fluid/dispers gemessen. Das Geschwindigkeitsfeld der dispersen Phase wurde durch Glashohlkugeln wiedergegeben und mittels der DPIV-Messtechnik aufgenommen. Das Geschwindigkeitsfeld der fluiden Phase wurde durch fluoreszierende Kunststoffpartikel wiedergegeben und mittels der PLIF-Messtechnik aufgenommen. Die leichteren Glashohlkugeln entwickeln Auftriebskräfte und steigen in der Wasserströmung auf. Die Geschwindigkeitsmessungen im Ausschnitt des Wassermodells zeigen, dass die gemessene Aufstiegsgeschwindigkeit gut mit dem theoretischen Wert nach der vereinfachten BBO-Gleichung übereinstimmt. Es gibt aber auch Bereiche in denen die Aufstiegsgeschwindigkeit nahezu unterdrückt wird. Eine mögliche Ursache könnte in der turbulenzabhängigen Änderung des Widerstandsbeiwertes liegen. Dies muss noch genauer untersucht werden. Mit unterschiedlichen CFD-Modellen (Euler-Euler, Euler-Lagrange) soll die Partikelbewegungen berechnet und mit den Messergebnissen verglichen werden. Ziel ist es, geeignete numerische Methoden zu finden, mit denen die Partikelbewegung ausreichend genau simuliert werden kann.

Literatur

- Abbad, M., Souhar, M., 2003: Effects of the history force on an oscillating rigid sphere, Experiments in Fluid, Vol. 36, pp.775-782
 Bölling, R., 2003: Numerische und physikalische Simulation der stationären und instationären Strömung in Stranggießverteiltern. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
 Crowe, C., Sommerfeld, M., Tsuji, Y., 1998: Multiphaseflow, CRC Press, Boca Raton

- Jacobi, H., 1996: Hohe Reinheit der Stähle als Kriterium der Werkstoffentwicklung, Stahl und Eisen 116, Nr. 5, S. 59-68
- Jacobi, H., 1994: Metallurgie und Werkstofftechnik hochreiner Stähle, Stahl und Eisen 114, Nr. 11, S. 45-56
- Maxey, M., Riley, J., 1983: Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow, Phys. Fluids, Vol. 26, No. 4, pp. 883-889
- Mordant, N., Pinton, J.-F., 2000: Velocity measurements of a settling sphere, European Physical Journal B, Vol. 18, pp. 343-352
- Martin, H., 1980: Wärme- und Stoffübertragung in der Wirbelschicht, Chem.-Ing.Tech. 52, Nr. 3, S. 109-209
- Neifer, M., Andrzejewski, P., 1991: Verbesserung des Reinheitsgrades von Stahlschmelzen bei instationären Strömungszuständen in Brammenstranggießverteilern, technische forschung stahl, Europäische Kommission Abschlussbericht, EUR 15469 DE
- Odenthal, H.-J., 2004: Physikalische und numerische Strömungssimulation kontinuierlicher Gießprozesse der Hochtemperaturtechnik. Eingereichte Habilitationsschrift, RWTH Aachen, Aachen