

## BESTIMMUNG DES STRÖMUNGSFELDES IN EINEM WASSERMODELL EINES AOD-KONVERTERS MITTELS PIV

### DETERMINATION OF THE FLOW FIELD IN A WATER MODEL OF AN AOD CONVERTER USING PIV TECHNIQUES

Wuppermann, C.; Rückert, A.; Pfeifer, H.<sup>1)</sup> Odenthal, H.-J.<sup>2)</sup>

- 1) Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik der RWTH Aachen, Mies-van-der-Rohe-Str.10, 52074 Aachen, Germany
- 2) SMS Siemag AG, Eduard-Schloemann-Straße 4, 40237 Düsseldorf, Germany

PIV, AOD-Konverter, Wassermodell  
PIV, AOD converter, water model

#### Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden PIV-Messungen (Particle image velocimetry) in der Symmetrieebene eines Wassermodells durchgeführt. Die Fehler auf Grund der Brechung an der gekrümmten Behälterwand werden mittels Kalibrierung des PIV-Systems ausgeglichen. Die Problematik der starken Streuung des Laserlichtes an den Gassäulen wird gelöst, indem fluoreszierende Partikel eingesetzt werden, deren Fluoreszenzwellenlänge oberhalb der des Laserlichtes liegt. Durch den Einsatz geeigneter Kamerafilter wird nur das fluoreszierende Streulicht der Partikel von den Kameras aufgenommen, wohingegen das Streulicht der Gassäule herausgefiltert wird. Die zeitliche Auflösung beträgt  $f = 5$  Hz. Die Auswertung der Bilder zeigt, dass der transiente Charakter des Strömungsfeldes gut abgebildet wird.

Die Ergebnisse ermöglichen umfassendere Validierungsmöglichkeiten für numerische Simulationen, die seit einigen Jahren verstärkt durchgeführt werden. Die Untersuchung geeigneter Mehrphasen- sowie Turbulenzmodelle kann auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit durchgeführt und somit die Qualität der numerischen Simulationen verbessert werden.

#### Einleitung

Laseroptische Messungen an Wassermodellen von AOD-Konvertern sind aus Gründen der Brechung an der gekrümmten Behälterwand und dem hohen Gasanteil in der Strömung schwierig. Aussagekräftige Untersuchungen des Strömungsfeldes wurden bisher vor allem mittels Laserlichtschnittvisualisierung durchgeführt. Hierbei kann das Strömungsfeld nur qualitativ betrachtet werden. Wei et al. 1999, 2010 wenden die Laserlichtschnittvisualisierung an, um das Strömungsfeld in Abhängigkeit vom eingeblasenen Gasvolumenstrom, der Düsenanzahl sowie des Winkels zwischen den Einzeldüsen beschreiben zu können. Odenthal et al. 2008 wenden ebenfalls die Laserlichtschnittvisualisierung an, um das Strömungsfeld in Abhängigkeit vom eingebrachten Volumenstrom und vom Füllstand zu beschreiben. Quantitative Untersuchungen wurden bisher nur unzureichend durchgeführt. Zum Einsatz kamen dabei punktuelle Geschwindigkeitsmessungen mittels LDA (Bjurström et al. 2006). Der hohe

Gasanteil in der Strömung erschwert die Messung, was u. A. zur Folge hat, dass die Anzahl an Messpunkten (5 bis 27 Messpunkte) sehr gering ist und somit die Komplexität der transienten Strömung im Behälter nicht hinreichend beschrieben wird. In der Arbeit weisen die Autoren nach, dass sich bei höheren Volumenströmen die Distanz zur Behälterwand des Blasenaustrittspunktes an der Badoberfläche erhöht. Bei steigendem Füllstand steigt diese Distanz ebenfalls leicht. Der Einfluss der Badspiegelhöhe erscheint jedoch weniger stark. Bei niedrigen Volumenströmen entsteht ein Primärwirbel, der bei steigendem Volumenstrom in Richtung der düsenabgewandten Behälterseite abgedrängt wird.

Ziel der Arbeit ist es, das Strömungsfeld in der Symmetrieebene des Wassermodells mittels PIV zu vermessen und in Abhängigkeit vom Gasvolumenstrom und Füllstand zu bewerten. Die transienten Daten werden in Form von Videos der Strömungsfelder dargestellt. Weiterhin werden die zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfelder berechnet und ausgewertet.

### Ähnlichkeitsbetrachtung

Die Strömung im Konverter wird hauptsächlich durch Schwer-, Auftriebs- und Trägheitskräfte bestimmt. Die Modifizierte Froude-Zahl  $Fr_m$  ist die bestimmende Ähnlichkeitskennzahl, welche die genannten Kräfte beschreibt. Die dynamische Ähnlichkeit wird für seitliches Einblasen nach folgender Gleichung definiert:

$$Fr_m = \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot \frac{u_{g,N}^2}{g \cdot d}$$

mit

$$\rho_g \ll \rho_l$$

Hier ist  $\rho_g$  die Gasdichte,  $\rho_l$  die Dichte der Flüssigkeit,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $d$  der Durchmesser der Düse und  $u_{g,N}$  die Geschwindigkeit des Gases in der Düse bei Normzustand. Diese Ähnlichkeitskennzahl ist für Konverterströmungen in der Literatur weit verbreitet (Fabritius et al. 2001, 2003; Tilliander et al. 2004). Gemäß diesem Ähnlichkeitskriterium wurden die Seitendüsen konstruiert und gefertigt.

### Experimenteller Aufbau

Bei dem zu untersuchenden Gegenstand handelt es sich um das Wassermodell eines 120 t-AOD-Konverters im Maßstab 1:4. Es besteht aus vier verschraubten Acrylglas-Teilen, dem oberen Kegelstumpf, dem Zylinder, dem unteren Kegelstumpf und dem Boden. Im unteren Kegelstumpf (Abbildung 1b) befinden sich sieben verstellbare Düsen. Ihre Anordnung ist in Abbildung 1b erkennbar. Das Modell wird durch ein Aluminiumgestell getragen und ist mit diesem über zwei Wellen und einen Stahlring verbunden. Der Vordruck der Pressluft kann mit Hilfe eines Reglers zwischen 0 und 6 bar variiert werden. In den durchgeführten Versuchen ist der Vordruck konstant auf 2 bar eingestellt. Der Volumenstrom jeder Düse lässt sich über ein Schwebekörper-Durchflussmessgerät mit Nadelventil regulieren. Die Ablesegenauigkeit beträgt ca. 50 l/h.

Der Volumenstrom wurde mithilfe des genannten Ähnlichkeitskriteriums vom Auslegungszustand des Originalkonverters in das System des Wassermodells umgerechnet. Dieser beträgt 2200 l/h je Düse. Die Füllhöhe für den Auslegungszustand ergibt sich auf Basis des Füllstands im Realkonverter und des Modellmaßstabs zu  $H = 0.524$  m. Werden beide Werte eingestellt, ist im Folgenden vom Standardfall die Rede. Es werden insgesamt 16 Messreihen durchgeführt. Variiert werden jeweils vier Volumenströme (V) und Füllstände (FS) im Bereich zwischen 75% und 150% bezogen auf den Standardfall. In Tabelle 1 werden die

eingestellten Parameter für die durchgeführten Messungen sowie deren Bezeichnung zusammengefasst.

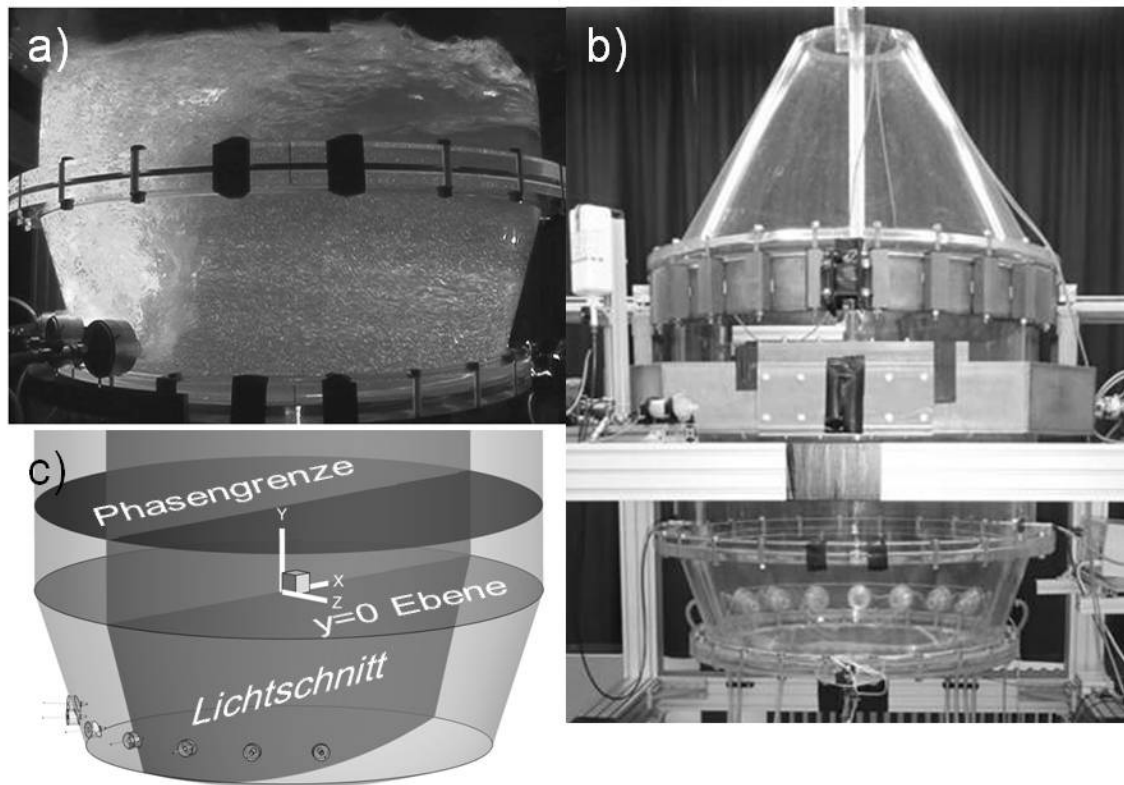


Abb. 1: a) Kameraperspektive für die PIV-Messungen, b) Wassermodell, c) Prinzipskizze

Tab. 1: Eingestellte Parameter für die vorgenommenen Messreihen

| Füllstand in % | Volumenstrom in l/h |             |             |             |
|----------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|
|                | 1650 (75%)          | 2200 (100%) | 2750 (125%) | 3300 (150%) |
| 75             | FS75 V75            | FS75 V100   | FS75 V125   | FS75 V150   |
| 100            | FS100 V75           | FS100 V100  | FS100 V125  | FS100 V150  |
| 125            | FS125 V75           | FS125 V100  | FS125 V125  | FS125 V150  |
| 150            | FS150 V75           | FS150 V100  | FS150 V125  | FS150 V150  |

Mittels PIV wird das Strömungsfeld in der Symmetrieebene des Wassermodells vermessen. Der Lichtschnitt führt vertikal durch die mittlere Düse (Abbildung 1c). Abbildung 1a zeigt ein Foto aus der Perspektive der PIV-Kameras. Der Ursprung des Koordinatensystems für die Messungen liegt auf der vertikalen Achse des Wassermodells auf Höhe des Flansches zwischen dem unteren Konus und dem zylindrischen Behälterteil (Abbildung 1b und c).

Die Messungen werden mit  $f = 5$  Hz aufgenommen. Bei dieser Bildrate ist die Anzahl der Bilder auf Grund des Kameraspeichers auf 75 Bilder begrenzt. Diese Einstellung bietet einen guten Kompromiss zwischen zeitlicher Auflösung des Strömungsfeldes und Gesamtaufnahmezeit ( $t_{\text{Ges}} = 15$  s), die für die statistische Mittelwertbildung nicht zu kurz ausfallen darf. Die im PIV-System eingestellten Parameter sowie die Eigenschaften der Partikel und Kamerafilter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Bei der Aufnahme von Partikelbildern in gekrümmten Behältern mit Mehrphasengebieten ergeben sich zwei Schwierigkeiten. Das Laserlicht wird an den Phasengrenzen zwischen Gas und Flüssigkeit sehr stark gestreut. Die Intensität des gestreuten Lichts ist um ein vielfa-

ches höher als das Streulicht der Tracerpartikel. Aus diesem Grund werden für die durchgeführten Messungen fluoreszierende Partikel eingesetzt, deren Fluoreszenzwellenlänge oberhalb der Wellenlänge des Laserlichtes liegen. Mithilfe eines Kamerafilters, der undurchlässig für Licht im Wellenlängenbereich des Lasers ist, kann das an den Gasblasen gestreute Licht herausgefiltert werden. Auf diese Weise passiert lediglich das Streulicht der fluoreszierenden Partikel den Filter und man erhält kontrastreiche Abbildungen der Partikelmuster.

Die Verzerrung der Partikelmuster auf Grund der Behälterkrümmung wird mittels einer Kalibrierung des PIV-Systems unterbunden. Zum Einsatz kommt dabei eine Kalibrierplatte, die gemäß der Position des Lichtschnittes in das Wassermodell eingehängt wird. Das definierte Muster auf der Platte wird von der Auswerte-Software erkannt und eine Funktion berechnet, die die Verzerrung des Bildes ausgleicht. Diese Funktion wird auf alle Bilder der Messreihen angewendet.

Tab. 2: Parameter für die PIV-Messungen

| Bezeichnung                        | Wert  |
|------------------------------------|---|
| Aufnahmefrequenz                   | $f = 5 \text{ Hz}$                              |
| Anzahl der Bilder pro Messung      | $N_B = 75$                                      |
| Aufnahmezeit                       | $t_{\text{Ges}} = 15 \text{ s}$                 |
| Eigenschaften der Tracerpartikel   | $d_p = 20 \dots 50 \text{ }\mu\text{m}$         |
|                                    | $\lambda_{\text{Fluoreszenz}} = 584 \text{ nm}$ |
|                                    | Rhodamin B                                      |
| Wellenlänge des PIV-Lasers         | $\lambda_{\text{Laser}} = 532 \text{ nm}$       |
| Cut-off-Frequenz des Kamerafilters | $\lambda_{\text{Cut-off}} = 540 \text{ nm}$     |

Die optische Zugänglichkeit im Wassermodell ist durch diverse Einbauten eingeschränkt. Abbildung 2 zeigt exemplarisch das Strömungsfeld einer Messung und die optisch undurchlässigen Einbauten. Strömungsfelder für Füllstände bis 100% werden vollständig erfasst. Bei höheren Füllständen wird ein Teil der Wassersäule durch das Gestell verdeckt. Im Bereich des Flanschs zwischen unterem Konus und dem zylindrischen Teil des Behälters können ebenfalls keine Vektorfelder erzeugt werden. Gleiches gilt für die Bereiche der Düsen und einen kleinen Bereich, in dem sich eine Armatur für ein Farbzugabesystem befindet.

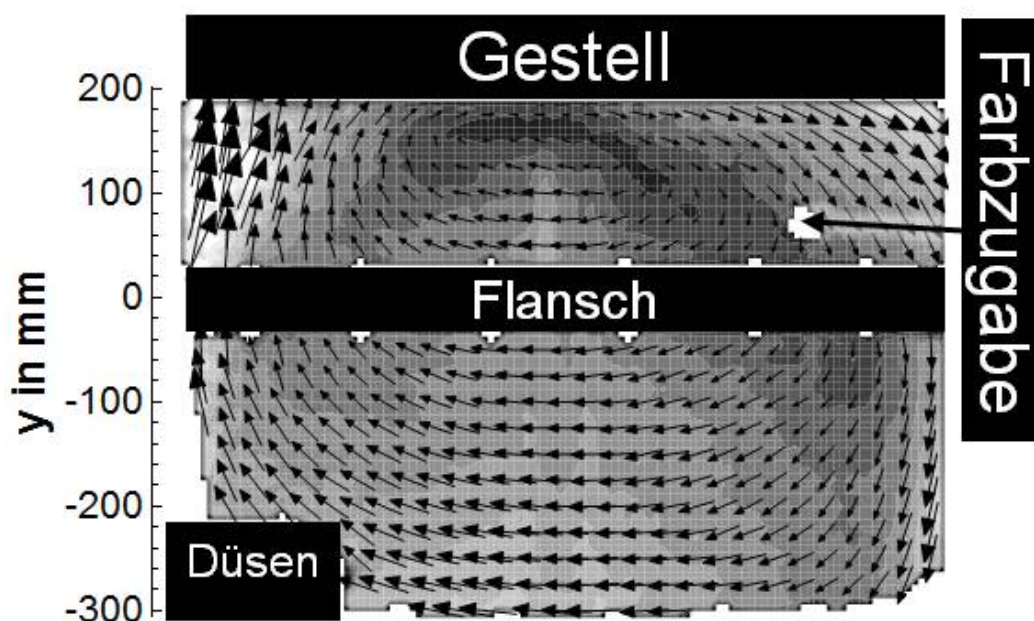


Abb. 2: Optische Zugänglichkeit des Wassermodells

## Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 3 zeigt exemplarisch das Strömungsfeld für den Standardfall (FS100 V100) für den Zeitpunkt  $t = 9.6$  s. Die Größe der Kalibrierplatte ist auf den Durchmesser der Bodenplatte limitiert. Bereiche außerhalb der Kalibrierplatte werden für die Messungen nicht berücksichtigt. Daraus ergibt sich das in Abbildung 3 erkennbare Messfeld. Die Bereiche ohne Vektoren sind Zonen, in denen die Software keine Geschwindigkeiten ermittelt, wie z. B. in Bereichen der Blasensäulen und zirkulierender Luftblasen. Für  $x < 200$  mm ist deutlich der Einfluss der der Blasensäule auf die Strömung erkennbar. Die infolge der Auftriebskraft nach oben steigenden Luftblasen erzeugen einen Sog, der das Wasser mitreißt. Im Bereich  $x > 0$  mm und  $y < 0$  mm sind mehrere Sekundärwirbel erkennbar. Die Ausprägung des Primärwirbels, wie er in den zeitlich gemittelten Strömungsfeldern erkennbar ist (Abbildung 4, 5) ist in der transienten Darstellung nicht ohne weiteres zu sehen. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen zwischen 0.8 m/s im Bereich der Blasensäule und 0.0 - 0.1 m/s im Bereich der Wirbelzentren und Scherschichten.

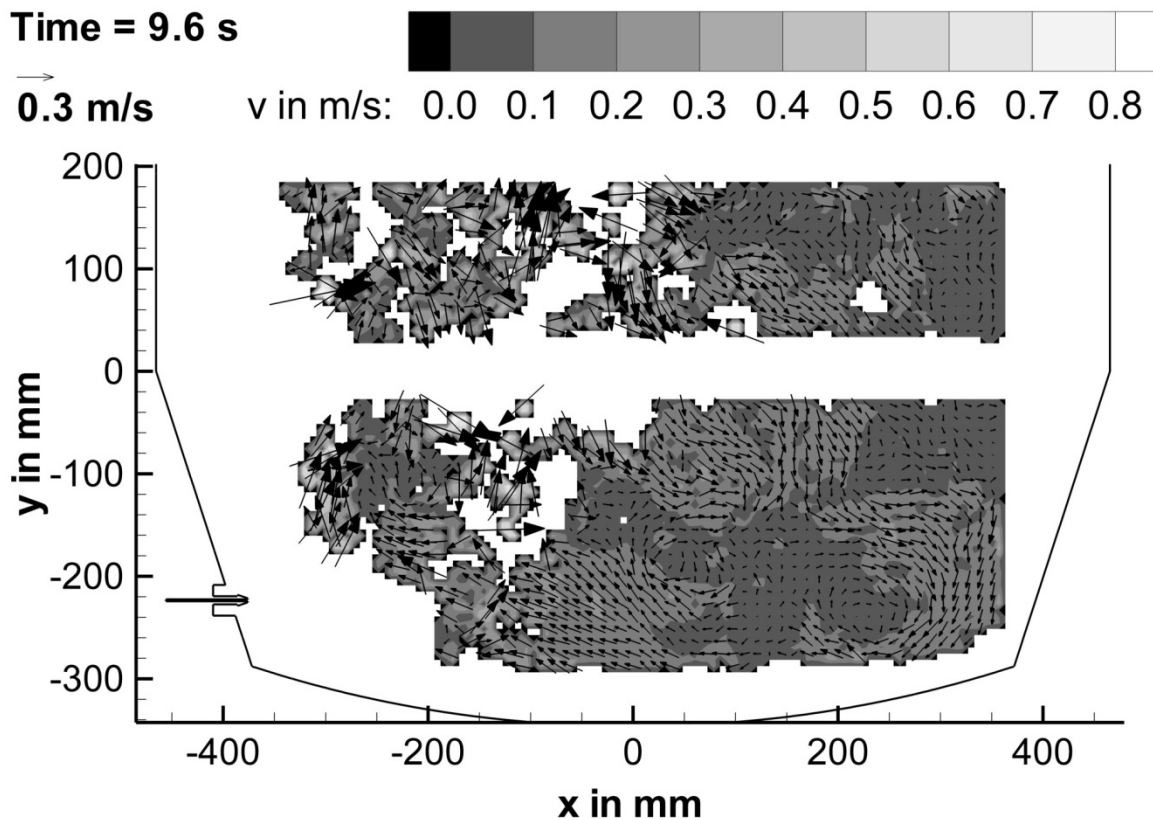


Abb. 3: Strömungsfeld für den Standardfall (FS100 V100) zum Zeitpunkt  $t = 9.6$  s

Abbildung 4 zeigt die zeitlich gemittelten Strömungsfelder für die Variation des Füllstandes bei einem Volumenstrom von 2200 l/h. Bei Füllständen von 100% und höher ist ein deutlich ausgeprägter Primärwirbel zu erkennen, dessen Zentrum mit steigendem Füllstand in positive y-Richtung wandert. Die Wirbelzentren liegen für einen Füllstand von 100% bei ca.  $y = 0$  mm und für einen Füllstand von 125% bei ca.  $y = 180$  mm. Dieser Effekt lässt sich auf ein größeres H/D-Verhältnis (Höhe/Durchmesser) zurückführen. Bei einem Füllstand von 75% ist der Primärwirbel verschwunden. Die Geschwindigkeiten steigen bei höherem Füllstand ebenfalls an. Dieses Phänomen ist auf die größere zurückgelegte Weglänge der Bla-

sen in der Flüssigkeit und die damit verbundene größere Rührwirkung zurückzuführen. Um diesen Effekt näher zu untersuchen, wurden die Geschwindigkeiten über die gesamte Fläche der Messebene gemittelt und über den Volumenstrom für unterschiedliche Füllstände aufgetragen (Abbildung 5). Für alle Messungen ergeben sich höhere mittlere Geschwindigkeiten mit steigendem Füllstand. Hierbei sind die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Füllständen 125% und 150% am geringsten.

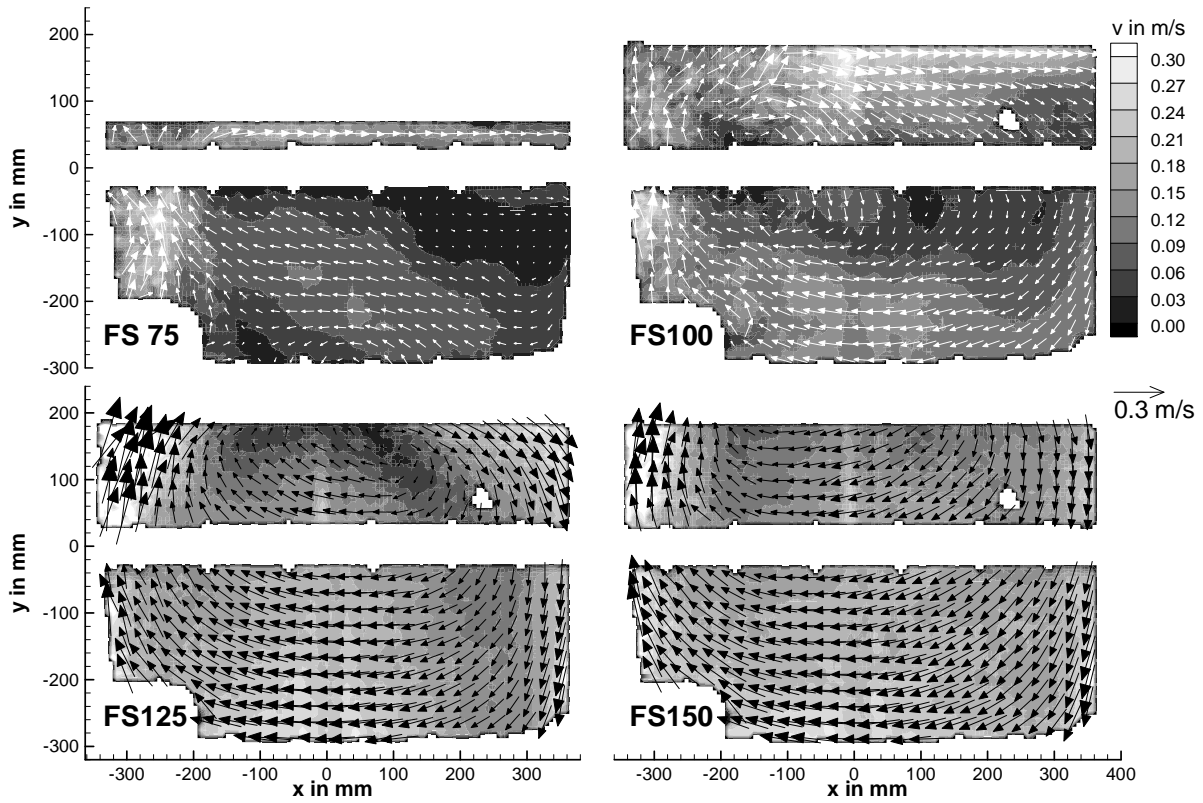


Abb. 4: Zeitlich gemittelte Strömungsfelder für die Füllstandsvariation ( $\dot{V} = 2200 \text{ l/h}$ )

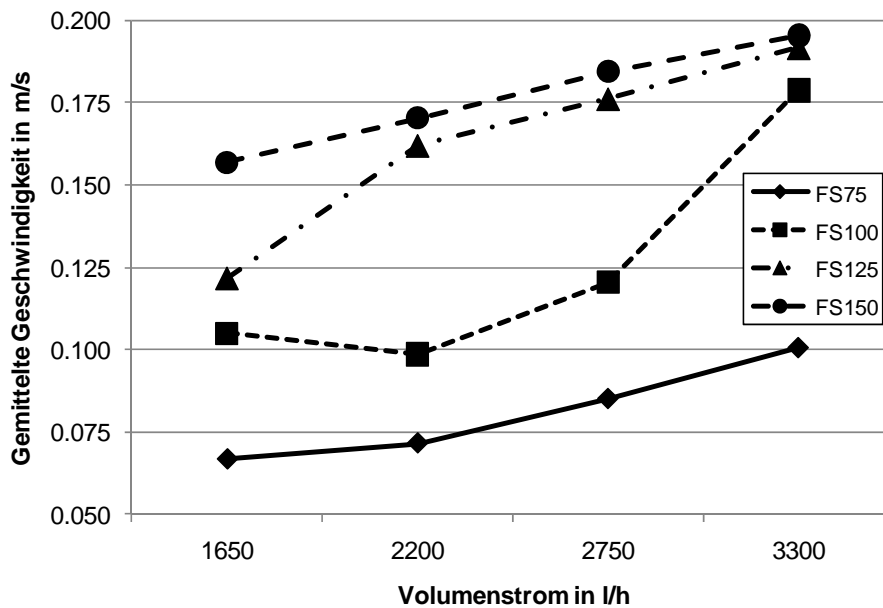


Abb. 5: Gemittelte Geschwindigkeiten für die durchgeführten Messungen

Abbildung 6 zeigt die zeitlich gemittelten Strömungsfelder für die Variation des Volumenstroms bei einem konstanten Füllstand von 100%. Das Wirbelzentrum bleibt unabhängig vom Volumenstrom nahezu auf einer konstanten Höhe von  $y = 150$  mm. Die Auswirkung des eingeblasenen Luftstroms auf die Geschwindigkeiten ist deutlich größer. Mit steigendem Volumenstrom steigen, bedingt durch die größere Rührwirkung, auch die Geschwindigkeiten, siehe Abbildung 5. Lediglich für den Füllstand 100% ergibt sich zwischen den Volumenströmen von 1650 l/h und 2200 l/h ein Abfall der gemittelten Geschwindigkeit.

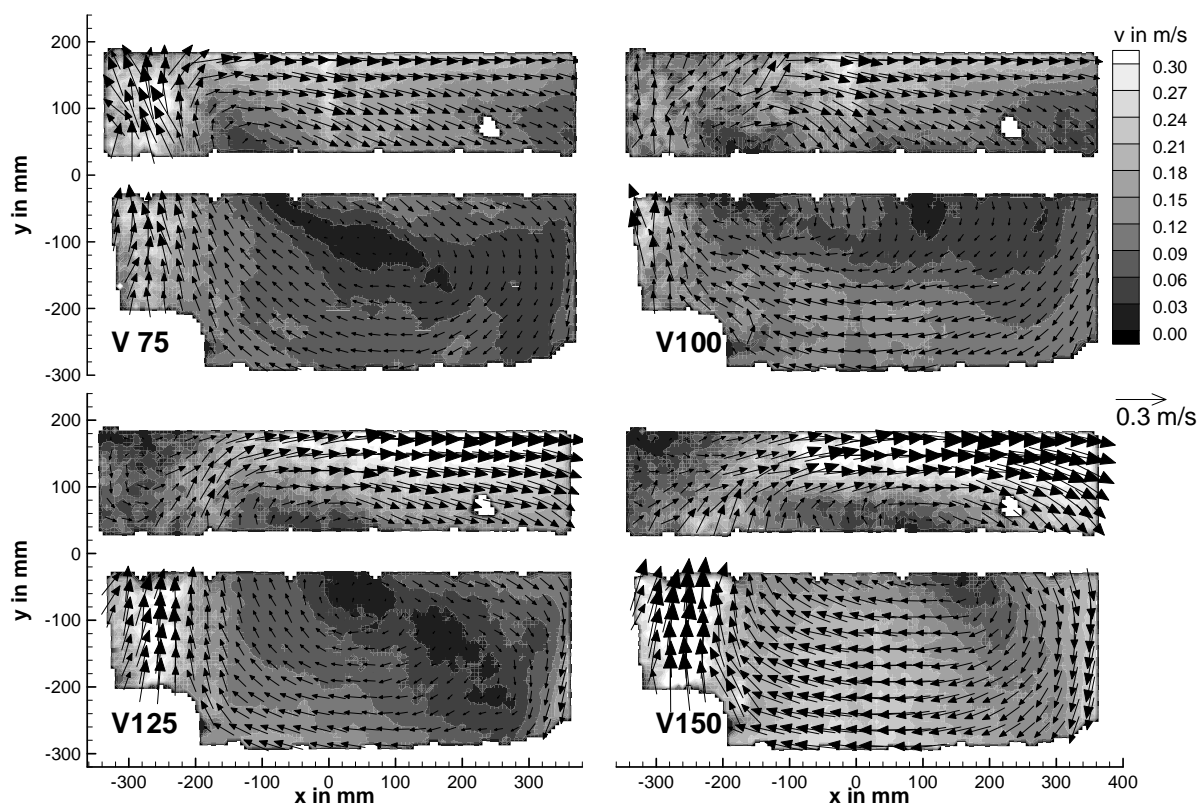


Abb. 6: Zeitlich gemittelte Strömungsfelder für die Volumenstromvariation (FS = 100%)

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde das Strömungsfeld in der Symmetrieebene eines Wassermodells eines 120 t AOD-Konverters mittels PIV vermessen. Auf diese Weise können quantitative Aussagen über die Strömung in der gesamten Messebene getroffen werden. Mittels geeigneter Tracerpartikel, Kamerafilter und Auswertesoftware lassen sich Messungen für Mehrphasenströmungen in Behältern mit gekrümmter Berandung durchführen. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- (1) Die Strömungsfelder sind in hohem Maße transient.
- (2) Ab einem Füllstand von 100% bildet sich ein Primärwirbel aus, dessen Wirbelzentrum mit steigendem Füllstand ebenfalls steigt. Dies kann mit dem steigenden H/D-Verhältnis begründet werden. Ferner erhöht sich die Weglänge des Blasenanstiegs durch die Flüssigkeit, dies verstärkt ebenfalls die Rührwirkung. Bei Füllständen unter 100% entsteht kein Primärwirbel.

- (3) Erhöht man den Volumenstrom, steigen die mittleren Geschwindigkeiten in der gesamten Messebene. Die Ursache liegt im höheren Impulseintrag in das System und der damit verbundenen Erhöhung der Rührwirkung.

## **Dank**

Die Autoren danken der SMS Siemag AG, die dieses Forschungsvorhaben sowohl fachlich als auch finanziell unterstützt.

## **Literatur**

Bjurström, M., Tilliander, A., Iguchi, M., Jönsson, P., 2006: "Physical-modeling study of fluid flow and gas penetration in a side-blown AOD converter", *ISIJ International*, Vol. 46, No 4, pp. 523-529

Fabritius, T., Kupari, P.A., Härkki J.J., 2001: "Physical modeling of a sidewall-blowing converter", *Scandinavian Journal of Metallurgy*, Vol. 30 pp. 57-64

Fabritius, T., Mure, P.T., Härkki J.J., 2003: "The determination of the minimum and operational gas flow rates for sidewall blowing in the AOD-converter", *ISIJ International*, Vol. 43, No. 8 pp. 1177-1184

Odenthal, H.-J., Falkenreck, U., Schlüter, J., 2008: "Simulation dynamischer Strömungsvorgänge beim AOD-Prozess", *ANSYS Conference & 26th CADFEM Users' Meeting*, October 22-24, Darmstadt, Germany

Tilliander, A.; Jonsson, T.L.I.; Jönsson P.G., 2004: "Fundamental mathematical modelling of gas injection in AOD converters", *ISIJ International*, Vol. 44, No. 2 pp. 326-333

Wei, J.-H., Zhu, H.-L., Chi, H.-B., Wang, H.-J., 2010: "Physical modeling study on combined side and top blowing AOD refining process of stainless steel: gas stirring and fluid flow characteristics in bath", *ISIJ International*, Vol. 50, No. 1, pp. 17-25

Wei, J.-H., Ma, J.-C., Fan, Y.-Y., Yu, N.-W., Yang, S.-H., Xiang, S.-H., Zhu, D.-P., 1999: "Water modelling study of fluid flow and mixing characteristics in bath during AOD process", *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 26, No, 5, pp. 363-371