

## MESSPRINZIP ZUR KLASSIFIZIERUNG DES ZUSTANDES VON MODELLSUSPENSIONEN

F. Hüttmann, F. Schneider<sup>1</sup>, P. Menzel, A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik,  
Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

<sup>1</sup> WILO AG, Research and Technology Center  
Nortkirchenstraße 100, 44263 Dortmund

### Abstrakt

Im Rahmen dieses Beitrages werden auf Basis optischer Ganzfeldmessverfahren Messprinzipien vorgestellt, die eine objektive Beschreibung des Suspensionszustandes in einem Modellbecken mittels der etablierten Klassifikationskriterien „1s-Kriterium“ und „Schichthöhenkriterium“ ermöglichen. Zum Einsatz kommen Komponenten eines konventionellen PIV/PLIF-Messsystems, mit deren Hilfe sowohl die Messwerterfassung als auch die zugehörigen Bildauswertungen durchgeführt werden. Bei den durchgeführten Tests zu beiden Messmethoden konnte festgestellt werden, dass die Messverfahren sich für eine objektive Beschreibung der Suspension in einem Modellbecken eignen. Da PIV/PLIF-Messsysteme nicht für solche Untersuchungen konzipiert sind, ergeben sich für Messwerterfassung sowie Bildauswertung weiterer Entwicklungsbedarf und Optimierungsaufwand.

### 1 Einleitung

Um Ablagerungen von beispielsweise Schlammflocken und Sand im Abwasserbecken zu verhindern, werden in der Abwassertechnik Rührwerke eingesetzt. Damit diese Feststoffpartikel in Schwebelage gehalten werden, ist ein Energieeintrag in das Abwasser durch ein oder mehrere Rührwerke erforderlich, der aus ökologischer sowie ökonomischer Sicht optimal gestaltet werden muss. Für diese Optimierungsaufgabe wird unter anderem der Suspensionszustand bestimmt, der in der Verfahrenstechnik vorrangig durch die zwei etablierten Klassifikationskriterien „1s-Kriterium“ bzw. „Schichthöhenkriterium“ beschrieben wird. Da beide Klassifikationskriterien zurzeit entweder visuell oder über Probenentnahmen bestimmt werden, ist deren Erfassung durch Wechselwirkungen zwischen Suspension und Messsonde beeinflusst und subjektiv. Besonders die Wechselwirkungen zwischen Suspension und invasiven Messverfahren bewirken bei experimentellen Untersuchungen im verkleinerten Modellmaßstab eine Verstärkung von Messunsicherheiten. Grundlegende experimentelle Untersuchungen im verkleinerten Modellmaßstab durchzuführen, ist für Optimierungsaufgaben sinnvoll, da sich Parameterstudien im Modell einfacher verwirklichen lassen, denn die Abmessungen sowie die Vielfalt der Abwasserbecken im Originalmaßstab sind erheblich.

### 2 Modellsuspension zum Testen der Messmethoden

Die Modellsuspension soll auf der einen Seite die charakteristischen Eigenschaften des Originals wiedergeben, auf der anderen Seite aber auch für die einzusetzende Messtechnik erfassbar sein. Zum Testen der Messmethoden wird Wasser als Fluid und das kugelförmige Polymerpulver VESTOSINT® Typ 1111 der Degussa AG [8] als Feststoffpartikel verwendet.

Eine ideale vollständige Ähnlichkeit von Original und Modell lässt sich in diesem Fall nicht realisieren, daher ist eine Beschränkung auf die charakteristischen strömungstechnischen Größen und Vorgänge erforderlich. Das Abwasser als Suspension von Feststoffpartikel in einem Fluid wird über charakteristische Stoffgrößen, Abmessungen sowie Kräfte in einem strömungstechnischen System dargestellt. Das Fluid wird über seine charakteristischen Stoffgrößen Dichte  $\rho_W$  sowie Viskosität  $\nu_W$  beschrieben. In einem Abwasserbecken werden die Trägheitskräfte durch Beschleunigung des Fluides durch das Rührwerk hervorgerufen und sind für die Analyse der Ähnlichkeitskennzahlen von Bedeutung. Die Schwerkraft und die Reibungskräfte innerhalb des Fluides spielen bei diesen Betrachtungen eine untergeordnete Rolle. Um die Vielfalt der Partikelformen und -größen statistisch zu formulieren, wird eine charakteristische Verteilung des äquivalenten Partikeldurchmessers  $D_P$  zur geometrischen Beschreibung der Feststoffpartikel in der Suspension herangezogen. Die Feststoffpartikel besitzen eine charakteristische Dichte  $\rho_P$  sowie einen Masseanteil TS im Fluid. Die Dichte  $\rho_P$  der Polymerpartikel ist wie im Original etwas größer als die Dichte von Wasser  $\rho_W$ , so dass sich die Feststoffpartikel im ruhenden Fluid am Boden absetzen (vgl. Tab. 1). Die Trägheitskraft folgt aus den Beschleunigungen des Partikels im Fluid. Die Wechselwirkung zwischen Schwer- und Auftriebskraft beschreiben das Sink- bzw. Aufsteigverhalten des Partikels. In der Widerstandskraft sind unter anderem Form-, Druck- und Reibungswiderstand zusammengefasst. Aus dem Verhältnis von Trägheitskraft im Fluid und der um den Auftrieb reduzierten Schwerkraft des Feststoffpartikels ergibt sich mit der stationären Partikelsinkgeschwindigkeit  $w_S$  als charakteristische Geschwindigkeit die Partikel - Froudezahl  $Fr_P$ , welche auch das Kräftegleichgewicht zwischen Widerstandskraft und Schwerkraft an einem einzelnen Partikel widerspiegelt. Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  hängt im Allg. von der

**Tab. 1:** Vergleich der charakteristischen Eigenschaften von Abwasser- und Modellsuspension

	Abwasser [4]	Modell	Maßstab
<b>Fluid</b>	<b>Wasser</b>	<b>Wasser</b>	
Dichte $\rho_W / (\text{kg/m}^3)$	1000	1000	1:1
kinematische Viskosität $\nu_W / (\text{m}^2/\text{s})$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1:1
dynamische Viskosität $\mu_W / (\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}))$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	1:1
<b>Feststoffpartikel</b>	<b>Schlammflocken</b>	<b>VESTOSINT®</b>	
Dichte $\rho_P / (\text{kg/m}^3)$	1050...1100	1016	≈1:1
Durchmesser $D_P / \mu\text{m}$	0...50...200	0...25...100	1:2
Feststoffanteil TS / %	1	0,5	1:2

**Tab. 2:** Ähnlichkeitsbetrachtungen für die Modellsuspension Wasser – VESTOSINT® Typ 1111

	$D_{P,25\%}$	$D_{P,50\%}$	$D_{P,75\%}$	$D_{P,99\%}$
Durchmesser $D_P / \mu\text{m}$	77	92	109	167
Archimedeszahl $Ar$	$7,292 \cdot 10^{-2}$	$1,232 \cdot 10^{-1}$	$2,052 \cdot 10^{-1}$	$7,321 \cdot 10^{-1}$
Froudezahl $Fr_P$	$2,251 \cdot 10^{-4}$	$3,801 \cdot 10^{-4}$	$6,335 \cdot 10^{-4}$	$2,260 \cdot 10^{-3}$
Reynoldszahl $Re_P$	$4,051 \cdot 10^{-3}$	$6,843 \cdot 10^{-3}$	$1,140 \cdot 10^{-2}$	$4,067 \cdot 10^{-2}$
Sinkgeschwindigkeit $w_S / \text{m/s}$	$5,231 \cdot 10^{-5}$	$7,419 \cdot 10^{-5}$	$1,043 \cdot 10^{-4}$	$2,434 \cdot 10^{-4}$
Exponent $m$	4,6	4,6	4,6	4,6
Schwarmsinkgeschwindigkeit $w_{SS} / \text{m/s}$	$5,111 \cdot 10^{-5}$	$7,250 \cdot 10^{-5}$	$1,019 \cdot 10^{-4}$	$2,379 \cdot 10^{-4}$
Schubspannungsgeschwindigkeit $u_t / \text{m/s}$	$2,847 \cdot 10^{-3}$	$3,107 \cdot 10^{-3}$	$3,383 \cdot 10^{-3}$	$4,181 \cdot 10^{-3}$
Mindestsohlgeschwindigkeit <sup>1</sup> $u_\infty / \text{m/s}$	0,038	0,042	0,046	0,058

<sup>1</sup> bei einer freien Lauflänge  $L_L = 0,200$  m der Grenzschicht am Boden.

$$\text{Partikel - Froudezahl:} \quad Fr_P = \frac{\rho_W \cdot w_S^2}{g \cdot D_P \cdot (\rho_P - \rho_W)} = \frac{4}{3 \cdot c_w} \quad (1)$$

$$\text{Partikel - Reynoldszahl:} \quad Re_P = \frac{v_S \cdot D_P}{v_W} \quad (2)$$

$$\text{Archimedeszahl:} \quad Ar = \frac{Re_P^2}{Fr_P} = \frac{g \cdot D_P^3 \cdot (\rho_P - \rho_W)}{\rho_W \cdot v_W^2} \quad (3)$$

$$\text{mit } c_w = \begin{cases} \frac{24}{Re_P} & \text{für } 0 < Ar < 7 \\ 26,3 \cdot Re_P^{-0,8} & \text{für } 7 < Ar < 645 \end{cases}$$

$$\text{mittlere Partikelsinkgeschwindigkeit:} \quad w_S = \frac{g \cdot D_P^2 \cdot (\rho_P - \rho_W)}{18 \cdot \rho_W \cdot v_W} \quad (4)$$

$$\text{Partikelschwarmsinkgeschwindigkeit:} \quad w_{SS} = w_S \cdot (1 - TS)^m \quad (5)$$

$$\text{mit } m = \begin{cases} 4,6 & \text{für } Re_P < 0,6 \\ 4,45 \cdot Re_P^{-0,1} & \text{für } 0,6 < Re_P < 1100 \\ 2,3 & \text{für } Re_P > 1100 \end{cases}$$

$$\text{Mindestsohlgeschwindigkeit:} \quad u_\infty = \left( \frac{u_\tau \cdot L_L^{0,1}}{0,184 \cdot v_W^{0,1}} \right)^{\frac{10}{9}} \quad (6)$$

$$\text{Schubspannungsgeschwindigkeit:} \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g \cdot D_P \cdot \frac{\rho_P - \rho_W}{\rho_W}} \quad (7)$$

Partikel - Reynoldszahl  $Re_P$  sowie der Partikelform ab, die als solide Kugel mit einem äquivalenten Durchmesser  $D_P$  idealisiert wird. Aus dem Verhältnis des Quadrats der Reynoldszahl und der Froudezahl des Einzelpartikels ergibt sich die Archimedeszahl  $Ar$ , welche die dimensionslose Kennzahl für die Absetzvorgänge der Feststoffpartikel im Fluid darstellt. Höfken [4] gibt in Bezug auf Weiß et. al. [7] für Kugeln in Abhängigkeit von Bereichen der Archimedeszahl  $Ar$  funktionale Zusammenhänge zwischen dem Widerstandsbeiwert  $c_w$  und der Partikel - Reynoldszahl  $Re_P$  an. In den zu betrachtenden Suspensionen ist im Allg. die Archimedeszahl  $Ar < 7$ , d. h., auf einfache Weise können eine mittlere Partikelsinkgeschwindigkeit  $w_S$  und die oben aufgeführten dimensionslosen Kennzahlen bestimmt werden. Da eine Suspension aus einer Vielzahl von Einzelpartikeln besteht, die miteinander interagieren, ist für Suspensionsuntersuchungen auch die Partikelschwarmsinkgeschwindigkeit  $w_{SS}$  von Interesse. Damit ist eine Abschätzung möglich, wie sich die Eigenschaften der modellierten Suspension im Vergleich zum realen Abwasser verhalten. Die Beckengeometrie wird für notwendige Ähnlichkeitsbetrachtungen in abstrakter Form mittels der Lauflänge  $L_L$  der Grenzschicht am Beckenboden idealisiert [4]. Diese Lauflänge  $L_L$  der Grenzschicht ist von der Beckengeometrie sowie der Anordnung der Rührwerke abhängig. Ausgehend von der Grenzschichttheorie wird mit Hilfe der am Beckenboden auftretenden Wandschubspannungen sowie der an den Feststoffpartikeln angreifenden Kräften eine Mindestsohlgeschwindigkeit  $u_\infty$  bestimmt, die notwendig ist, damit sich keine Partikel am Boden absetzen (vgl. Tab. 2). Die erforderliche Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_\tau$  kann aus dem Gleichgewicht der wirkenden Schubspannungs- und Gewichtskraft ermittelt werden.

### 3 Versuchsbeschreibung

Auf Basis optischer Ganzfeldmessverfahren werden Messprinzipien zur objektiven Beschreibung des Suspensionszustandes in einem Modellbecken mittels der beiden etablierten Klassifikationskriterien „1s-Kriterium“ und „Schichthöhenkriterium“ vorgestellt.

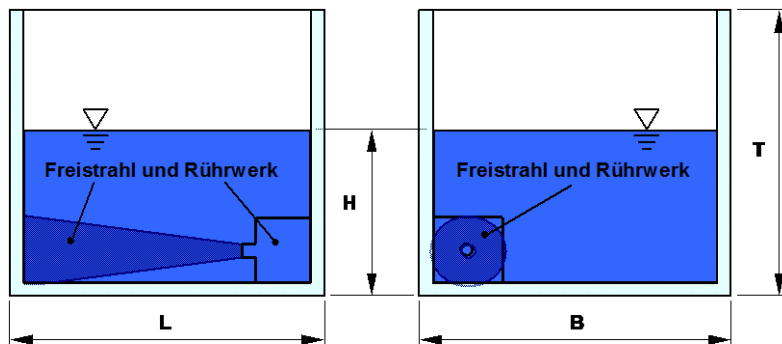
**Tab. 3:** Parameter des PIV/PLIF-Messsystems der Firma Dantec Dynamics

Laser	
Typ:	New Wave Solo PIV 120XT (Doppelpulslaser)
Lasermedium:	Nd:YAG
Wellenlänge:	532 nm
Pulslänge:	3-5 ns
Pulsenergie:	120 mJ ±4%
Strahldurchmesser:	5 mm
max. Repetitionsrate:	15 Hz
Kamera	
Typ:	2 x FlowSense 2M-CCD-Kameras
Bildgröße:	1600 x 1200 Pixel
Pixelgröße:	7,4 µm
Auflösung:	10 bit
max. Doppelbildrate:	15 Hz
Objektiv:	50 mm, 60 mm, 85 mm
Peripherie	
Verbindung System-Hub – PC:	Gbit LAN
System-Hub – LIFO-Speicher:	max. 32 GB
Spezifikation:	<ul style="list-style-type: none"> <li>↪ max. 5 Doppelbilder PIV/LIF bei 15 Hz bei voller Auflösung (limitiert durch LIFO-Speicher)</li> <li>↪ max. 1 Hz bei voller Auflösung ohne LIFO-Speicher (limitiert durch Datentransferrate)</li> </ul>

Zum Einsatz kommen Komponenten eines herkömmlichen PIV/PLIF-Messsystems der Firma Dantec Dynamics (vgl. Tab. 3), mit deren Hilfe sowohl die Messwerterfassung als auch die zugehörigen Bildauswertungen durchgeführt werden. Alle Testmessungen finden in einem oben offenen quaderförmigen Becken aus PMMA (Acrylglas) mit den Abmessungen  $L = 0,207$  m,  $B = 0,205$  m und  $T = 0,210$  m sowie einer Füllhöhe  $H = 0,118$  m statt. Als Rührwerk wird eine Tauchpumpe verwendet, deren Freistrahл horizontal an einer Seitenwand entlang verläuft (vgl. Abb. 1). Daraus wird eine freie Lauflänge  $L_L = 0,200$  m der Grenzschicht am Boden abgeschätzt. Die vom Rührwerk in das Fluidvolumen eingetragene Leistung ist mehr als ausreichend, um die Suspension in kurzer Zeit vollständig zu durchmischen. Daher wird für die Tests der beiden Messmethoden die Suspension mit dem Rührwerk vollständig gemischt, anschließend das Rührwerk abgeschaltet und das Absetzverhalten der Feststoffpartikel über einen längeren Zeitraum beobachtet sowie mittels beider Methoden messtechnisch erfasst.

#### 4 Messmethode für das 1s-Kriterium

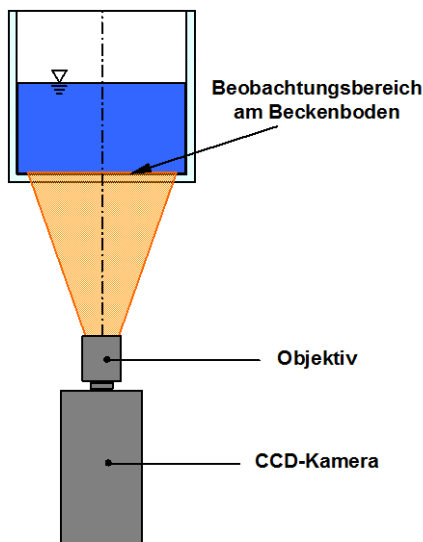
Die Messmethode für das 1s-Kriterium basiert auf der Aufnahme der Partikelbewegungen am Beckenboden mit einer Kamera und der anschließenden Auswertung der Partikelbilder nach dem Prinzip der Particle Image Velocimetry (PIV). Auf den Einsatz von Laserlicht zur Beleuchtung des Beckenbodens wird zunächst verzichtet. Für Testuntersuchungen zur Mess-



**Abb. 1:** Geometrie des Testbeckens mit Rührwerk (schematisch)

methode für das 1s-Kriterium wird das mit der Modellsuspension gefüllte Versuchsbecken so gehalten, dass der optische Zugang zum gesamten Beckenboden mit einer CCD-Kamera des PIV/PLIF-Messsystems gewährleistet ist (vgl. Abb. 2). Mit Hilfe des Messsystems und der Kamera wird ein Kalibrierbild aufgenommen, mit dem der beobachtbare Ausschnitt sowie der geometrische Maßstab des Bildes bestimmt werden können.

Mittels des Rührwerks wird die Suspension gut durchmischt und anschließend die Messwert-erfassung von 2000 Bildern des Beckenbodens bei einer Bildwiederholrate von 15 Hz gestartet. Die Partikelbewegungen am Beckenboden werden über einen Zeitraum von etwas mehr als anderthalb Minuten beobachtet. Unmittelbar nach Beginn der Messung wird das Rührwerk abgeschaltet und die abklingende Partikelbewegung am Boden mit der Kamera beobachtet und erfasst. Während etwa 90 s nach Abschalten des Rührwerks am Beckenboden kaum Partikelbewegungen visuell festgestellt werden können, gibt es im Fluidvolumen weiterhin sichtbare Bewegungen der Feststoffpartikel. Daraus lässt sich schließen, dass die Geschwindigkeiten am Beckenboden nicht mehr ausreichen, um die Partikel zu bewegen und sich somit die Feststoffpartikel am Boden abgesetzt haben. Damit wird die Messwert-erfassung beendet und zur Bildverarbeitung übergegangen.

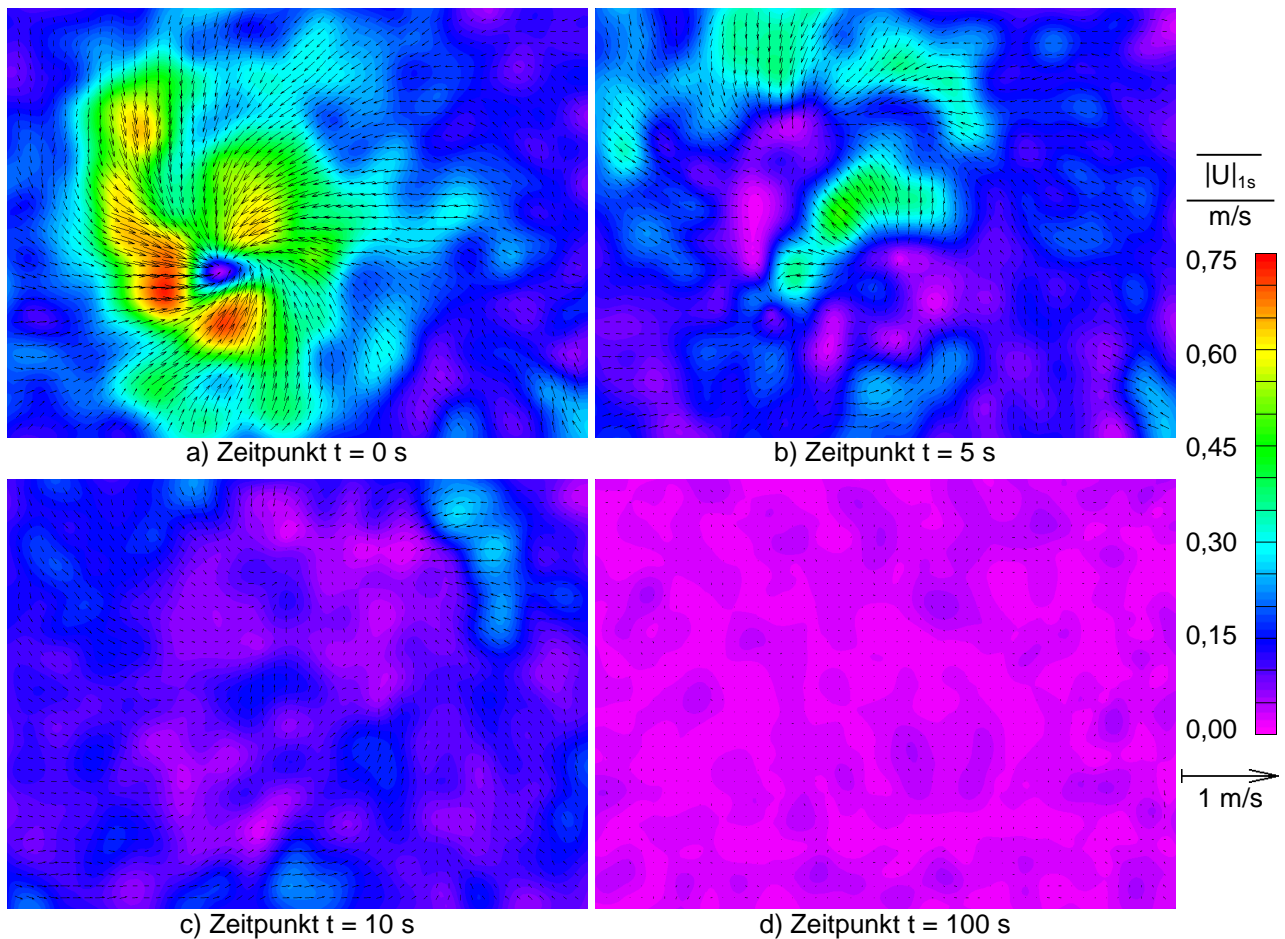


**Abb. 2:** Versuchsaufbau – 1s-Kriterium (schematisch)

Die einzelnen Rohbilder der CCD-Kamera werden für die Bildverarbeitung aufbereitet, da zum einen kameraspezifische als auch umgebungsbedingte Störungen in den Bildern auftreten, die zu minimieren sind. Im nächsten Schritt der Bildverarbeitung werden aus jeweils zwei Einzelaufnahmen ein Doppelbild generiert und auf die so entstandenen Doppelbilder der PIV-Algorithmus angewandt, um die Verschiebung  $\Delta s$  der Partikel in einzelnen Ausschnitten der beiden Bildern mit Hilfe der Kreuzkorrelation zu bestimmen. Über den zeitlichen Abstand  $\Delta t$  der beiden Aufnahmen werden das ebene, zweikomponentige Geschwindigkeitsfeld  $\vec{U}(x,y,t_i)$  der Partikel am Beckenboden zu jedem aufgenommenen Zeitpunkt  $t_i$

berechnet. Nachfolgend werden die einzelnen Geschwindigkeitsfelder  $\vec{U}(x,y,t_i)$  gleitend über eine Sekunde zeitlich gemittelt und der zugehörige Absolutbetrag des Geschwindigkeitsvektors  $|U|_{1s}$  in der Beobachtungsebene an den entsprechenden Zeitpunkten analysiert. Auf diese Weise können Gebiete des beobachteten Ausschnittes festgestellt werden, in denen die Geschwindigkeit  $|U|_{1s}$  unter die erforderliche Mindestsohlgeschwindigkeit  $u_\infty$  sinkt. In diesen Depositionsgebieten ist davon auszugehen, dass sich die Feststoffpartikel im Zeitrahmen von einer Sekunde nicht bewegt haben (vgl. Abb. 3, violette Regionen). Mit Hilfe weiterer Auswertverfahren kann die Lage und Fläche dieser Depositionsgebiete quantitativ bestimmt sowie deren Variation über die gesamte Beobachtungszeitspanne analysiert werden.

Ein Zeitpunkt unmittelbar nach Abschalten des Rührwerks ist in Abb. 3a dargestellt. Deutlich ist hier die vom Rührwerk induzierte Strömungsstruktur am Beckenboden zu erkennen, die sich mit den visuellen Beobachtungen deckt. Im Zentrum des Wirbels am Boden gibt es ein Depositionsgebiet, in dem die Feststoffpartikel mit großer Wahrscheinlichkeit ungefähr eine Sekunde liegen geblieben sind. Bei weiterer Betrachtung dieses Depositionsgebietes ist



**Abb. 3:** Messergebnisse – Partikelgeschwindigkeiten am Beckenboden

■ Mindestsohlgeschwindigkeit  $u_{\infty} = 0,058$  m/s (vgl. Tab. 3)

festzustellen, dass sich die Lage und Größe dieses Gebietes mit der Zeit verändern<sup>1</sup>. Nach Abschalten des Rührwerks nehmen im Fluidvolumen die Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf ab und somit werden die Partikelbewegungen am Beckenboden langsamer. Damit wird in mehreren Bereichen des Beckenbodens die erforderliche Mindestsohlgeschwindigkeit  $u_{\infty}$  unterschritten (vgl. Abb. 3b, 3c) und es treten an diesen Stellen Depositionsgebiete hervor, die mit der Zeit zusätzlich an Größe zunehmen. Nach einer gewissen Zeit (ca. 90 s) kommt die Partikelbewegung am Boden vollständig zum Erliegen, so dass sich die Feststoffpartikel absetzen – im Bildausschnitt kann der gesamte Beckenboden als ein zusammenhängendes Depositionsgebiet betrachtet werden (vgl. Abb. 3d).

Mit dem oben dargestellten Messprinzip können am Beckenboden mögliche Bereiche qualitativ und quantitativ nach Lage und Größe bestimmt werden, in denen sich Feststoffpartikel einer Suspension länger als eine Sekunde ablagern. Das eingesetzte kommerzielle PIV/PLIF-Messsystem ist für diese Messmethode anwendbar. Die für die Particle Image Velocimetry gültigen Richtlinien sind zu beachten. Das gilt insbesondere auf die Qualität der Partikelbilder, auf denen die einzelnen Partikel voneinander unterscheidbar sein müssen. Somit steht der beobachtbare Ausschnitt des Beckenbodens in Abhängigkeit von der Auflösung der Kamera, den verwendeten Objektiven sowie der Durchmesser  $D_p$  der Feststoffpartikel in der Suspension. Weiterhin ist der Zeitabstand  $\Delta t$  der aufeinanderfolgenden Partikelbilder bzw. die Größe des Abtastrasters in Abhängigkeit der zu

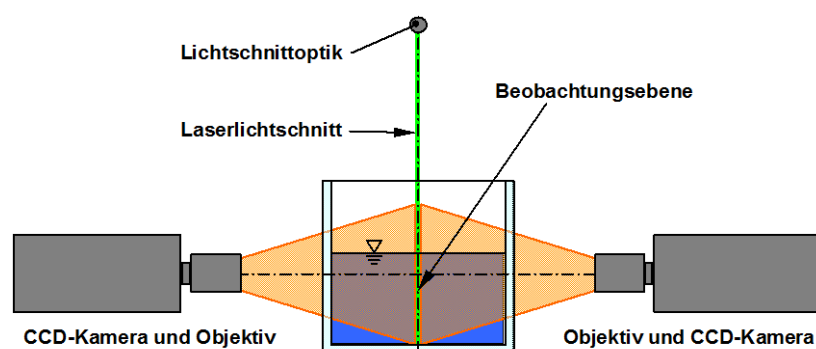
<sup>1</sup> Es kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Gebiet die Depositionszeit der Partikel nicht länger als eine Sekunde beträgt bzw. bei Mittelung über einen längeren Zeitraum als eine Sekunde Geschwindigkeiten oberhalb der erforderlichen Mindestsohlgeschwindigkeit  $u_{\infty}$  auftreten.

erwartenden Geschwindigkeiten so zu wählen, dass die Partikel auf beiden Bildern innerhalb des entsprechenden Abtastbereiches bleiben. Eine flächig und zeitlich gleichmäßige Beleuchtung des Beckenbodens ist entsprechend der Kameraempfindlichkeit sowie der Blendeneinstellung am Objektiv umzusetzen. Der Einsatz eines Laserlichtschnittes, wie in der klassischen Particle Image Velocimetry, ist schlecht möglich, da die Eindringtiefe eines parallel zum Beckenboden verlaufenden Lichtschnittes auf Grund der starken Streuung an den Feststoffpartikel der Suspension gering ist. Geeignet ist ein Verfahren der konfokalen Beleuchtung des Beckenbodens, wie es in der Mikroskopie Anwendung findet.

## 5 Messmethode für das Schichthöhenkriterium

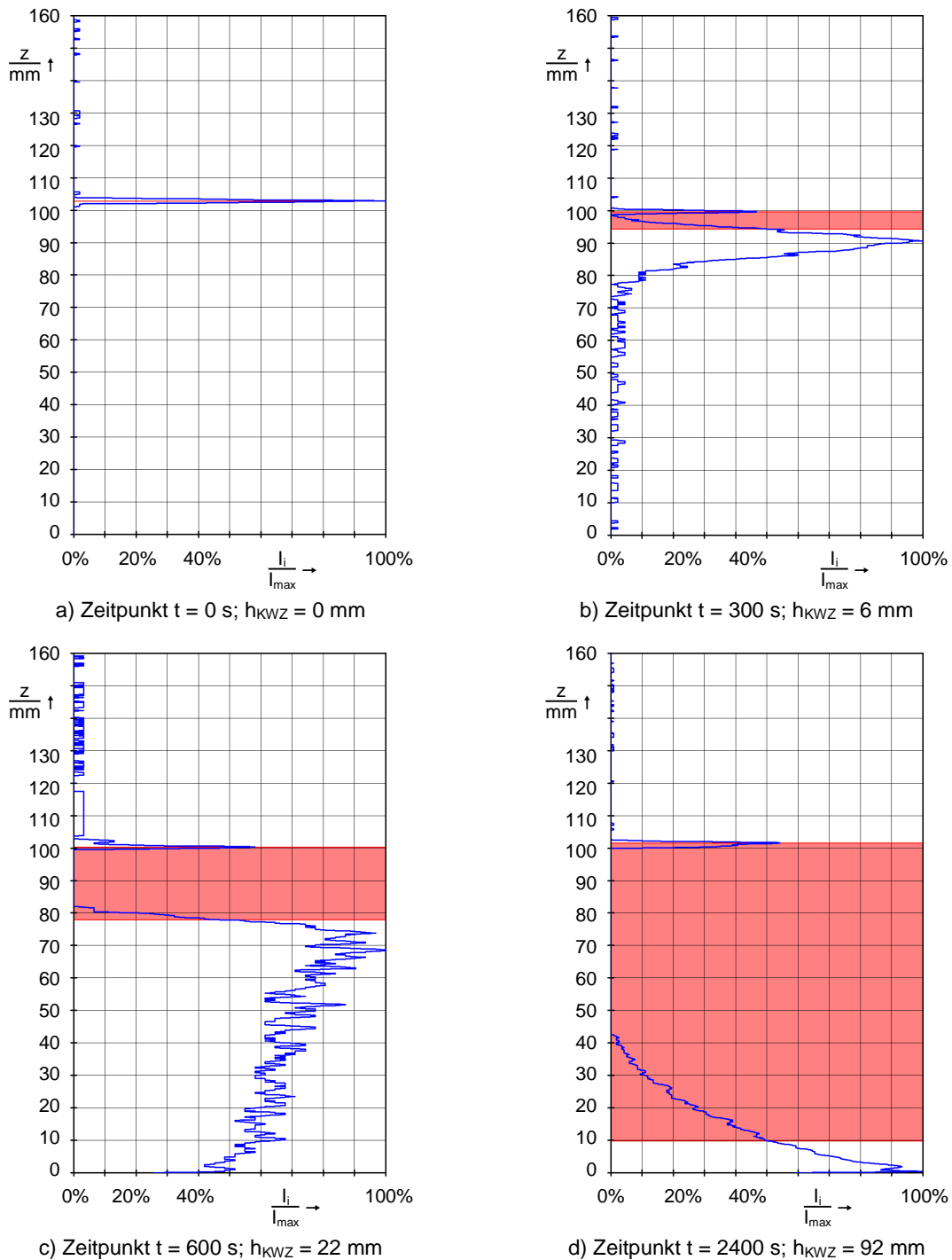
Die Messmethode für das Schichthöhenkriterium basiert auf der Erfassung eines Laserlichtschnittes innerhalb eines Fluidvolumens mittels zweier CCD-Kameras. Die Addition beider Kamerabilder während der Bildverarbeitung liefert eine ortsunabhängige, gute Qualität der Messergebnisse. Das Licht wird dabei an der freien Fluidoberfläche sowie an den Feststoffpartikeln der Suspension gestreut. Dieser Effekt wird ausgenutzt, um eine Klarwasserzone im oberen Bereich der Suspension zu detektieren, da im Bereich der Klarwasserzone die Streulichtintensität deutlich kleiner ist als im übrigen Fluidvolumen. Die Auswertung der Streulichtintensitätsbilder erfolgt nach dem Prinzip der Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF).

Für die Testuntersuchungen zur Messmethode für das Schichthöhenkriterium wird das mit der Modellsuspension gefüllte Versuchsbecken so aufgebaut, dass der optische Zugang zum Fluidvolumen von oben mit einem Laserlichtschnitt sowie seitlich mit zwei CCD-Kameras gewährleistet ist (vgl. Abb. 4). Vor die Objektive der Kameras sind optische Filter montiert, die nur bei der Wellenlänge des verwendeten Laserlichts durchlässig sind, um ausschließlich das Streulicht des Lichtschnittes zu detektieren. Mit Hilfe des Messsystems und der Kamera werden Kalibrierbilder aufgenommen, mit denen der beobachtbare Ausschnitt sowie der geometrische Maßstab der Bilder bestimmt werden können. Die Suspension wird mit dem Rührwerk gut durchmischt, anschließend das Rührwerk abgeschaltet und die Messwert-erfassung von 2000 Bildern des in das Fluidvolumen eindringenden Laserlichtschnittes bei einer Bildwiederholrate von 1,6 Hz gestartet. Das Absetzverhalten der Feststoffpartikel der Suspension wird über einen Zeitraum von ungefähr zwanzig Minuten mit zwei CCD-Kameras beobachtet. Eine nachfolgende Messreihe deckt weitere Entwicklung der Klarwasserzone bis zu fünfzig Minuten nach Abschalten des Rührwerks ab. Danach haben sich die Feststoffpartikel fast vollständig am Beckenboden abgesetzt. Damit wurde die Messwert-erfassung beendet und zur Bildverarbeitung übergegangen.



**Abb. 4:** Versuchsaufbau Schichthöhenkriterium (schematisch)

Die einzelnen Rohbilder der CCD-Kameras werden für die Bildverarbeitung aufbereitet. Der Grauwert der einzelnen Bildpunkte auf den Lichtschnittaufnahmen entspricht der zugehörigen Streulichtintensität  $I_i$  zum Beobachtungszeitpunkt  $t_i$ , wobei hohe Grauwerte einer großen Intensität und geringe Grauwerte einer kleinen Intensität zugeordnet werden. Für die Detektion der Klarwasserzone kann in Richtung der Höhenkoordinate  $z$  jede einzelne senkrechte Bildpunktreihe bzw. ein integraler Wert über mehrere vertikale Bildpunktzeilen ausgewertet und als Profil der Streulichtintensität  $I_i$  über die Koordinate  $z$  aufgetragen werden (vgl. Abb. 5). Die lokalen Maxima der Streulichtintensität  $I_i$  geben zum einen die Lage der freien Fluidoberfläche bei  $z = 100$  mm an, zum anderen das untere Ende der Klarwasser-



**Abb. 5:** Messergebnisse – Detektion der Klarwasserzone  
freie Fluidoberfläche bei  $z = 100$  mm; ■ Bereich der Klarwasserzone



zone. Für die Bestimmung der Dicke  $h_{KWZ}$  der Klarwasserzone wird der Abstand zwischen dem Streulichtmaximum der Fluidoberfläche und dem halben Wert des Streulichtmaximum auf dessen Flanke am unteren Klarwasserzonenende herangezogen. Die dargestellten Ergebnisse decken sich mit den visuellen Beobachtungen während des Versuches.

Ein Zeitpunkt unmittelbar nach Abschalten des Rührwerks ist in Abb. 5a dargestellt. Die Suspension ist vollständig durchmischt und es existiert keine Klarwasserzone. Die durch das Rührwerk induzierte Wellenbewegung im Becken verschiebt die freie Fluidoberfläche am Beobachtungsort leicht nach oben. Die Streuung an der Oberfläche der Suspension ist so groß, dass der Lichtschnitt nicht in das Fluidvolumen eindringen kann. Mit der Zeit werden nach Abschalten des Rührwerks die Geschwindigkeiten im Fluidvolumen kleiner und die Feststoffpartikel der Suspension setzen sich am Beckenboden ab. Dabei entsteht im oberen Bereich des Fluidvolumens eine Klarwasserzone, in der kaum Partikel vorhanden sind, an denen der Lichtschnitt gestreut wird (vgl. Abb. 5b, 5c). Somit ist die Streulichtintensität in diesem Bereich gering und steigt in der angrenzenden Suspension aufgrund einer höheren Partikeldichte stark an. Nachdem sich alle Feststoffpartikel fast vollständig am Boden abgesetzt haben, ist dort das untere Maximum der Streulichtintensität zu finden. Der Laserlichtschnitt wird am Beckenboden sowie der darüber liegenden Partikelschicht reflektiert und verstärkt somit die Intensität des Streulichtes der wenigen darüber befindlichen Feststoffpartikel der Suspension (vgl. Abb. 5d).

Mit dem beschriebenen Messprinzip kann die Dicke der Klarwasserzone einer Suspension qualitativ und quantitativ bestimmt und somit ein Schichthöhenkriterium definiert werden. Das eingesetzte kommerzielle PIV/PLIF-Messsystem ist für diese Messmethode anwendbar. Da vorrangig die Maxima der Streulichtintensität betrachtet werden, bestimmen die Kameraauflösungen und die verwendeten Objektive die räumliche Auflösung im betrachteten Bereich des Laserlichtschnitts<sup>2</sup>.

#### **Hinweis auf Zuwendungsgeber:**

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Projekt „Prinzip einer Suspensionsmessmethode für Mischversuche“ wird mit Mitteln der WILO AG gefördert.

#### **Literatur**

- [1] Albring, W.: Angewandte Strömungsmechanik; Akademie-Verlag, Berlin, 1990.
- [2] Delgado, A.: Eigenschaften von medizinischen und biotechnologischen Fluiden, Wechselwirkungen zwischen Strömungen und Biomaterie; Kursunterlagen, Kurzlehrgang Medizinische und Biotechnologische Strömungen 25.–27. Sept. 2007, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2007.
- [3] Eck, B.: Technische Strömungslehre; Bd. 1, Bd. 2; Springer-Verlag, Berlin, 1988/1991.
- [4] Höfken, M.: Die Bedeutung der Rührtechnik in der Abwasserreinigung; LSTM-Seminar 23./24. Juni 1993, Sulzbach-Rosenberg, Oberpfalz, Deutschland, 1993.
- [5] Schlichting, H.; Gersten, K.: Grenzschicht-Theorie; Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [6] Truckenbrodt, E.: Fluidmechanik; Bd. 1, Bd. 2; Springer-Verlag, Berlin, 1989/1992.
- [7] Weiß, S.; et. al.: Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden, Teil 4: Stoffvereinigungen in fluiden Phasen; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1988.
- [8] Degussa AG: Produktinformationen VESTOSINT®

---

<sup>2</sup> Wird die Auflösung der Lichtschnittaufnahmen so gewählt, dass einzelne Partikel in den Bildern unterscheidbar sind, kann unter Beachtung der für die Particle Image Velocimetry gültigen Richtlinien auch das Geschwindigkeitsfeld im Streulichtbereich des Lichtschnitts bestimmt werden.