

Geschwindigkeitsmessungen mit Particle-Image-Velocimetry: Labor- und Feldmessungen

DR. VOLKER WEITBRECHT, INSTITUT FÜR HYDROMECHANIK, UNIVERSITÄT KARLSRUHE

DR. MARIAN MUSTE, IOWA INSTITUTE OF HYDRAULIC RESEARCH, UNIVERSITY OF IOWA

DR. JEAN-DOMINIQUE CREUTIN, LABORATOIRE D'ÉTUDES DES TRANSERTS EN HYDROLOGIE ET ENVIRONNEMENT,
UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

PROF. GERHARD H. JIRKA, PH. D., INSTITUT FÜR HYDROMECHANIK, UNIVERSITÄT KARLSRUHE

Kurzfassung

Zur berührungslosen Erfassung von Geschwindigkeitsfeldern werden vermehrt Methoden eingesetzt, die auf der Auswertung optisch erfasster Partikelgruppen bzw. Intensitätsmuster in Strömungen beruhen und unter dem Namen Particle-Image-Velocimetry (PIV) zusammengefasst werden. Unter dem Einsatz von Laserlichtschnitten können Messungen im Wasserkörper durchgeführt werden, während Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche mit konventioneller Beleuchtung erfasst werden können, die in vielen Fällen von Flachwasserströmungen eine Analyse der Strömungssituation erlauben. An zwei Beispielen aus Labormessungen zur Untersuchung von Buhnen- bzw. Zylinderumströmungen werden die Möglichkeiten von Oberflächen-PIV vorgestellt. Zur Anwendung im Feld werden PIV-Messungen gezeigt, bei denen die Oberflächengeschwindigkeit an einem Fluss durch einfache Videoaufzeichnung erfasst wurde, ohne die Verwendung zusätzlicher Tracermaterials an der Wasseroberfläche.

1 Einleitung

Die rasante Entwicklung auf den Gebieten der Optik, Videotechnik, Lasertechnik, Elektronik und Computertechnik führte in den letzten drei Jahrzehnten zu einer neuen Generation videobasierter Messtechnik, die unter der Bezeichnung Particle-Image-Velocimetry (PIV) zur berührungslosen Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern eingesetzt wird [Adrian 1991, Prasad 2000]. Als logische Konsequenz dieser Entwicklung in Verbindung mit der Vielzahl an strömungsmechanischen Fragestellungen wurden in den letzten Jahren diverse Varianten von PIV-Systemen als Komplettsystem für spezielle Fragestellungen auf den Markt gebracht.

Im Gegensatz zur Particle-Tracking-Velocimetry, bei der einzelne Partikel verfolgt und ausgewertet werden, liegt die Grundidee der PIV-Technik in der Auswertung optisch erfasster Partikelgruppen bzw. Intensitätsmuster, die durch eine Strömung bewegt werden. Der zurückgelegte Weg dieser Partikelgruppen bzw. Intensitätsmuster innerhalb einer bekannten Zeit wird dann hinsichtlich der Geschwindigkeit ausgewertet. Die PIV-Technik bietet damit die Möglichkeit, herkömmliche Methoden zur qualitativen Strömungssichtbarmachung effektiv zur quantitativen Beschreibung einer Strömungssituation zu verwenden.

Anders als herkömmliche Instrumente, die Geschwindigkeitsmessungen an einem Punkt oder entlang einer Linie (Profiler) aufnehmen können, liefert ein PIV-System instantane flächenhafte Vektorfelder, die einen Bereich von wenigen mm² bis zu mehreren km² abdecken können. Die hohe räumliche Auflösung der Vektorfelder erlaubt neben der Erfassung der Geschwindigkeiten auch die direkte Visualisierung und Interpretation einer Strömung hinsichtlich der Strömungsmuster (z. B. Wirbelgrößen), die normalerweise durch eine Analyse der punktuell gemessenen Zeitreihe zurückgerechnet werden müssen. Damit wird PIV auch zu einer idealen Ergänzung bzw. Validierung zwei- bzw. dreidimensionaler numerischer Simulationen. Der Einsatz stereoskopischer Systeme unter Verwendung mehrerer Kameras erlaubt für manche Anwendungen auch die Auswertung der Geschwindigkeitskomponenten in der dritten Raumrichtung, sodass ein quasi-dreidimensionales Messverfahren zur Verfügung steht [Lin und Rockwell 1997]. Im Weiteren wird in diesem Artikel ausschließlich auf zweidimensionales PIV eingegangen.

Anwendung findet die PIV-Technik in einer Vielzahl von Fragestellungen der Strömungsmechanik [Adrian 1991], [Grant 2000], wobei sich die Ausdehnung der untersuchten Messfelder sowie die untersuchten Geschwindigkeiten um mehrere Größenordnungen unterscheiden können. Der Einsatz von PIV ist jedoch nicht auf Fluidbewegungen beschränkt. In einer Studie von [Nübel und Weitbrecht 2002], wurde PIV eingesetzt, um in einem Laborversuch erzeugte Scherfugen in granularem Material zu lokalisieren. Die ursprüngliche PIV-Technik zur Geschwindigkeitsmessung im Wasserkörper bedient sich der Möglichkeiten eines doppelgepulsten Laserlichtschnittes zur Visualisierung von Partikeln und zur Definition der Messebene. In diesem Fall werden bei der Verwendung von typischen PIV-Lasern Messfenster bis zu einer maximalen Ausdehnung von ca. 20 x 20 cm² erreicht. Typische Anwendungen sind technische turbulente Strömungen aus den Bereichen des Maschinenbaus oder der Verfahrenstechnik (z. B. Verbrennungsvorgänge in Motoren), die Anwendung in Modellstudien des wasserbaulichen Versuchswesens (z. B. Schützunterströmung, [Lausen und Weitbrecht 1999]) sowie in vielen Bereichen der Grundlagenforschung zu turbulenten Strömungen. In grundlegenden Untersuchungen zur Wirbeldynamik setzten beispielsweise [Lin und Rockwell 1997] ein 3-D PIV System ein,

während [Herlina und Jirka 2004] 2-D PIV in einem 16 cm² Messfeld direkt an der Wasseroberfläche in einem Turbulenztank zur Untersuchung des Gasaustauschs einsetzen.

Eine weitere wesentliche Anwendung der PIV-Technik findet sich in der Beschreibung von Gerinneströmungen durch die Auswertung der Oberflächengeschwindigkeiten. Eine Interpretation der Oberflächengeschwindigkeiten hinsichtlich des gesamten Strömungsgeschehens ist im Fall von Flachwasserströmungen [Jirka und Uijtewaal 2004] wegen deren stark zweidimensionalen Charakters oftmals möglich ([Weitbrecht et al. 2002]). Auf Grund der einzuhaltenden Modellgesetze zur Reproduktion der maßgeblichen Strömungsphänomene werden in diesem Fall oftmals Messfelder in der Größenordnung von mehreren m² notwendig. Die Messebene ist dabei durch die Wasseroberfläche gegeben, die mit schwimmenden Tracerteilchen beaufschlagt wird. Zur Beleuchtung werden meistens kontinuierliche Lichtquellen verwendet. Diese Art der Messungen sind in der Literatur unter dem Namen Oberflächen-PIV oder Large-Scale-PIV (LSPIV) zu finden ([Fujita et al. 1998], [Weitbrecht et al. 2002], [Meselhe et al. 2004]). In Abschnitt 3 werden Messungen zur Charakterisierung der Umströmung zylindrischer Hindernisse bzw. Buhnenströmungen in Flachwasserströmungen dargestellt.

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt bei PIV-Messungen sind oftmals die zu erfüllenden Sicherheitsauflagen bei der Verwendung der extrem leistungsstarken PIV-Laser [Lausen und Weitbrecht 1999]. Im Fall der Oberflächen-PIV Messungen bzw. LSPIV-Messungen erfolgt die Beleuchtung der Messfläche über natürliches Tageslicht oder konventionelle Strahler, wodurch das Sicherheitsproblem in den Wasserbaulabors entfällt.

2 PIV-Grundlagen

Unter dem Oberbegriff PIV können sehr verschieden zusammengestellte Systeme bzw. verschiedenartige Bildaufnahmetechniken zusammengefasst werden. Eine gute Übersicht dazu liefern die Übersichtsartikel von [Adrian 1991] bzw. [Prasad 2000], das Buch von [Raffel et al. 1998], bzw. das Sonderheft aus „Measurements Science and Technology“ von [Kompenhans und Tropea 1997].

Die PIV-Technik basiert auf der Auswertung optisch erfasster Partikel bzw. Intensitätsmuster, die durch eine Strömung bewegt werden. Der zurückgelegte Weg dieser Partikel bzw. Intensitätsmuster innerhalb einer bekannten Zeit wird dann hinsichtlich der Geschwindigkeit ausgewertet. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal verschiedener PIV-Systeme liegt in der Verwendung der Autokorrelations- bzw. Kreuzkorrelations-technik. Im ersten Fall werden die Geschwindigkeits-

vektoren aus einer doppelbelichteten Einzelaufnahme ermittelt, während im Fall der Kreuzkorrelationstechnik die Verschiebung der Partikel aus zwei zeitlich aufeinander folgenden Bildern berechnet wird. Da im Fall der Autokorrelationstechnik zwar die Richtung bzw. der Betrag der Geschwindigkeiten, nicht jedoch das Vorzeichen erfasst werden kann und inzwischen die Kamerageschwindigkeit meist keinen limitierenden Faktor mehr darstellt, wird fast ausschließlich die Kreuzkorrelationstechnik angewendet, welche die Grundlage für die weiteren Ausführungen darstellt.

2.1 Elemente eines PIV-Systems

Wie in Bild 1 zu erkennen ist, besteht ein PIV-System aus den folgenden vier wesentlichen Komponenten: zu detektierende Partikel, Beleuchtungseinheit, Aufnahmeeinheit und Auswerteeinheit [Raffel et al. 1998], wobei sich die einzelnen Komponenten je nach Anwendung deutlich unterscheiden können. Hersteller, die Komplettsysteme für PIV im Wasserkörper bzw. Oberflächen-PIV anbieten, sind beispielsweise: LaVision, ILA, Polytec, TSI, Oxford Lasers und Optical Flow Systems.

2.1.1 Partikel

Um die Strömung für die Aufnahmeeinheit sichtbar zu machen, müssen der Strömung für die meisten Anwendungen Tracermaterialien, meist in Form runder Partikel, zugesetzt werden. Je nach Anwendung, in Abhängigkeit der Fluideigenschaften (Dichte), der Größe des Beobachtungsfeldes, der benötigten räumliche Auflösung, Art der PIV-Messung (LSPIV oder PIV im Wasserkörper), stellen sich andere Anforderungen an die Beschaffenheit der zu verwendenden Partikel. Ausführlich werden das Reflektionsverhalten, das Strömungsfolgevermögen, die benötigten Partikelgrößen, Partikeldichte und Partikelanzahl in Melling 1997 diskutiert. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass ein einzelner Vektor aus einem gesamten Vektorfeld typischerweise für ein Feld von 32 x 32 Pixeln des Kamerachips steht. In diesem Feld, das in der Literatur als ‚Interrogation-Area‘ beschrieben ist, sollten zur Berechnung des Vektors mindestens drei Tracerpartikel in zwei aufeinander folgenden Bildern abgebildet sein. Ein optimaler Wert für die Partikeldichte wird in der Literatur mit sechs Partikeln pro Interrogation Area angegeben [Raffel et al. 1998]. Aus dieser Überlegung ergeben sich für ein Messfeld, das mit einer 1024 x 1024 Pixel Kamera aufgenommen wurde und in 32 x 32 Pixel große ‚Interrogation Areas‘ aufgeteilt wurde, eine Mindestanzahl von 3300 gleichverteilten Partikeln in der Messebene. Die Größe der einzelnen Partikel hängt von der Größe des Messfeldes, der zur Verfügung stehenden Kameraauflösung und der benötigten räumlichen Auflösung ab. Zum Erreichen größtmöglicher Genauigkeit muss ein Partikel auf mindestens vier Pixeln des Kamerachips abgebildet sein. Kann dieses Kriterium nicht erreicht

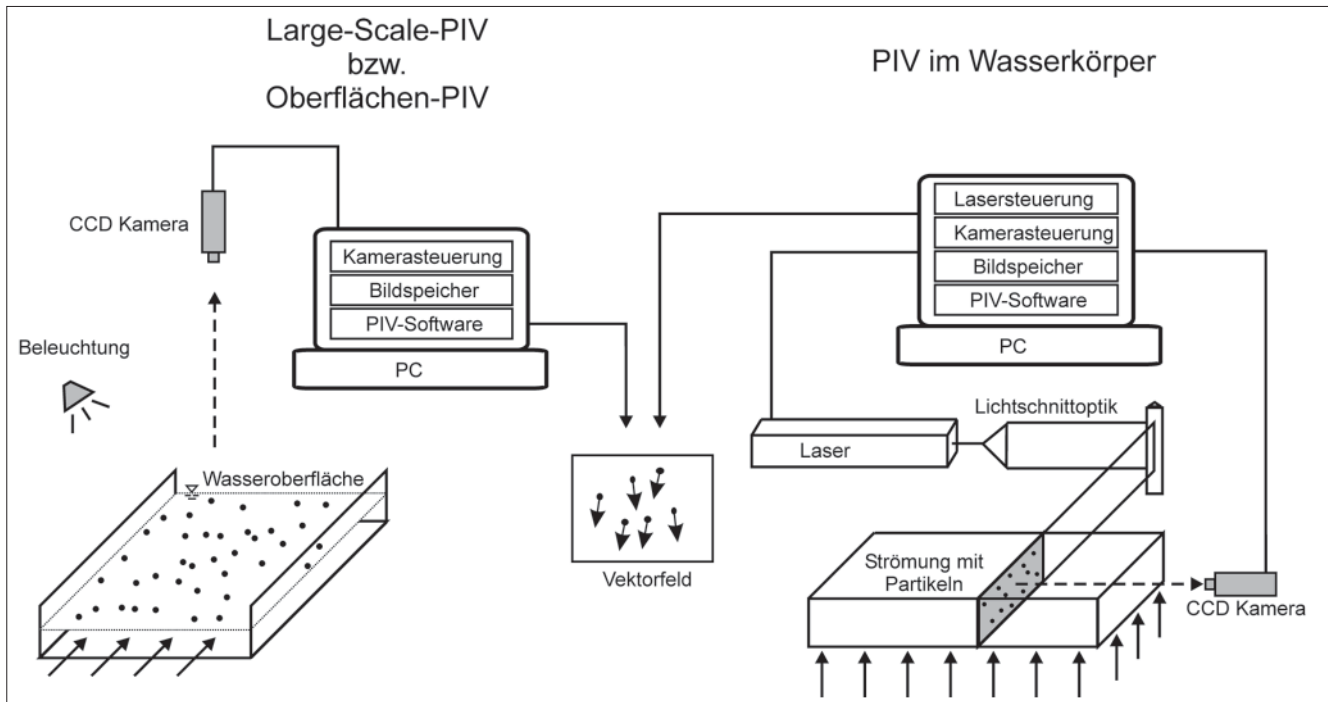


Bild 1: Schematische Darstellung der verschiedenen Komponenten am Beispiel eines Oberflächen-PIV- bzw. Large-Scale-PIV-Systems und eines PIV-Systems für Messungen im Wasserkörper

werden, und ein Partikel wird nur auf einem Pixel abgebildet, kommt es zum sogenannten ‚Peak-Locking-Effekt‘ [Raffel et al. 1998], der dazu führt, dass die berechnete Verschiebung eines Pixels zwischen zwei Bildern nur im Bereich von ganzzahligen Verschiebungsgrößen bestimmt werden kann. Die Möglichkeit, eine Genauigkeit der Verschiebungsgröße im Bereich von zehntel Pixeln zu erzielen, geht damit verloren. Andererseits muss die Größe der Partikel so gewählt werden, dass sie letztendlich wesentlich kleiner sind als die minimale aufzulösende Strömungsstruktur.

Für konventionelle PIV-Anwendungen unter Einsatz von Laserlichtschnitt werden typischerweise luftgefüllte Glaskugeln verwendet, die ein sehr gutes Reflektionsverhalten besitzen und mit verschiedener Dichte und Größe hergestellt werden können. Typische Größen liegen im Bereich von 20 – 200 μm . Problematisch sind hierbei oftmals Auftriebseffekte durch kleine Dichteunterschiede, die im Fall geringer Turbulenz dazu führen, dass sich im Verlauf eines Versuchs Partikel an der Wasseroberfläche bzw. an der Sohle absetzen. Ein Abscheiden besonders leichter bzw. schwerer Partikel im Vorfeld eines Versuchs kann zu einer Verbesserung der Situation führen.

Für LSPIV an der Wasseroberfläche sind je nach Größe des Messfeldes viele verschiedenartige Partikel denkbar. Wichtig dabei ist zunächst, dass diese schwimmenden Partikel einen guten Kontrast zum Bildhintergrund besitzen. Schwarze Partikel auf weißem Hintergrund haben sich dabei bewährt. Gute Ergebnisse lassen sich auch mit fluoreszierenden Partikeln und einer Ausleuchtung des Messfeldes mit UV-Licht erzeugen.

Eine Zusammenstellung verschiedener Tracerpartikel und deren Vorteile und Nachteile für Oberflächen-PIV liefern Weitbrecht et al. 2002. Problematisch ist bei den meisten Partikeln die Tendenz, an der Wasseroberfläche größere Konglomerate zu bilden. Als besonders vorteilhaft erwiesen sich in dieser Studie Polypropylen Partikel mit einem Durchmesser von 2 – 3 mm, die in schwarzer Farbe in der benötigten Menge leicht zu erhalten sind.

2.1.2 Beleuchtungseinheit

Im Fall von konventionellem PIV werden meist Doppelpuls-laser verwendet, deren Strahlen mit Hilfe eines Linsensystems zu einem Lichtschnitt aufgespreizt werden. Der typische PIV-Laser ist ein 25 – 50 mJ Nd:Yag Laser, der aus zwei Laserröhren aufgebaut wird, um zwei Lichtschnitte innerhalb sehr kurzer Zeit zu erzeugen (Continuum, LOT-Oriel, Quantel, New Wave, Laser 2000, Excel Technologies). Dabei ist zu beachten, dass die Steuerung eines solchen Lasers hohe Anforderungen an die zeitliche Präzision der Triggerimpulse zur Auslösung der Blitzlampen bzw. der Q-Switche stellt, die dann auch mit der Auslösung der verwendeten Kamera synchronisiert werden müssen.

Bei der Verwendung von Oberflächen PIV kann in der Regel mit kontinuierlicher Beleuchtung gearbeitet werden, da das Verhältnis zwischen Größe des Messfensters und mittlerer Geschwindigkeit typischerweise größer ist als bei Messungen im Wasserkörper und deswegen die Anforderungen an die zeitliche Auflösung weniger kritisch sind. Eine helle gleichmäßige Ausleuchtung kann bereits mit einfachen Strahlern

erzielt werden. Zur Erfassung zeitlich kritischer Strömungen können mit der Kamera synchronisierte Stroboskopleuchten oder Hochgeschwindigkeitskameras eingesetzt werden.

2.1.3 Aufnahmeeinheit

Die Aufnahmeeinheit besteht im Wesentlichen aus einer steuerbaren CCD-Kamera. Von Vorteil sind Kameras mit variabler räumlicher und zeitlicher Auflösung. Für einfache Anwendungen können Standard Videokameras eingesetzt werden, während für spezielle Anforderungen an zeitliche und räumliche Auflösung auf hochwertige PIV-Kameras zurückgegriffen werden muss. Eine spezielle PIV-Kamera zeichnet sich dadurch aus, dass sie in der Lage ist, zwei Bilder sehr schnell hintereinander auf einen speziell dafür entwickelten Chip zu speichern. Eine typische PIV-Kamera erzeugt in diesem Modus 4 – 15 Doppelbilder pro Sekunde bei einer räumlichen Auflösung von ca. 1000 x 1000 Pixeln. Zur Reduktion der anfallenden Datenmenge sind in den meisten Fällen Schwarz-Weiß-Kameras mit 8-Bit Farbtiefe ausreichend. Die Synchronisation der Kamera mit der Beleuchtungseinheit erfolgt über eine Triggereinheit, die als Timing Board im PC enthalten sein kann. Die Speicherung der Bilder kann über eine Vielzahl von Varianten erfolgen. Klassische Frame-Grabber zur Aufnahme und Weitergabe der Bildinformation an den Hauptspeicher werden mehr und mehr durch FireWire Kameras abgelöst, deren Information direkt auf die Festplatte geschrieben wird. Für schnelle hochauflösende Kameras ist jedoch der Weg über einen Frame-Grabber unumgänglich. Um die Größe des Hauptspeichers als limitierenden Faktor für die Länge einer Messreihe auszuschalten, bietet sich die Verwendung eines schnellen RAID-Systems an, so dass auch in diesem Fall die Bilder online auf Festplatte geschrieben werden können.

2.1.4 Auswerteeinheit

Den Kern eines PIV-Systems stellt die Auswerteeinheit bzw. die PIV-Software dar, die für die Auswertung des Bildmaterials hin zu Vektorfeldern verantwortlich ist. Im Gegensatz zu Particle-Tracking-Algorithmen werden bei PIV nicht einzelne Partikelpaare, sondern die mittlere Bewegung kleiner Partikelgruppen ausgewertet, die sich in einer ‚Interrogation Area‘ befinden. Dazu wird zunächst das gesamte aufgenommene Bild (Area of Interest) in solche ‚Interrogation Areas‘ unterteilt, die dann beispielsweise 32 x 32 Pixel des Kamerachips repräsentieren (Bild 2). Mittels einer Kreuzkorrelation der Bildinformationen in den einzelnen Interrogation Areas der Form:

$$R(\Delta x, \Delta y) = \int I_1(x, y) I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy \quad (1)$$

wobei I für die Bildintensität im ersten bzw. zweiten Bild einer ‚Interrogation Area‘ steht und R die Korrelationsstärke für alle Verschiebungen $(\Delta x, \Delta y)$ beschreibt. Als

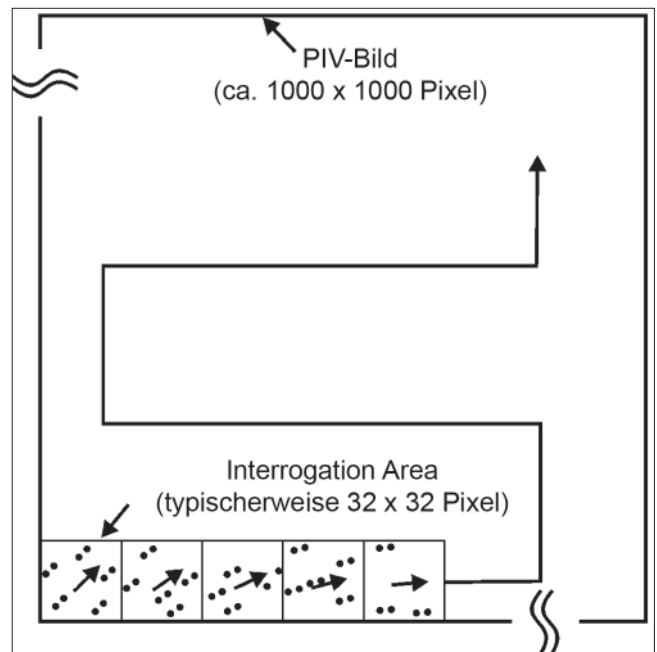


Bild 2: Schematische Darstellung eines PIV-Bildes und der Aufteilung in die jeweiligen ‚Interrogation Areas‘. Zur Verdeutlichung sind in dieser Abbildung die Partikelbilder in den ‚Interrogation Areas‘ aus zwei aufeinanderfolgenden Bildern dargestellt.

Ergebnis ergibt sich somit eine Verteilung der Korrelationsstärke in der Korrelationsebene, wobei der höchste Wert die wahrscheinlichste Verschiebung der Partikel in einer ‚Interrogation Area‘ repräsentiert. Da eine direkte Auswertung dieser Kreuzkorrelation einen zu großen Rechenaufwand mit sich bringen würde, wird hierfür zunächst eine zweidimensionale Fast-Fourier-Transformation der Intensitätsverteilungen durchgeführt (s. [Raffel et al. 1998], [Lausen und Weitbrecht 1999]).

Das Ergebnis eines solchen PIV Durchlaufs ist dann ein Feld von wahrscheinlichen Verschiebungen, die mittels des bekannten zeitlichen Abstands der Einzelbilder in einen Geschwindigkeitsvektor für jede ‚Interrogation Area‘ umgerechnet werden. Im Fall von komplexen Strömungen mit großem dynamischen Bereich werden zusätzliche Filterroutinen bzw. Mehrfachdurchgänge bei der Auswertung benötigt [Adrian 1997]. Eine wesentliche Methode ist hierbei in der Literatur [Scarno und Riethmüller 1999] als ‚adaptive multi-pass‘ beschrieben. Hierbei wird der PIV-Algorithmus zunächst mit einer größeren ‚Interrogation Area‘ gestartet. Die gewonnenen Vektoren dienen im nächsten Schritt mit der nächstkleineren ‚Interrogation Area‘ als Referenz und erhöhen somit die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Korrelation. Zur Verbesserung der Ergebnisse bzw. Eliminierung ‚falscher‘ Vektoren bieten sich Filterroutinen an, welche die Qualität des Vektors durch einen Vergleich mit umliegenden Vektoren überprüfen und ggf. auf den nächst höchsten Korrelationspeak zurückgreifen. Weitere Filter, die eine Glättung des Ergebnisses durchführen oder Lücken durch Interpolati-

on auffüllen, sind mit Vorsicht zu genießen, da hierbei Informationen erzeugt werden, die eigentlich nicht im Bildmaterial vorhanden sind. Zur Erhöhung der Vektordichte können überlappende ‚Interrogation Areas‘ definiert werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass nur optisch eine höhere Informationsdichte erzielt wird, die räumliche Auflösung sich jedoch nach wie vor an der Größe der einzelnen ‚Interrogation Area‘ orientiert.

Je nach Qualität der Rohbilder sind oftmals weitere Bearbeitungsschritte notwendig, um ein gutes bzw. verlässliches Ergebnis zu erzielen. Die weitreichenden Möglichkeiten der Bildbearbeitung (Preprocessing) zur Verbesserung der Kontrastverhältnisse, der Minimierung von Rauscheinflüssen usw. können hier nicht im Detail beschrieben werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass eine gute Ausgangsbildqualität nicht durch eine gute Bildbearbeitung ersetzt werden kann.

Ein wesentlicher Bestandteil der Bildauswertung ist zusätzlich die Kalibrierung des aufgenommenen Bildausschnittes. Der Software muss damit das Verhältnis der Größe eines einzelnen Pixels zur Größe des aufgenommenen Bildausschnittes vorgegeben werden. Oftmals ist das Bildmaterial nicht mit linear abbildenden Objektiven aufgenommen. In diesem Fall müssen zusätzliche Entzerrungsfunktionen bestimmt werden. Solche Routinen sind meist in den Komplettsystemen integriert. Hinsichtlich der Turbulenzgrößen muss jedoch erwähnt werden, dass eine Entzerrung des Bildmaterials meist ein zusätzliches Rauschen mit sich bringt, was im Fall der mittleren Geschwindigkeiten unproblematisch sein kann, aber zu einer Verfälschung der ermittelten Geschwindigkeitsfluktuationen führt.

2.2 Genauigkeit

Die Genauigkeit eines PIV-Systems ist stark von der jeweiligen Anwendung und der damit verbundenen Bildqualität sowie von der Präzision der Synchronisation bzw. des zeitlichen Ablaufs abhängig. Die in [Westerweel 2000] beschriebene Technik zur Bestimmung der Genauigkeit eines PIV-Systems unter Verwendung künstlicher Partikelbilder wurde in [Weitbrecht et al. 2002] auf ein Oberflächen-PIV System der Firma LaVision angewendet. Prinzipiell konnte hier gezeigt werden, dass der systematische Fehler bei der Berechnung der Verschiebungen im Bereich kleiner als 0,2 Pixel des Kamerachips liegt. Unter Einhaltung der im Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Kriterien kann eine sehr große Genauigkeit bei der Bestimmung von mittleren Geschwindigkeiten erzielt werden. Das von [Grant 1997] vorgestellte Qualitätskriterium hinsichtlich der Komplexität der Strömung, welches besagt, dass der Geschwindigkeitsgradient in einer Interrogation Area im Vergleich zur mittleren Geschwindigkeit nicht größer als 0,2 sein sollte, wurde von [Weitbrecht et al. 2002] für das genannte System bestätigt. Bei Messungen von Turbulenzgrößen, wie beispielsweise den mittleren

Fluktuationen, muss weiterhin bedacht werden, dass der Bereich der dominierenden Wirbelgrößen vollständig durch das PIV-System (entsprechende Wahl des Bildausschnittes, der Kameraauflösung, der Partikelgröße und der Bildfolgefrequenz) aufgelöst wird. Ist dies nicht der Fall, werden kleinskalige Schwankungen durch das PIV-System herausgefiltert, sodass vergleichbare Messungen mit Hilfe eines Laser-Doppler-Velocimeters (LDV) auf Grund der sehr hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung in diesem Fall zu genaueren Ergebnissen führen. Auch sollte berücksichtigt werden, dass ein PIV-System nicht in der Lage ist, den gleichen dynamischen Bereich einer Strömung zu erfassen, wie dies im Fall von LDV-Messungen möglich ist.

3 Anwendung im Labor

3.1 Oberflächen-PIV an Bühnenfeldern

In einer Studie zur Untersuchung der Auswirkung von Stillwasserzonen bzw. Bühnenfeldern auf den dispersiven Schadstofftransport in Flüssen [Weitbrecht 2004], wurde ein Oberflächen-PIV System verwendet, um die maßgeblichen Strömungsprozesse, die für den Massenaustausch zwischen Hauptstrom und Stillwasserzone verantwortlich sind, zu identifizieren und zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurde in einer neigbaren 20 m langen und 1,82 m breiten Laborrinne ein schematisches Halbmodell eines Buhngeregelten Flussabschnitts aufgebaut (Bild 3).

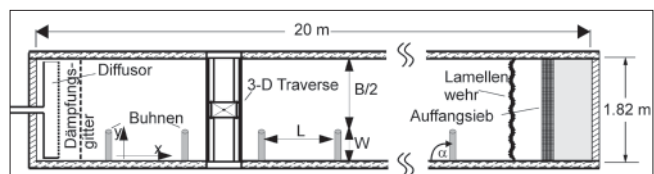


Bild 3: Schematische Darstellung des verwendeten Gerinnes

Zur Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeiten wurde ein PIV-System der Firma LaVision mit einer Flowmaster 3 Kamera (1024 x 1280 Pixeln, 12 Bit Farbtiefe) bei einer zeitlichen Bildwiederholrate von bis zu 7 Hz verwendet. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit beträgt 0,16 m/s, was bei einer Wassertiefe von 0,046 m zu einer Reynoldszahl von 7360 führt. Die Größe des Messfeldes beträgt ca. 1,2 x 1 m², sodass ein Pixel des Kamerachips ca. 1 mm des Messfeldes entspricht. Als Tracer wurden schwarze Polypropylenpartikel der Firma Feddersen & Co. (Hostacom PPR 1042 12) mit einem Durchmesser von etwa 2,5 mm verwendet, die mit Hilfe eines speziell konstruierten Partikeldispensers [Weitbrecht et al. 2002] auf die Wasseroberfläche aufgebracht wurden. In Bild 4 ist ein Rohbild aus einer PIV-Messung im Bereich eines Bühnenfeldes abgebildet. Darauf ist zu erkennen, dass auch nach gründlicher Vorbereitung und Auswahl der Partikel keine vollkommene Gleichverteilung der Partikel zu erzielen ist und sich in diesem Fall zusätzlich Parti-

kelkonglomerate bilden. Es wurde jedoch beobachtet, dass gerade im Bereich der Mischschicht diese Konglomerate auf Grund der starken Scherung auch wieder auseinanderfallen.

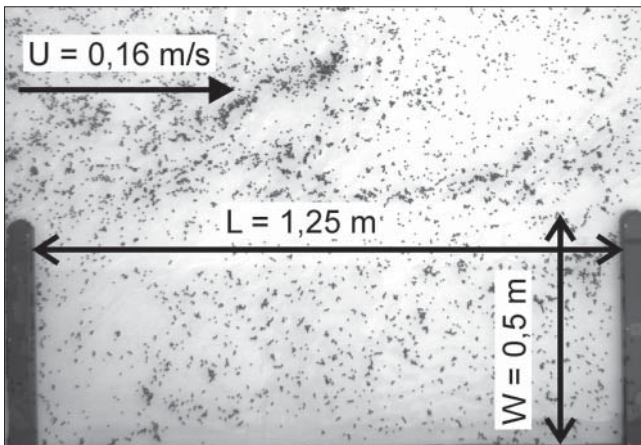


Bild 4: Rohbild einer PIV-Messung in einem Buhnenfeld mit Polypropylenpartikeln an der Wasseroberfläche

Die Auswertung eines einzelnen Bildpaares ergibt ein Vektorfeld, wie es in Bild 5 zu sehen ist. In diesem Fall wurde das Rohbild zunächst invertiert und lokal ein mittleres Hintergrundrauschen substrahiert. Dieser Vorgang ermöglicht später ein speicherplatzsparendes Archivieren der Daten. Auf diese vorbereiteten Bilder wurde der PIV-Algorithmus unter Verwendung der Kreuzkorrelationstechnik mit einer Standard Fast-Fourier-Transformation im Modus des ‚Adaptiv-Multipass‘ angewendet. Ausgehend von einer Interrogation Area mit einer Größe von 64 x 64 Pixeln und einer endgültigen Größe von 32 x 32 Pixeln wurde bei einer Überlappung der Interrogation Areas mit 50 % ein Vektorfeld von 64 x 78 Vektoren erzeugt. Jeder Vektor steht dabei für eine Fläche von ca. 3 x 3 cm².

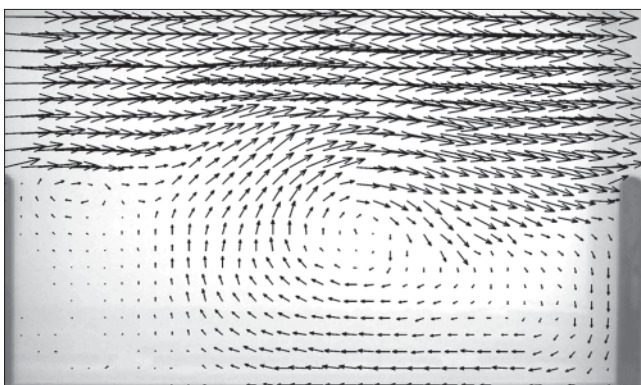


Bild 5: Darstellung eines instantanen Geschwindigkeitsfelds an der Wasseroberfläche im Bereich der Grenzschicht zwischen Hauptstrom und Buhnenfeld

Eine Messreihe besteht insgesamt aus 200 Einzelbildern und wurde für jede Anordnung dreifach wiederholt. Die zeitliche Mittelung aller drei Messreihen zeigt dann in Bild 6 die typische Doppelwalzenformation, die sich in einem Buhnenfeld ausprägt, wenn die Länge des Buhnenfeldes in Fließrichtung gesehen größer als

das 1,5-fache der Breite beträgt. Im vorliegenden Fall ist dieses Verhältnis 2,5.

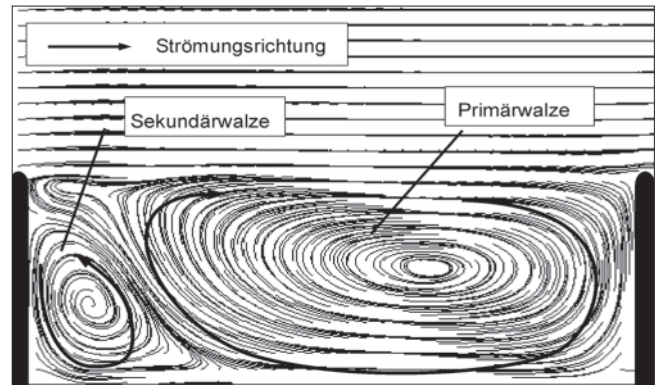


Bild 6: Darstellung der zeitlich gemittelten Strömungsprozesse in einem Buhnenfeld mit Hilfe von Stromlinien

Zusätzlich zu den mittleren Geschwindigkeiten lassen sich aus den ermittelten PIV-Daten Informationen hinsichtlich der Turbulenzeigenschaften der Strömung ermitteln. In Bild 7 sind die transversalen, mittleren Geschwindigkeitsfluktuationen als Standardabweichung der zeitlichen Geschwindigkeitsänderungen v' (in y-Richtung) normiert mit der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* aus den PIV-Messungen, im Vergleich mit Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) Messungen dargestellt. Die Schubspannungsgeschwindigkeit wurde in diesem Fall über $u_* = (g h I)^{0.5}$ mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, der Wassertiefe $h = 0,046 \text{ m}$ und der Wasserspiegelneigung $I = 0.032 \text{ ‰}$ zu 0.021 m/s bestimmt. Im Hinblick auf die Möglichkeiten des PIV-Systems lässt sich dabei sagen, dass im Bereich der Mischungsschicht zwischen Hauptstrom und Stillwasserzone, die durch großräumige horizontale Wirbel-

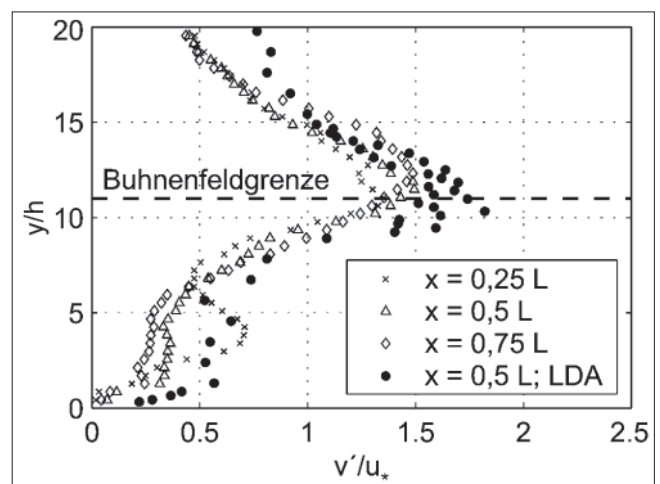


Bild 7: Darstellung der Transversalkomponente der mittleren Geschwindigkeitsfluktuationen v' aus PIV- und LDV-Messungen, normiert mit der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* entlang drei verschiedener Querprofile im Buhnenfeld bei $x = 0,25 L$, $0,5 L$ und $0,75 L$, wobei L die Länge des Buhnenfeldes in Hauptströmungsrichtung bezeichnet

strukturen dominiert ist (s. Bild 8), die PIV-Messungen sehr gut mit den LDV-Messungen übereinstimmen. Im Bereich der ungestörten Außenströmung bei $y/h = 20$, in der die Turbulenz durch kleinskaligere Wirbel dominiert ist, wird dagegen die Turbulenzintensität durch die PIV-Messungen unterschätzt. Die größten Wirbel entsprechen in diesem Bereich ungefähr der Wassertiefe, die mit 4,6 cm im unteren Bereich des Auflösungsvermögens des hier eingesetzten PIV-Systems liegen.

Zur weiteren Charakterisierung der Strömung wurde in Bild 8 die Wirbelstärke der Strömung dargestellt, die Aufschluss über die vorhandenen Strömungsstrukturen in der Grenzschicht zwischen Bühnenfeld und Hauptstrom gibt. Wie bereits erwähnt, ist dieser Bereich durch große horizontale Wirbelstrukturen gekennzeichnet, die mittels der PIV-Messungen visualisiert und quantifiziert werden und in diesem Fall zur Interpretation des Massenaustauschs zwischen Bühnenfeld und Hauptstrom herangezogen werden.

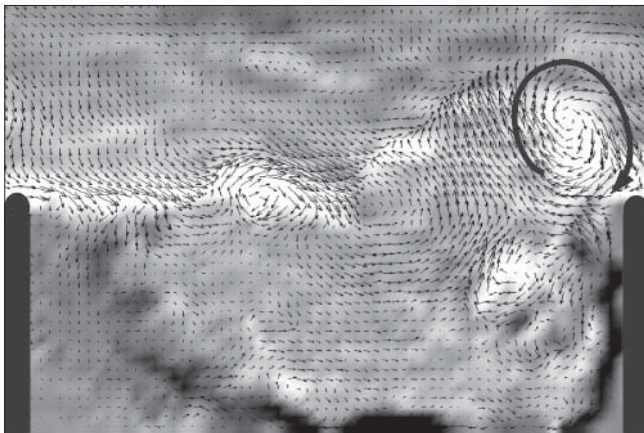


Bild 8: Darstellung der ermittelten Wirbelstärke aus den PIV-Daten. Dabei beschreiben helle Bereiche stark rechtsdrehende und dunkle Bereiche stark linksdrehende Wirbel. Die Vektoren stellen in diesem Fall die momentan ermittelte Geschwindigkeit abzüglich der mittleren Geschwindigkeit dar.

3.2 Oberflächen-PIV bei Zylinderumströmung

In einem Forschungsprojekt zur Untersuchung der Auswirkung von umströmten Hindernissen in Flachwasserströmungen auf den Schadstofftransport [Carmer 2005] wurden ähnlich der verwendeten Technik für die Bühnenfelduntersuchungen, Oberflächen-PIV-Messungen zur Charakterisierung der Strömung im Bereich einer Zylinderreihe durchgeführt. Im Flachwasserbecken des Instituts für Hydromechanik (Bild 9) wurden bei einer Wassertiefe $h = 45$ mm, einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $U = 0,1$ m/s, die großräumigen Wirbelstrukturen im Nachlauf einer Zylinderreihe untersucht. Der Durchmesser eines einzelnen Zylinders sowie der Abstand zwischen zwei Zylindern beträgt dabei 120 mm.

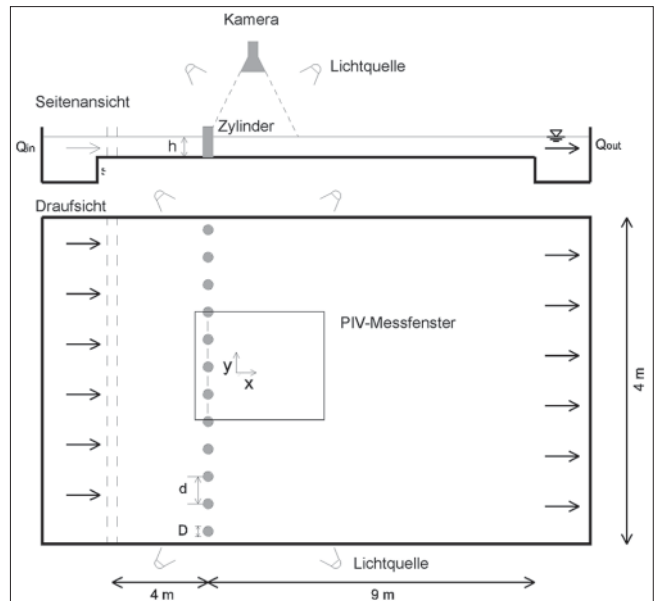


Bild 9: Seitenansicht und Draufsicht des Flachwasserbeckens mit Darstellung der Kameraanordnung sowie der Zylinderreihe (adaptiert von [Rummel et al. 2005])

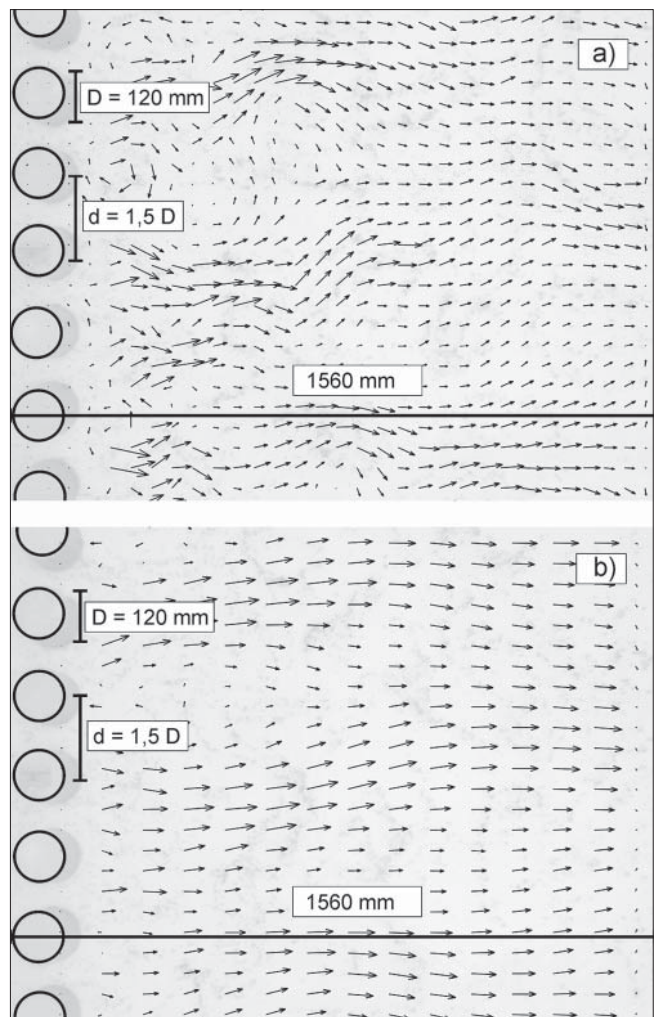


Bild 10: Ergebnisse der Oberflächen-PIV Messung im Nachlauf einer Zylinderreihe; a) momentanes Geschwindigkeitsfeld; b) zeitliche Mittelung der Geschwindigkeiten

In Bild 10 sind Ergebnisse aus den Geschwindigkeitsmessungen im Bereich der Zylindernachläufe dargestellt. Der Messbereich hat in diesem Fall eine Ausdehnung von 1,5 m x 1,5 m. Im Vergleich zu den Bühnenfeldmessungen wurde in diesem Fall eine Kodak Megaplug Kamera mit einer Auflösung von 1000 x 1000 Pixeln verwendet, alle weiteren Komponenten sind identisch. Bild 10a zeigt eine Momentaufnahme der Strömung, während Bild 10b die zeitliche Mittelung der Geschwindigkeiten darstellt. In diesem Fall konnten die Messungen zur Interpretation des transversalen Massentransports genutzt werden.

4 Anwendung im Feld

Im Jahr 2001 führte die USGS (U.S. Geological Survey) eine Machbarkeitsstudie zur Bestimmung von Oberflächengeschwindigkeiten mittels eines Radarsystems durch. Die Messungen fanden an der Cowlitz am Castle Rock (Washington) statt. Begleitend zu den Radarmessungen wurden zwei Videomesstrainen mit einer handelsüblichen Videokamera (Sony, CCD-TR910 Hi8) durchgeführt, die etwa 3 m über der Wasseroberfläche und 30 m entfernt vom Flussufer positioniert wurde. Die erste Serie der Bilder wurde gemacht, während sich die beiden Messboote der USGS im Bereich der Messebene befand (Bild 11). Die Boote waren zu diesem Zeitpunkt an einem Stahlseil fixiert, welches sich im Bereich der optischen Achse der Kamera befand. Diese Bildsequenz wurde dazu verwendet, die benötigten Informationen zu sammeln, die eine Transformation der stark verzerrten Bilder in ein kartesisches Koordinatensystem ermöglichen. Dazu wurden mittels Laser die Entfernungen zwischen Kamera und den beiden Booten sowie zu anderen sichtbaren Objekten als Referenz vermessen.



Bild 11: Bild der Cowlitz während der Versuche mit den beiden Messbooten der USGS

Die zweite Bildsequenz wurde bei ungestörter Wasseroberfläche aufgenommen. Signifikante Windeffekte konnten während den Messungen nicht wahrgenommen werden. Der Himmel war teilweise bedeckt und die Sonneneinstrahlung kam von links etwa aus der

Richtung der Flussachse. Wie in Bild 11 zu erkennen ist, werden durch diese Art der Beleuchtung Oberflächenstrukturen visualisiert, die auf der Wasseroberfläche mittransportiert wurden. Diese Oberflächenstrukturen entstehen in diesem Fall aus Reflektionen an kleinen Oberflächenwellen mit einer Wellenlänge von ca. 5 mm bis zu 3 cm, die sich auf Grund der natürlichen Makroturbulenz in einem Fluss ausbilden. Diese, durch Reflektionen des einfallenden Sonnenlichts an Oberflächenwellen generierte Textur an der Wasseroberfläche, spiegelt sich im Videosignal als Variation der Helligkeitsintensität wieder. Diese Textur, deren optisches Erscheinungsbild sich auf Grund der Wellenbewegung beständig verändert, bewegt sich jedoch im Mittel mit der an der Oberfläche herrschenden Strömungsgeschwindigkeit. Diese hier sichtbare leicht geriffelte Struktur der Wasseroberfläche ist eine sehr typische Textur in Fließgewässern, die jedoch nicht nur durch interne Turbulenz, sondern auch durch Windeinflüsse generiert werden können. Die Frage, ob neben den internen Oberflächenwellen auch durch Wind generierte Wellen zur Vermessung der Oberflächengeschwindigkeit herangezogen werden können, ist bisher noch nicht geklärt [Muste et al. 2004]. Ähnliche Messungen zur Bestimmung des Gesamtabflusses [Fujita und Hino 2003] bei sehr unterschiedlichen äußeren Bedingungen deuten jedoch darauf hin, dass die Oberflächenstruktur generell als geeigneter Tracer zur Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeit verwendet werden kann.

Die ermittelten Geschwindigkeitsdaten aus den oben erläuterten Bildsequenzen beruhen auf den Bildbearbeitungsschritten wie sie in [Bradley et al. 2002] beschrieben sind. Die Bilder wurden dabei zunächst unter Verwendung sechs verschiedener Referenzpunkte entzerrt, die aus den Bildern der ersten Sequenz ermittelt wurden. Diese für die geometrische Transformation benötigten Punkte waren: Bug und Heck der Boote, der Ast sowie der Zylinder, die im Nahfeld in Bild 11 zu erkennen sind. Zusätzlich wurde angenommen, dass die Kameraachse senkrecht zur Flussachse steht und dass die beiden Boote ebenfalls im rechten Winkel zur Kamera stehen. In Bild 12 ist ein Originalbild in seiner rücktransformierten Form dargestellt.

Zur Genauigkeit dieser Transformation lässt sich sagen, dass der untypisch kleine Winkel zwischen Kamera und Wasseroberfläche (ca. 5°) zu starken Verzerrungen der Bilder führt. Dies und eine relativ ungenaue Vermessung der Passpunkte führen jedoch letztendlich zu einer Abweichung zwischen den natürlichen Längen und den transformierten Längen aus dem Bildmaterial, die unter 10 % liegt. Die Genauigkeit der gewonnenen Geschwindigkeiten würde sich wesentlich steigern lassen, wenn die verwendeten Referenzpunkte geodätisch vermessen worden wären. Der hier vorgestellte Test besitzt damit eher den Charakter einer Machbarkeitsstudie, um zu zeigen, dass die Oberflächenstruk-

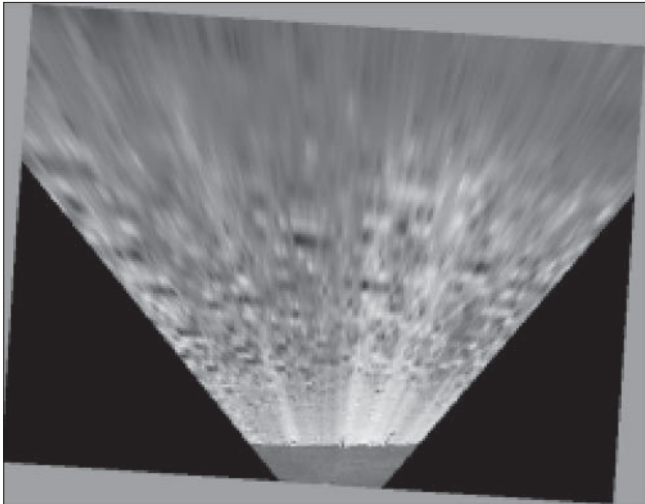


Bild 12. Rücktransformiertes unverzerrtes Bild des Flusses (672 x 524 Pixel)

tur einer turbulenten Gerinneströmung zur Geschwindigkeitsmessung herangezogen werden kann, als dass er den Anspruch erhebt, ein fertig entwickeltes Messsystem darzustellen.

Nach einer Auswertung der rücktransformierten Bilder über einen Kreuzkorrelationsalgorithmus [Fujita et al. 1998] konnten anhand der hier aufgenommenen Bildsequenzen die in Bild 13 dargestellten mittleren Geschwindigkeiten ermittelt werden. Die Größe der ‚Interrogation Area‘ entspricht in etwa 15 m² in Naturdaten. Die LSPIV-Analyse liefert ein fast komplettes Vektorfeld im gesamten Bereich des Kameraausschnitts. Das so erzeugte Vektorfeld unterstützt damit die Vermutung, dass die Oberflächenstruktur einer turbulenten Strömung als Tracer zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeiten eingesetzt werden kann.

Bild 13a zeigt ein Geschwindigkeitsfeld, welches im Zentrum eine Länge von ca. 80 m besitzt. Bild 13b gibt eine Geschwindigkeitsverteilung wieder, die in Querrichtung symmetrisch zur Flussachse verläuft, mit abnehmender Fließgeschwindigkeit hin zu den Ufern. Ein genauer Blick auf die Geschwindigkeitsverteilung in Bild 13a zeigt den ungünstigen Einfluss von Schattenwürfen, die in den Originaldaten durch Bäume erzeugt werden. Die Auswertung der parallel durchgeführten Radarmessungen liegen derzeit für einen Vergleich der ermittelten Geschwindigkeitsfelder noch nicht vor.

Die ermittelten Oberflächengeschwindigkeiten repräsentieren damit die Möglichkeiten von LSPIV hinsichtlich der Nutzung von natürlich erzeugten Oberflächennustern für die Erfassung der Flussströmung. Die größte Fehlerquelle liegt in diesem Fall in der ungenauen Vermessung der geometrischen Verhältnisse zwischen den einzelnen Referenzpunkten. Messungen von [Creutin et al. 2002] mit LSPIV und der Auswertung der Oberflächengeschwindigkeiten hinsichtlich des vorhandenen Abflusses zeigten nach Kalibrierung mit Hilfe der Sohlquerprofile einen maximalen Fehler

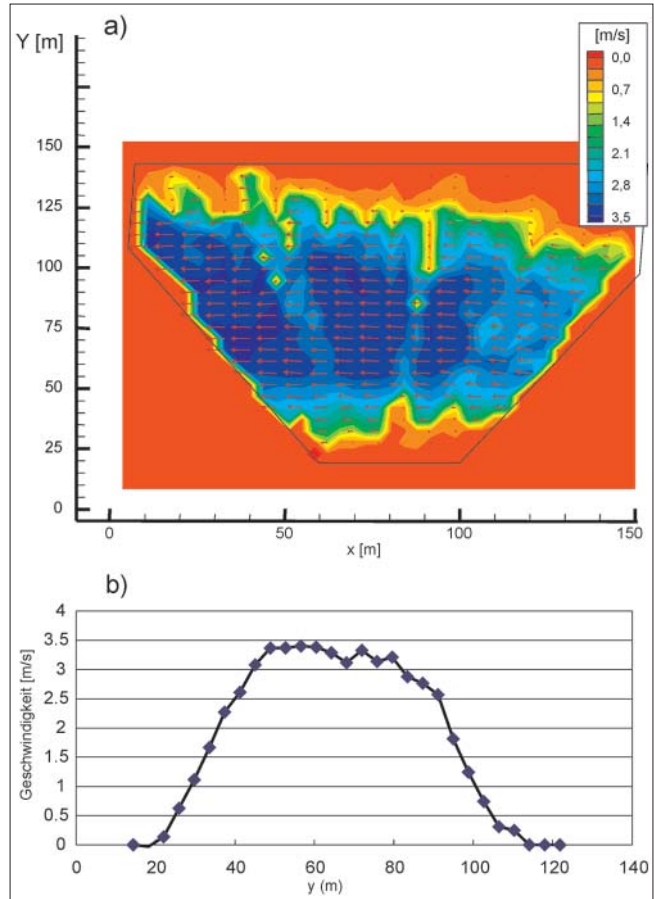


Bild 13: LSPIV-Testmessungen an der Cowlitz;
a) Geschwindigkeitsverteilung im gesamten Messfeld b) Geschwindigkeitsverteilung entlang eines Querprofils

von 3 % im Vergleich mit herkömmlichen Methoden zur Abflussmessung.

Zusammenfassend kann zu den Messungen der Oberflächengeschwindigkeiten im Feld gesagt werden, dass hiermit eine sehr einfach einzusetzende Messtechnik zur Verfügung steht, um Aussagen über die zeitlich gemittelten Oberflächengeschwindigkeiten an einem bestimmten Flussabschnitt zu ermitteln. Auf Grund der Eigendynamik der Oberflächenstrukturen ist es jedoch sehr schwierig, in diesem Fall Aussagen zum Turbulenzverhalten der Strömung zu machen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Particle-Image-Velocimetry (PIV) steht ein Messverfahren zur Verfügung, das berührungslos in der Strömung unter Verwendung von Laserlichtschnitten bzw. an der Wasseroberfläche für die Erfassung von Geschwindigkeitsfeldern für eine Vielzahl möglicher Fragestellungen eingesetzt werden kann. Die Größenordnung der dabei untersuchten Messfelder können sich um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Während im Fall von Messungen im Wasserkörper Laserlichtschnitte erzeugt werden müssen und dabei große Anforderungen an zeitliche Synchronisation der ver-

schiedenen Komponenten gestellt werden, kommt das Oberflächen-PIV bzw. LSPIV je nach Fragestellung auch mit konventioneller Videotechnik und natürlicher Beleuchtung aus, was hinsichtlich der Einhaltung von Sicherheitsvorschriften in Wasserbaulabors ein wesentlicher Vorteil sein kann.

Zur erfolgreichen Durchführung von PIV-Messungen ist eine sorgfältige Versuchsplanung notwendig, da nur unter Berücksichtigung der wesentlichen Parameter wie Partikelgröße, mittlere Geschwindigkeiten, Komplexität der Strömung, zeitliche und räumliche Auflösung der Kamera sowie Intensität des eventuell eingesetzten Lasers gewährleistet ist, dass die PIV-Software aus den aufgenommenen Bilddaten exakte Ergebnisse produzieren kann. Zusätzliches Pre- und Postprocessing des Bildmaterials bzw. der berechneten Verschiebungen können einen gute Bildqualität nicht ersetzen. Von wesentlicher Bedeutung, vor allem bei verzerrt aufgenommenen Bilddaten, ist die geometrische Kalibrierung des Bildmaterials, da hier ein Fehler sich direkt auf die berechnete Geschwindigkeit auswirkt.

Im vorgestellten Beispiel der Bühnenfeldströmung konnte gezeigt werden, dass unter geeigneter Wahl der Parameter nicht nur mittlere Geschwindigkeiten, sondern auch Informationen hinsichtlich der Turbulenzeigenschaften aus Oberflächen-Messungen gewonnen werden können. Vergleiche mit LDA-Messungen zeigen in Strömungsabschnitten, die durch großräumige Wirbelstrukturen dominiert sind, eine sehr gute Übereinstimmung mit den ermittelten PIV-Daten. In Bereichen die durch kleine Wirbelstrukturen dominiert sind wird auf Grund der mangelnden räumlichen Auflösung des PIV-Systems die Turbulenz unterschätzt. Die Ergebnisse hinsichtlich der Oberflächenmessungen im Feld zeigen vielversprechende Ansätze zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten unter Verwendung einfachster Videotechnik. Wichtig hierbei wäre eine verbesserte Vermessung der Passpunkte zur geometrischen Kalibrierung des Bildmaterials.

Auf Grund der verbesserten Anwenderfreundlichkeit vorhandener PIV-Systeme und der steigenden Anforderungen an den Informationsgehalt von Strömungsmessungen, werden PIV-Techniken sich als Routinemessung in den Wasserbaulabors etablieren. 3D PIV-Systeme werden sich besonders auf dem Gebiet der Grundlagenforschung durchsetzen, um auf diesem Weg ein synoptisches Bild verschiedenster Strömungsphänomene zu erstellen. Zur Analyse von Flachwasserströmungen sind außer der reinen Erfassung der Oberflächengeschwindigkeit mittels Oberflächen- bzw. LSPIV weitreichende Möglichkeiten denkbar. Zur schnellen Abschätzung des Gesamtdurchflusses an Flussabschnitten ohne Pegelmessstelle oder im Fall großer Hochwasserereignisse ist vorstellbar, mobile LSPIV-Einheiten bereitzustellen. Eine solche Einheit müsste zusätzlich zur visuellen Erfassung der Strö-

mung eine Präzisionsentfernungsmessung durchführen können. Auch wenn die Geometrie der Sohle dabei nicht eindeutig bekannt ist, könnte über eine Annahme typischer vertikaler Geschwindigkeitsprofile auf diese Weise Abflussdaten ermittelt werden. Denkbar wäre über diese Technik auch, ein online Flussgebietsmanagement unter Verwendung mehrerer fest installierter Kameras zu unterstützen, die an den wesentlichen Punkten eines Flussgebietes auf einfache Weise Abflussmessungen durchführen.

Eine weitere Möglichkeit der LSPIV-Messungen liegt in Auswertung der Oberflächengeschwindigkeit unter Zuhilfenahme der Flachwassergleichungen [Chen und Jirka, 1998] hinsichtlich großer Strukturen an der Gerinnesohle (z. B. Dünen). [Muste et al. 2004] zeigten, dass diese Art der Auswertung für zweidimensionale Körper unter Laborbedingungen zu sehr guter Übereinstimmung führt. Einer Erweiterung dieser Technik auf dreidimensionale Sohlstrukturen steht noch aus.

6 Danksagung

Die Autoren danken A. Rummel für die Bereitstellung der PIV-Daten aus den Versuchen zur Zylinderumströmung. Die Untersuchungen zum Einfluss von Bühnenfeldern auf den Stofftransport wurde durch das BMBF (02 WT 9934/9) finanziert, während die Finanzierung der Arbeiten am Flachwasserbecken durch die DFG (Ji 18/4-3) geleistet wurde.

7 Literatur

- ADRIAN, R.J., 1991, Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Ann. Rev. of Fluid Mech.*, Vol. 23, 261-304
- ADRIAN, R.J., 1997, Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry *MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY* 8 (12), 1393-1398
- AKILLI H. AND ROCKWELL D., 2002, Vortex formation from a cylinder in shallow water *PHYSICS OF FLUIDS* 14 (9), 2957-2967
- BRADLEY, A.A., KRUGER, A., MESELHE, E.A. AND MUSTE, M.V., 2002, Low Flow Measurement in Streams Using Video Imagery, *Water Resources Research* (in press)
- CARMER, C. F. V., 2005, Turbulent Shallow Wake Flows: Momentum and Mass Transport due to Large-Scale Coherent Vortical Structures, Dissertation, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (eingereicht)
- CHEN, D. AND G. H. JIRKA, 1998, Instability characteristics of mixing layer and jet under the joint effects of bottom friction and viscosity, *IAHR J. of Hydraulics Research*, V. 36, 815-830.

- CREUTIN, J.D., MUSTE, M. AND LI, Z., 2002, Traceless Quantitative Imaging Alternatives for Measurements in Natural Streams, Proceedings Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference, Estes Park, CO (CD-ROM)
- FUJITA I. AND HINO T., 2003, Unseeded and seeded PIV measurements of river flows videotaped from a helicopter JOURNAL OF VISUALIZATION 6 (3), 245-252
- FUJITA, I., MUSTE, M. AND KRUGER, A., 1998, Large-Scale Particle Image Velocimetry for Flow Analysis in Hydraulic Applications, J. Hydr. Res., 36(3), pp. 397-414
- GRANT I., 1997, Particle Image Velocimetry: a Review, Proc of the Institution of Mechanical Engineers, 211(Part C), pp 55-76
- HERLINA AND JIRKA, G.H., 2004, Application of LIF to investigate gas transfer near the air-water interface in a grid-stirred tank, Exp. Fluids, Issue: online first (link : www.doi.org, DOI number, 10.1007/s00348-004-0822-2)
- JIRKA, G.H. AND UIJTTEWAAL, W. (Ed.s), 2004, Shallow Flows, A.A.Balkema Publishers, Rotterdam
- KOMPENHANS, J. AND TROPEA, C., 1997, Special issue: Particle image velocimetry MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY 8 (12), U3-U3
- LAUSEN, R. AND WEITBRECHT, V., 1999, Einführung eines PIV-Meßsystems (Particle Image-Velocimetry) an der BAW, Technischer Bericht, BAW-Karlsruhe
- LIN, J.C. AND ROCKWELL, D., 1997, Quantitative interpretation of vortices from a cylinder oscillating in quiescent fluid EXPERIMENTS IN FLUIDS 23 (2), 99-104
- MELLING, A., 1997, Tracer particles and seeding for particle image velocimetry MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY 8 (12), 1406-1416
- MESELHE, E., PEEVA, T., AND MUSTE, M., 2004, Large-Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Depth Flows, J. Hydr. Engrg., 130(9), pp. 937-940
- MUSTE, M., XIONG, Z., SCHÖNE, J., AND LI, Z., 2004, Flow Diagnostic in Hydraulic Modeling Using Image Velocimetry, J. Hydr. Engrg, 130(3), pp. 175-185
- NÜBEL, K. AND WEITBRECHT, V., 2002, Visualization of Localization in Grain Skeletons with Particle Image Velocimetry, ASTM, Journal of Testing and Evaluation, 30(4), 322-328
- PRASAD, A.K., 2000, Particle image velocimetry, CURRENT SCIENCE 79 (1), 51-60
- RAFFEL, M., WILLERT, C., AND KOMPENHANS, J., 1998, Particle Image Velocimetry, Springer Verlag, Berlin
- RUMMEL A.C., SOKOLOFSKY S.A., CARMER C.F.V., JIRKA G.H., Enhanced diffusion from a continuous point source in shallow free-surface flow with grid turbulence, submitted to Physics of Fluids 2005
- SCARANO, F. AND RIETHMULLER M.L., 1999, Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset, Experiments in Fluids, Vol. 26, 513-523
- WEITBRECHT V., 2004, Influence of Dead-Water Zones on the Dispersive Mass Transport in Rivers, doctoral thesis, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe
- WEITBRECHT V., KUHN G., AND JIRKA G.H., 2002, Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows, Flow Measurement and Instrumentation 13 (5-6) pp. 237-245
- WESTERWEEL, J., 2000, Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry, Experiments in Fluids, Vol. 29, Iss. 7, 003-012

