

3D-PTV – Ein System zur optischen Vermessung von Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten in physikalischen Modellen

DIPL.-ING. MARTIN HENNING, DIPL.-ING. (FH) VOLKER SAHRHAGE, DIPL.-ING. BERND HENTSCHEL, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, KARLSRUHE

1 Einleitung

Im wasserbaulichen Versuchswesen ist die Kenntnis von Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten die wesentliche Voraussetzung für die Analyse von Strömungsvorgängen. Konventionelle Messverfahren liefern i. d. R. nur diskrete Informationen über die Höhe des Wasserspiegels bzw. über die Geschwindigkeit an einem konkreten Ort (z. B. Ultraschallsonden, Drucksonden, vibrierende Spitzentaster, Laser-Doppler-Anemometrie (LDA), Akustik-Doppler-Velocimetrie (ADV), Hitzdraht-Anemometrie (HDA)). Sie ermöglichen weder großflächige Analysen der Strömung noch die zeitgleiche Erfassung ganzer Strömungsfelder.

Vor dem Hintergrund verbesserter Analysemethoden und ständig verbesserter Rechenmodelle wächst der Wunsch nach Messverfahren, die in der Lage sind, großflächige Informationen zu liefern und gleichzeitig hohen Genauigkeitsanforderungen gerecht werden. Diese Informationen werden sowohl direkt für die Analyse der Untersuchung an den physikalischen Modellen als auch in zunehmendem Maße als Grundlage für die Weiterentwicklung komplexer mehrdimensionaler numerischer Verfahren benötigt.

Insbesondere für Vorgänge mit stark ungleichförmigen oder instationären Problemstellungen oder bei nicht ebenem Wasserspiegel ist der Einsatz eines Systems zur flächigen Erfassung von Wasserspiegellagen und Oberflächengeschwindigkeiten (Schleusenfüllung, Überströmung von Wehren oder Buhnen etc.) von großer Bedeutung.

In Zusammenarbeit mit der Fa. AICON, Braunschweig, wurde daher an der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) die Dreidimensionale-Particle-Tracking-Velocimetrie (3D-PTV) entwickelt, welche auf einem bereits erfolgreich eingesetzten photogrammetrischen System zur Vermessung von nicht transparenten Oberflächen im wasserbaulichen Versuchswesen aufbaut [Godding, Hentschel, Kauppert 2003].

2 Das Messsystem

Die 3D-PTV nutzt zur Bestimmung von Oberflächengeschwindigkeiten und Wasserspiegellagen das Prinzip der Teilchenverfolgung innerhalb einer Bildfolge. Die notwendigen Messungen finden berührungslos in den Bildern dreier Digitalkameras statt, die das Messobjekt zeitgleich als Videosequenz aufnehmen.

Die Lage des Wasserspiegels und die Oberflächengeschwindigkeiten werden durch sogenannte „Tracer“ verkörpert. Dies sind auf der Wasseroberfläche schwimmende Teilchen, die in der Auswertung in jeder einzelnen Aufnahme automatisch erkannt und deren Positionen bestimmt werden. Durch den Bewegungsfortschritt zwischen den Bildern ist es möglich, ihre Bewegung im Raum (Lage und Geschwindigkeit) zu rekonstruieren. Das System besteht aus einer Echtzeitanwendung für die Bildaufnahme und der Auswertung. Bei der Auswertung erfolgt die Identifizierung der Tracer durch digitale Bildverarbeitung und die anschließende Referenzierung zur Feststellung ihrer Raumkoordinaten.

2.1 Bildaufnahme

In Echtzeit erfolgt die Aufnahme durch drei progressive Industriekameras¹, die, zueinander starr verbunden, den Kamerakopf bilden. Das derzeit vorhandene System besteht aus einer S-VGA (800 x 600 Pixel, max. 60 Hz) und zwei XGA-2 Kameras (1360 x 1024 Pixel, max. 10 Hz).

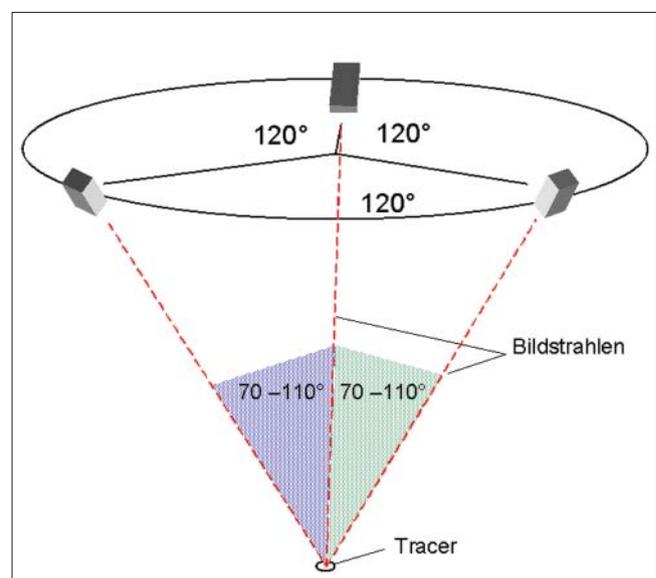


Bild 1: Kameraanordnung im 3D-PTV-System

Bei optimaler Konfiguration sollte die von den Kameras aufgespannte Ebene zur zu vermessenden Oberfläche ausgerichtet und die Kameras auf einem Vollkreis in 120° Schritten verteilt sein. Zur einwandfreien Punktbestimmung sollten die Kameras so angeordnet sein,

¹ liefern Vollbilder im Gegensatz zu Halbbildern beim Zeilensprungverfahren

dass die Schnittwinkel der drei Bildstrahlen im Messpunkt zwischen 70 – 110° liegen (Bild 1). Die streng zeitsynchrone Aufnahme aller Kameras wird als Bildtripel abgespeichert, welches im Postprocessing wieder als solches ausgewertet wird. Alle Bildtripel der gesamten Aufnahmedauer werden in einer Videodatei direkt auf dem Auswerterechner gespeichert. Die Größe dieser Datei richtet sich nach dem Format der aufgenommenen Bilder, der Anzahl an Aufnahmen pro Sekunde und der Länge des Aufnahmezeitraums. Die Kameras erzeugen monochrome Bilder mit 256 Helligkeitsabstufungen (8 Bit), wobei das einzelne Kamerabild eine Dateigröße von 0,48 bzw. 1,39 MByte hat. Durch die geringere Datenmenge pro Bildtripel lassen sich bei geringen Auflösungen höhere Aufnahmefrequenzen realisieren. Hohe Auflösungen ermöglichen dagegen größere Aufnahmebereiche oder genauere Punktmessungen. Tabelle 1 zeigt ein rechnerisches Beispiel der bei einem Versuch zu erwartenden Datenmengen. Bei der Konfiguration des Auswerterechners sind die Datenmengen im Vorfeld zu berücksichtigen.

Auflösung [Mio-Pixel]	Daten/Bildtripel [MByte]	Bildfrequenz [Hz]	Aufnahmedauer [min.]	Datenmenge [MByte]	Datenmenge [MByte/s]
S-VGA 0,48	1,4	60	1	4,9	82
			10	49	
			60	296	
XGA-2 1,39	3,8	10	1	2,4	40
			10	24	
			60	143	

Tabelle 1: Beispiel für zu erwartende Datenmengen

2.2 Auswertung

2.2.1 Bildverarbeitung

Im Postprocessing erfolgt die räumliche Verknüpfung der Einzelbilder und ihre Auswertung im Bildtripel. Diese umfasst zunächst die Erkennung und Messung der in den Aufnahmen sichtbaren, auf der Wasseroberfläche schwimmenden Tracer.

Einzelne Tracer werden über Kontrastunterschiede erkannt und müssen einen Mindestabstand zueinander haben. Wird dieser Mindestabstand unterschritten (d. h. es gibt keine Helligkeitsunterschiede zur Abgrenzung der Einzelteilchen), so werden diese Tracer als ein Teilchen gewertet und auf Grund eines vorzuziehenden Größenkriteriums nicht ausgewertet.

Die Zuordnung der identischen Tracer zu einer eindeutigen Bahnlinie erfolgt über eine gezielte Suche im Folgebild. Hierbei werden die bereits vorliegenden Informationen über diesen Tracer, wie der zurückgelegte Weg und die Richtung während des letzten Zeitschrittes, zu Grunde gelegt. Hinzu kommen vom Benutzer gewählte Einstellungen bezüglich Gleichförmigkeit der Bewegung und Größe der zu suchenden Tracer. Durch diese Informationen wird die optimale Suchposition des Tracers im Folgebild bestimmt. Stark un-

gleichmäßige Bewegungen, wie z. B. spontane Richtungsänderungen bei variierenden Geschwindigkeiten zwischen zwei Einzelbildern, könnten bei einer großen Anzahl an Tracern zu Fehlzuordnungen führen. Das System ist allerdings in der Lage, bei entsprechender Einstellung auch diese Effekte abzufangen.

Wird ein rundes Objekt auf einem Bildsensor digital abgebildet, so wird es in Pixel zerlegt und in einer Matrix aus Pixelelementen wiedergegeben. Der Mittelpunkt des Tracers wird über eine Ellipsen- und Schwerpunkt-messung subpixel-genau berechnet. Dazu ist es jedoch erforderlich, dass das zu bestimmende Objekt über eine ausreichende Anzahl an Pixeln abgebildet ist. Eine kreisförmige Zielmarke sollte daher abgebildet einen Durchmesser von 5 – 8 Pixel aufweisen, um Probleme bei der Punkt-messung zu vermeiden. Daraus ergibt sich in Abhängigkeit von der gewählten Kamera und dem Aufnahmeareal eine Mindestgröße für die Tracerteilchen (z. B. 1024 Pixel Auflösung, 3 m Kantenlänge des Aufnahmeareals, 1 Pixel entspricht 3 mm, Tracerdurchmesser mindestens 15 bis 25 mm).

Bei der Suche nach geeigneten Materialien für die Tracerteilchen erwies sich Polypropylen als geeignet, da es die folgenden Kriterien erfüllt (siehe dazu auch [Oertel, 1989]):

- Gute Schwimmeigenschaften an der Wasseroberfläche (Dichte: 0,9 – 1,0 g/cm³).
- Gutes Folgeverhalten in der Strömung.
- Ideale Anpassung an Wasseroberfläche durch geringe Höhe.
- Hoher Kontrast, einheitliche Farbe (wichtig für gute Bilderkennung).
- Sehr widerstandsfähig (formstabil, langlebig).
- Geringe elektrostatische Aufladung, um „Aneinanderkleben“ der Teilchen zu verhindern.
- Beständig gegenüber Chemikalien, um dauerhaft Konstanz der physikalischen Eigenschaften zu gewährleisten.
- Nahezu keine Feuchtaufnahme (< 0,01 %), damit die physikalischen Eigenschaften über die Versuchszeit konstant sind.
- Temperaturbeständig (Konstanz der physikalischen Eigenschaften).
- Geringe Kosten.
- Verschiedene Ausfertigungen lieferbar (0,3 – 0,8 mm stark; glänzend/matt; weiß/schwarz) für unterschiedliche Anwendungen. Die freie Farbwahl ist z. B. erforderlich, um einen hohen Kontrast zum Modelluntergrund zu gewährleisten.

2.2.2 Referenzierung

Zweiter Bestandteil des Postprocessing ist die Referenzierung der ermittelten Bildkoordinaten. Die zentralperspektivische Abbildung ist das grundlegende Modell des photogrammetrischen Messverfahrens (Bild 2). Die

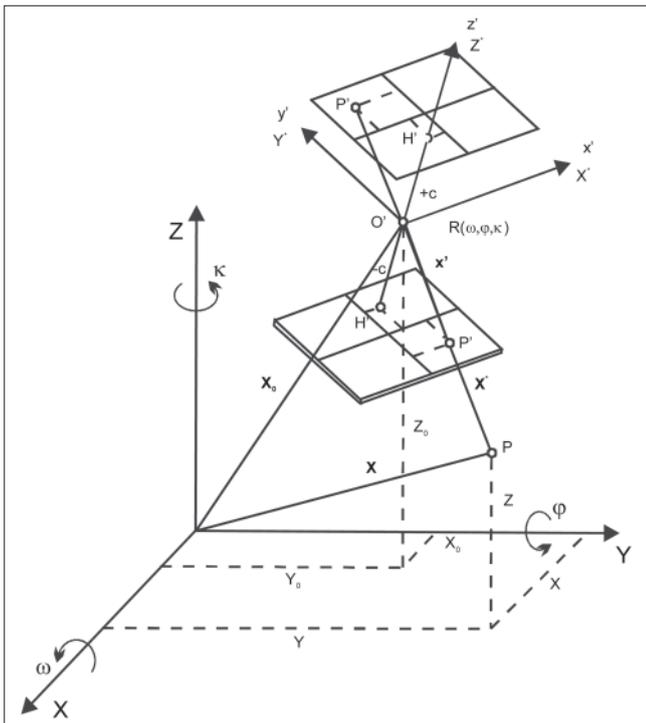


Bild 2: Zentralprojektion und Bildorientierung (aus [Luhmann 2003])

geometrische Rekonstruktion eines dreidimensionalen Objektes erfolgt über die Herstellung des Zusammenhangs zwischen Bild- und Objektpunkt. Von jedem Bildpunkt P' weist ein Bildstrahl über das Projektionszentrum O' zu dem entsprechenden Objektpunkt P .

Um diesen Zusammenhang herstellen zu können, benötigt man Kenntnisse über die innere² und äußere³ Orientierung der Aufnahmekamera. Die Parameter der inneren Orientierung einer Kamera beschreiben die Lage des Projektionszentrums O' im kamerafesten Bildkoordinatensystem sowie Abweichungen vom Idealfall, der zentralperspektivischen Abbildung. Dabei wird die Kamera als räumliches System angesehen, das aus der ebenen Bildfläche (Film, Bildsensor) und dem davor angebrachten Objektiv mit dem Projektionszentrum besteht [Luhmann 2003].

Durch die Parameter der äußeren Orientierung wird die Lage und Ausrichtung des Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem (z. B. Labor- oder Naturkoordinatensystem) definiert. Funktional ist die äußere Orientierung mit einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation vergleichbar, bei der das Startsystem über drei Translationen und drei Rotati-

² Die innere Orientierung beschreibt die geometrischen Verhältnisse der Kamera, Objektiv, Framegrabber-Kombination (z. B. optische Verzeichnung).

³ Die äußere Orientierung definiert die Position und die Winkelorientierung des Bildes relativ zu einem äußeren Koordinatensystem über drei Positions- und drei Rotationsparameter.

onen in das Zielsystem überführt wird. Die Parameter der inneren Orientierung und die der relativen Orientierung der drei Kameras untereinander werden im Vorfeld durch eine Systemkalibrierung bestimmt, die vor jeder Aufnahmeserie durchgeführt wird. Die Parameter der äußeren Orientierung werden vor der Aufnahme über ein Passpunktfeld ermittelt. Retroreflektierende Barcode-Zielmarken (Bild 3) werden dabei durch Ringlichter beleuchtet und dienen in den Aufnahmen als Festpunkte bei der Transformation. Die berechneten Parameter für innere, relative und äußere Orientierung sind durch leichte Veränderungen der Positionen oder Winkel der Kameras untereinander, Temperaturschwankungen und wechselnde Lichtverhältnisse sehr instabil und stehen in direktem Zusammenhang mit der Güte der Punktmessungen.

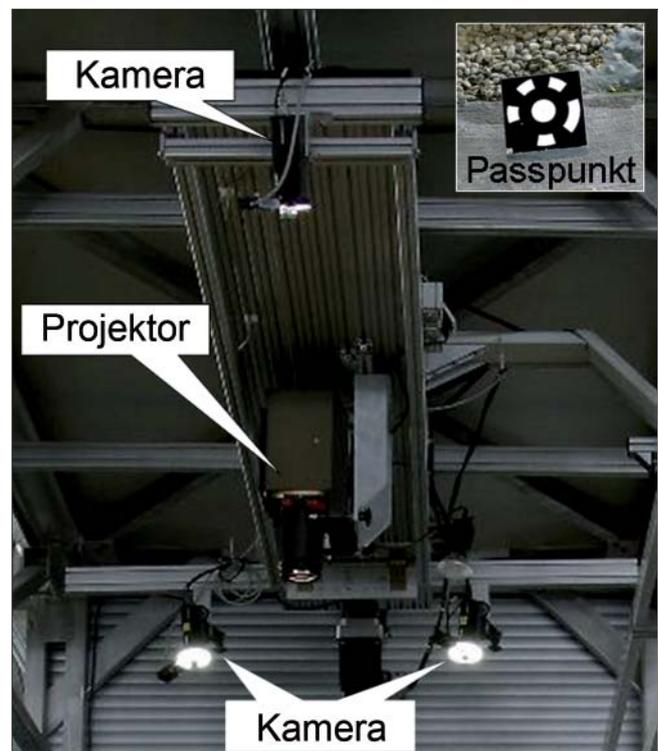


Bild 3: Kamerakopf 3D-Kombisystem zur PTV und Sohlenvermessung, Passpunkt Barcode-Marke

Durch die so gewonnenen 3D-Koordinaten aller sichtbaren Tracer und die Zeitspanne zwischen den Bildtripeln (je nach Messung z. B. 1/10 s bis 1/60 s) wird ihre Geschwindigkeit und Positionsänderung unter Einbeziehung der Gleichförmigkeit der Bewegung vorherbestimmt und im Folgebild die entsprechenden Teilchen wiedererkannt. So kann die Bewegung jedes Tracers über den Aufnahmezeitraum dreidimensional erfasst werden. Größtmögliche Aufnahmefrequenzen von bis zu 3 x 60 Einzelbildern pro Sekunde und lange Filmsequenzen erfordern jedoch lange Bearbeitungszeiten für Tracking und Auswertung.

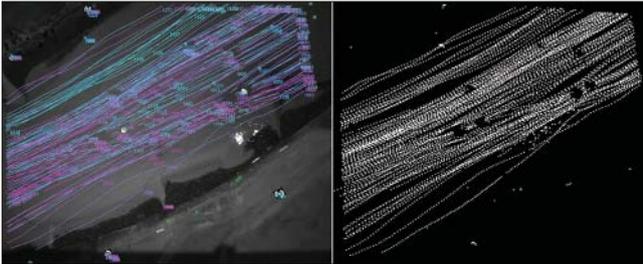


Bild 4: Bahnlinien und Punktwolke einer Messung am Flussmodell

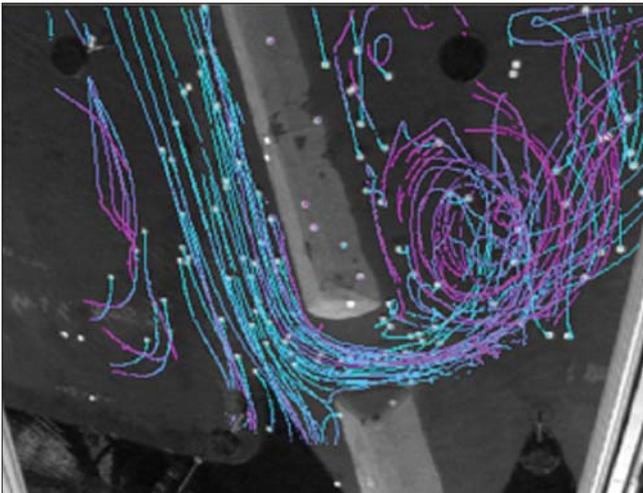


Bild 5: Bahnlinien einer Messung am Buhnenmodell

2.3 Messergebnisse und erreichbare Genauigkeit

Am Ende der Auswertung steht die Darstellung aller berechneten Bahnlinien über den Aufnahmezeitraum (Bild 4, Bild 5). Dabei wird dem Anwender für jedes verfolgte Partikel eine nummerierte Bahnlinie mit farbcoodiertem Zeitschema dargestellt, zu der weitere Informationen, wie z. B. Koordinaten zu unterschiedlichen Zeitpunkten und Genauigkeiten in Form von Standardabweichungen, abrufbar sind. Die zu erreichenden Genauigkeiten hängen von der jeweiligen Anwendung und der Stabilität der Aufnahmeeinheit (innere und relative Orientierung) ab. Bei guter Auflösung der Messpunkte, stabiler und gut verteilter Anordnung der Kameras können Genauigkeiten von unter 0,1 mm erreicht werden. Bei Standardanwendungen (Aufnahmebereich ca. 3 x 3 m²) werden Genauigkeit bis etwa 0,3 mm in der Lage und 0,6 mm in der Höhe erreicht.

Bei kleineren Aufnahmebereichen lassen sich deutlich höhere Genauigkeiten von 0,05 mm in der Lage und 0,1 mm in der Höhe erreichen. Die Anordnung der Kameras kann dann ohne Einschränkungen durch Baugröße oder Beleuchtung vorgenommen werden.

3 Anwendung

3.1 Einsatz im wasserbaulichen Versuchswesen

Bisher wurde die 3D-PTV für Problemstellungen mit stationären Abflüssen bei lokal schwankenden Geschwindigkeiten und Wasserspiegeln, z. B. beim Pulsieren der Buhnenfeldströmungen, und bei Problemstellungen mit gekrümmten Wasserspiegelverläufen, wie sie z. B. beim Wehrüberfall oder der Buhnenüberströmung auftreten, eingesetzt.

3.1.1 Buhnenmodell Schönberg

In einem Buhnenmodell (M 1:30) der Elbe bei Schönberg (El-km 440) [Henning 2000], [Karg 2005] werden im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes Systemuntersuchungen zur Auswirkung von neuen Buhnenformen auf die Wasserspiegellagen im Flussschlauch und auf das Strömungsgeschehen im Buhnenfeld als Begleitung einer groß angelegten Naturdatenkampagne durchgeführt [Kleinwächter et al. 2005], [Anlauf & Hentschel 2002], [Hentschel & Anlauf 2001] (s. Bild 6). Der Energieeintrag ins Buhnenfeld und die Energieumwandlung sind Teil der Untersuchungen.

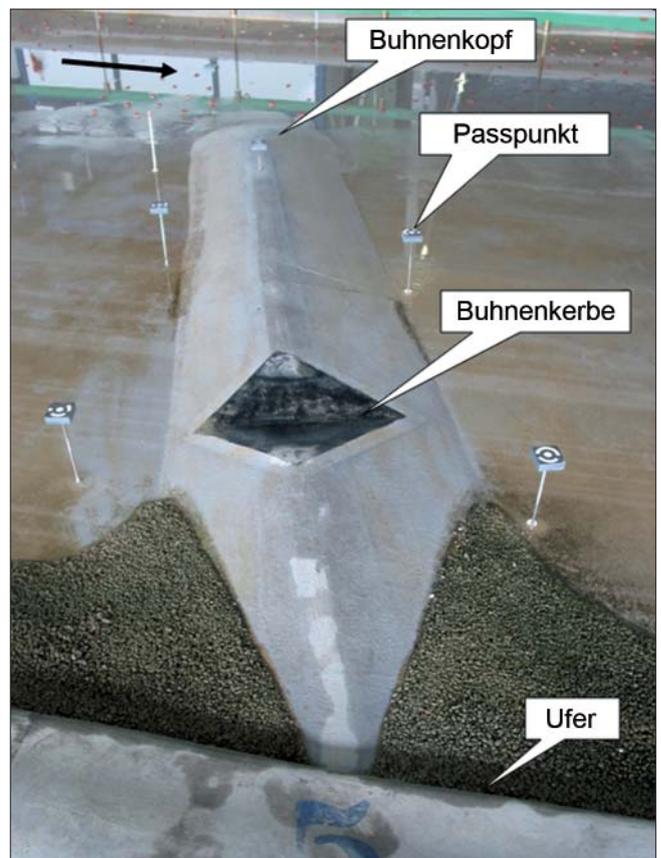


Bild 6: Buhne mit Kerbe im Modell Schönberg (trockenes Modell)

Die vorgestellten Auswertungen beziehen sich auf Versuche an Bühnen mit einer Kerbe im Rücken (Kerbbühne), die eine Öffnung in der uferseitigen Hälfte des Bühnenrückens aufweisen und somit eine Durchströmung bei entsprechenden Abflüssen zulassen. Zur Quantifizierung des Abflusses in den Öffnungen ist, neben der Kenntnis der Fließgeschwindigkeiten, die der Lage des Wasserspiegels erforderlich.

Neben der 3D-PTV kommt am Modell die 2D-PTV [ATV-DVWK 2003] zur Aufnahme großer Flächen und die 2D-Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) zur tiefenaufgelösten Aufzeichnung der Fließgeschwindigkeiten in den Bühnenkerben zum Einsatz.

Der Einsatzbereich der 3D-PTV besteht vor allem in der Detailbetrachtung der Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegel in den Öffnungen der Bühnenrückens und in den Bühnenfeldern. Der betrachtete Bildausschnitt ergibt sich bei einem Kameraabstand von ca. 2 m und einer Auflösung von 800 x 600 Pixel zu ca. 1,6 x 1,6 m². Da das Strömungsgeschehen in Bühnenfeldern einer Pulsation unterliegt und im Falle von gekerbten Bühnen von der Bildung und dem Zerfall von Wirbeln und Walzen geprägt ist, herrscht stark ungleichförmiger Abfluss in den Bühnenfeldern vor, sodass zur Quantifizierung von Wasserein- bzw. -austrag die Betrachtung von Mittelwerten zielführend ist. Bild 5 zeigt hier die unterschiedlichen Verläufe der Bahnlinien der Tracerteilchen über die Zeit. Im rechten Bildteil (unterstrom der Bühne) erkennt man die hohe Varianz der Bahnlinien über die Zeit.

Die Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Bühnenfeldern liegen in der Natur bei einem Bühnenabstand von ca. 100 m und einem Wasserspiegelgefälle im Flussschlauch von 0,1 – 0,2 ‰ im Mittel zwischen 0,01 und 0,02 m. Um Schwankungen des Wasserspiegels oder den Wasserspiegel in der Öffnung betrachten zu können, muss die Auflösung des Systems in diesem Bereich liegen. Aus dem Modellmaßstab von 1:30 ergeben sich Genauigkeitsanforderungen an die Auflösung der Wasserspiegellagen von < 0,3 mm, was der theoretisch möglichen Auflösung entspricht (s. o.). Durch die Umwandlung kinetischer in potenzielle Energie an den Einstromquerschnitten am Bühnenkopf und am Durchriss kommt es in den Bühnenfeldern lokal zu größeren Unterschieden im Wasserspiegel.

Bild 7 zeigt die Auswertung der Wasserspiegellagen einer 3D-PTV Messung in einer Bühnenkerbe bei einem Natur-Mittelwasserdurchfluss (MQ) von 561 m³/s (Bezug ist der Pegel bei Wittenberge). Zur Reduzierung der Datenmenge wurde die Auswertung mit einer Frequenz von 5 Hz durchgeführt, was wegen der relativ geringen Strömungsgeschwindigkeiten zulässig war. Das Spektrum der Farbkodierung beträgt 0,1 m in der Natur (entsprechend 3 mm Modell). Klar zu erkennen ist der niedrigere Wasserspiegel im unterstromigen

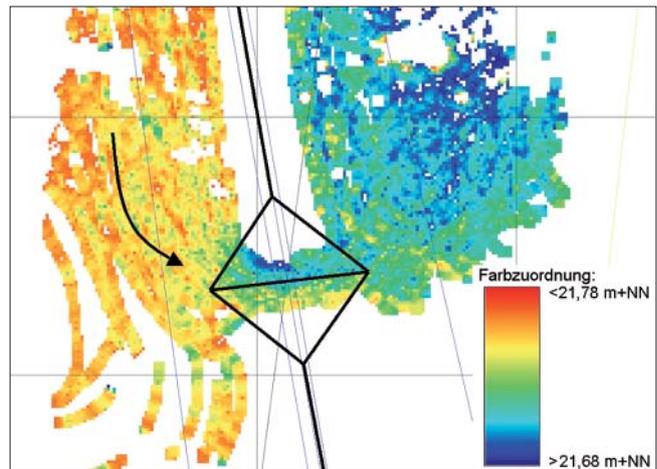


Bild 7: Farbkodierte Wasserspiegellagen in der Bühnenkerbe (umgerechnet auf Naturhöhen)

Bühnenfeld aber auch der Verlauf des Wasserspiegels in der Kerbe. Der unruhige Farbverlauf ergibt sich aus den Wasserspiegelschwankungen, die im Bereich des gesamten Bühnenfeldes, besonders aber im Bereich der Strömungsstörung, die die Öffnung darstellt, auftreten.

Die Genauigkeitsanforderungen an die Geschwindigkeitsmessungen sind leichter zu erfüllen, da die Lageauflösung des Systems prinzipiell besser ist, als die der Höhen und die Vertikalkomponenten der Geschwindigkeiten im vorliegenden Fall vernachlässigbar sind. Darüber hinaus schwanken die Geschwindigkeiten in relativ größeren Spektren, so dass die Schwankung alleine durch die breitere Skalierung geringer scheint. Bild 8 zeigt die den Wasserspiegeln in Bild 7 zugehörigen 2D-Oberflächengeschwindigkeiten (ohne Vertikalkomponente). Die dargestellten Geschwindigkeiten reichen von kleiner 0,1 m/s bis 1,1 m/s in Naturwerten, das entspricht 0,02 bis 0,2 m/s im Modell.

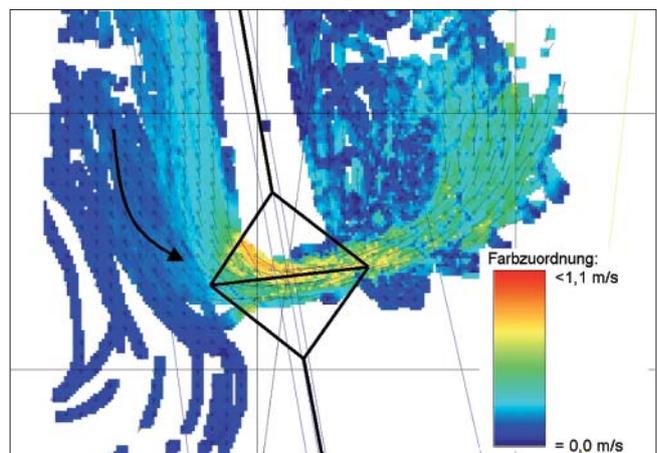


Bild 8: Farbkodierte Oberflächengeschwindigkeiten in der Kerbe des Bühnenrückens (umgerechnet auf Naturwerte)

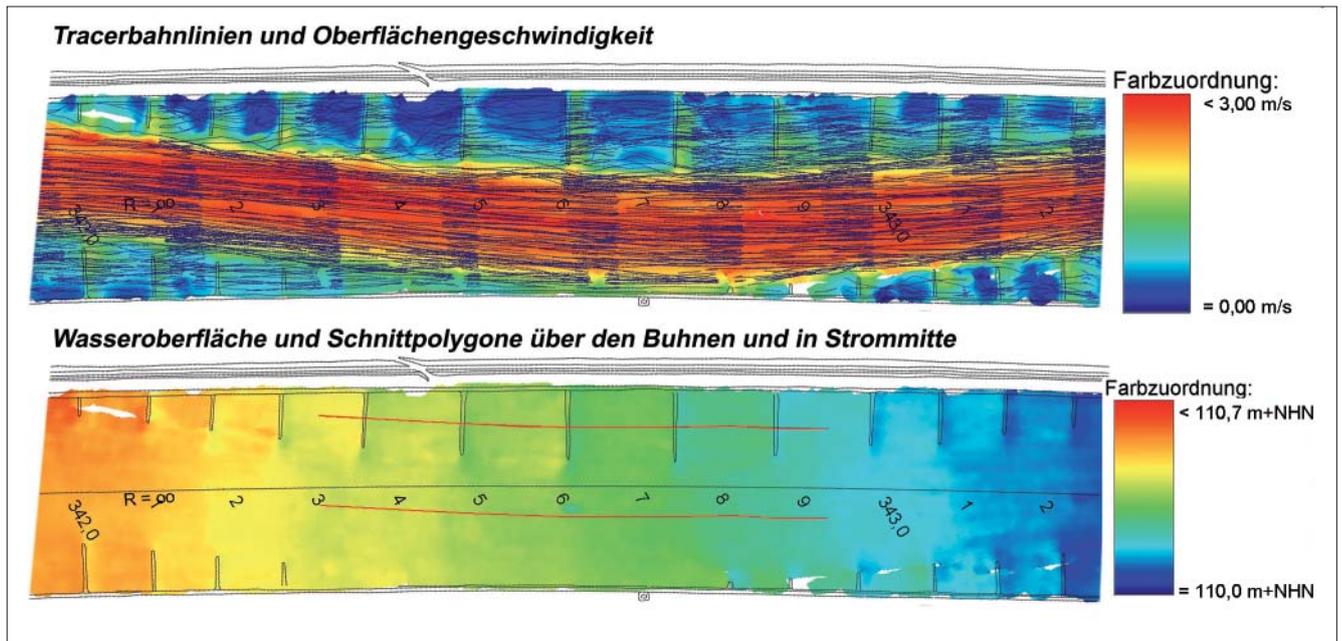


Bild 9: Oberflächengeschwindigkeiten und Wasserspiegel des Rheinmodells Iffezheim (Fließrichtung von links nach rechts)

3.1.2 Rheinmodell Unterwasser Iffezheim

Durch die Anwendung der 3D-PTV auf das Modell eines 8 km langen Rheinabschnitts unterhalb der Staustufe Iffezheim (MdL = 1:100, MdH = 1:50) wurden die Oberflächengeschwindigkeiten und die Höhe der Wasserspiegellagen eines großen Modellausschnitts bestimmt. In insgesamt 54 Einzelfeldern der Größe 1,5 x 2,5 m² wurden Messungen durchgeführt und zu einem digitalen Modell zusammengeführt. Die Aufnahme der Bildfolgen dauerte knapp einen Arbeitstag, die Auswertung der Bilder weitere drei Tage. In Bild 9 sind die Ergebnisse für einen Ausschnitt des Modells als Farbflächen- und Schnittpolygone dargestellt.

Bild 10 zeigt Wasserspiegel- und Geschwindigkeitslängsschnitte im Bereich der in Bild 9 rot dargestellten Schnittpolygone. Der erwartete, treppenartige Verlauf mit einer Wasserspiegelabsenkung bei gleichzeitiger Geschwindigkeitserhöhung über den Buhnen tritt auf.

Der Wasserspiegelunterschied beträgt zwischen zwei Buhnenfeldern etwa 5 cm in der Natur bzw. 1 mm im Modell, die lokalen Wasserspiegelabsenkungen unterhalb der Buhnen betragen im Modell etwa 0,3 mm.

3.1.3 Systemmodell Schlauchwehr

Im Rahmen des BAW Forschungs- und Entwicklungsprojektes „Schlauchwehre an Bundeswasserstraßen“ wurden zahlreiche Versuche als Grundsatzuntersuchung und Planungsgrundlage an Schlauchwehrmodellen (M 1:12) durchgeführt (Bild 11, Bild 12) [Grimm et al., Kap. 4 „Wehre“, in diesem Heft]. Zur Ermittlung der Druckkräfte auf das Bauwerk war die Kenntnis der Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegel notwendig, die mittels 3D-PTV unter der Randbedingung eines dreidimensionalen Wasserspiegels erfasst wurden [BAW 2004]. Zur Überprüfung der Wasserspiegelmessungen wurden auch konventionelle Spitzentastermessungen durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass im

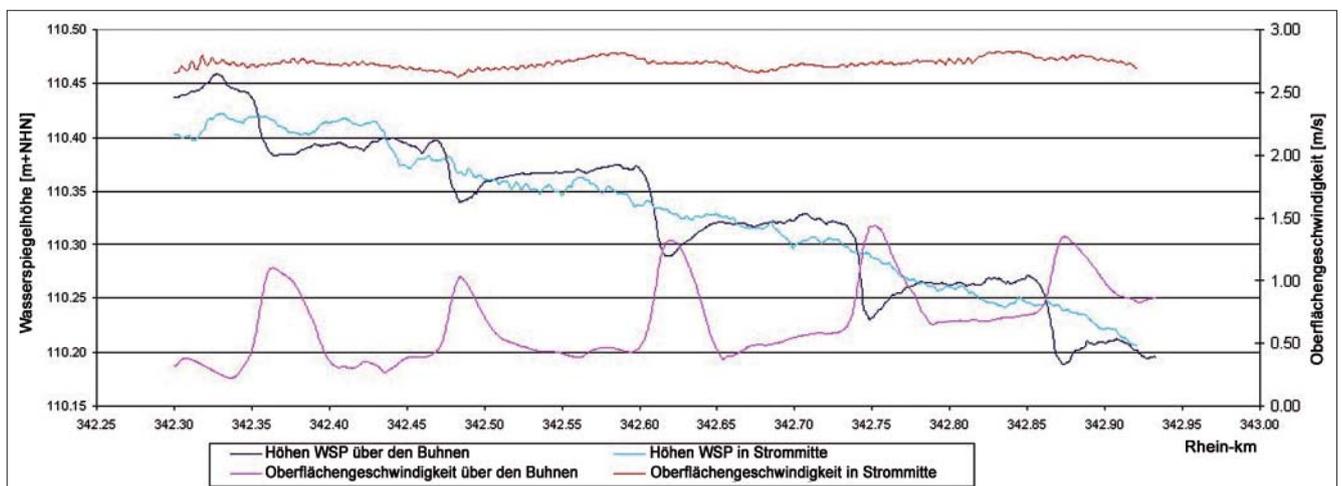


Bild 10: Wasserspiegel- und Geschwindigkeitslängsschnitte



Bild 11: Foto des Schlauchwehrs (vor Einbau der Messtechnik)

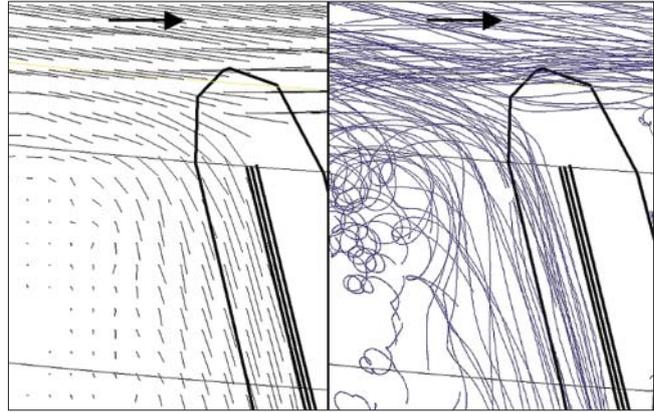


Bild 13: Berechnete Mittelwerte als Vektoren (links) und tatsächlich aufgenommene Bahnlinien am Bühnenkopf

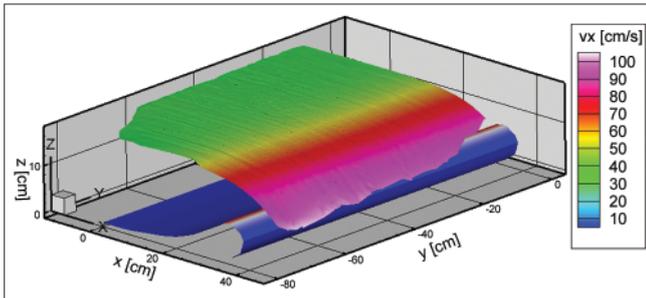


Bild 12: Wasserspiegel und Oberflächengeschwindigkeiten am Schlauchwehr

Bereich der großen Krümmung des Wasserspiegels im Überfallbereich, die Spitzentastermessung durch Probleme beim Antasten deutlich schlechtere Ergebnisse lieferte als die 3D-PTV.

Im Modell gemessene Geschwindigkeiten lagen zwischen 0,3 und 1,1 m/s, bei einem Aufnahmefeld von ca. 0,7 x 0,7 m² und einer Bildfrequenz von 60 Hz. Da die Messebene horizontal lag, konnten ab einem gewissen Überfallwinkel die Bewegung der Teilchen wegen ihrer ungünstigen Lage zum Kamerakopf nicht mehr ausgewertet werden. Der Oberwasserspiegel verläuft ebenfalls annähernd horizontal, sodass dort eine sehr gute Datenrate und -qualität erzielt werden konnte.

3.1.4 Mittelwertbildung

Bei der Betrachtung von Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegellagen bei ungleichförmigen Strömungsvorgängen ist oft die Auswertung von Mittelwerten zielführend, da sie als Ergebnis einen Rückschluss auf repräsentative Werte, wie z. B. einen mittleren Durchfluss oder eine mittlere Wasserspiegellage, zulässt. Auch können aus der Betrachtung eines langen Zeitraums Schwankungsbreiten und andere relevante statistische Größen, wie z. B. die Standardabweichung, bestimmt werden. Durch die zeitliche Mittelwertbildung erhält man ein einheitliches Strömungsfeld (Stromlinien), das so diskret nicht auftritt. Im Gegensatz dazu repräsentieren die tatsächlich aufgenommenen Bahnlinien die Instationarität der Strömung (Bild 13).

Auch die Mittelwertbildung über kurze Zeiträume kann zur Beschreibung eines momentanen Strömungsbildes von Interesse sein. Grundsätzlich gibt es also zwei Betrachtungsweisen einer ungleichförmigen Strömung:

- Die Bildung von Mittelwerten über eine ausreichend lange Zeit mit dem Ergebnis eines durchschnittlichen Strömungsbildes;
- die Betrachtung kurzer zeitlicher Intervalle zur Feststellung von Momentaufnahmen der Strömung.

Der Begriff der Momentaufnahme muss im Zusammenhang mit den Modellgeschwindigkeiten bzw. den Modellzeitmaßstäben gesehen werden, da bei der Auswertung von zwei aufeinander folgenden Bildtripeln der Mittelwert über den zeitlichen Abstand der Bilder und den räumlichen Abstand der Tracer gebildet wird. Es muss modellabhängig ermittelt werden, über welche Zeiträume eine Bildfolge mit welcher Frequenz aufgenommen werden muss, um als Ergebnis einen zuverlässigen Mittelwert zu erhalten. Das gilt ebenso für die Betrachtung kleiner zeitlicher Intervalle, bei der eine gute Tracerdichte eine große Rolle spielt, da bei kurzen Messintervallen die Tracer quasi Punktinformationen liefern.

3.1.5 Betrachtungen instationärer Vorgänge

Die 3D-PTV wurde bisher nur für die Gewinnung von Mittelwerten des Wasserspiegels und der Fließgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Ermittlung von Schwankungsbreiten, Standardabweichungen etc. über die gesamte Aufnahmedauer eingesetzt. Ein Potenzial des Messverfahrens liegt wegen der räumlichen Auflösung aber auch in der Betrachtung von instationären Vorgängen, wie z. B. dem Füllvorgang einer Schleuse oder des Ablaufs einer Ganglinie.

Bei instationären Vorgängen ist die Bildung zeitlicher Mittelwerte nur in Sonderfällen, z. B. zur Ermittlung der mittleren Anstiegsgeschwindigkeit des Wasserspiegels, sinnvoll, sodass die Auswertung in kleinen Zeit-

schritten erfolgen sollte, um die Veränderung der Strömung und des Wasserspiegels in Abhängigkeit der Veränderung des Abflusses auflösen zu können. Die Strömung muss also in den gewählten Zeitschritten als quasi-stationär behandelt werden. Ob die Voraussetzungen hierfür erfüllt werden ($\Delta v \ll v$, $\Delta H_i \ll \Sigma \Delta H_i$), muss im Einzelfall geprüft werden.

Ein Problem bei der zeitlichen Diskretisierung kann auftreten, wenn die Teilchendichte nicht ausreichend ist. Bei einer Aufnahme- und Mittelungsdauer von einigen Minuten können durch die kontinuierliche Zugabe von Tracern ausreichende Teilchendichten erreicht werden. Soll ein sehr kurzer Zeitabstand betrachtet werden, müssen die Tracer gleichmäßig, flächendeckend und in ausreichender Anzahl zugegeben werden.

Soll nur die Veränderung des Wasserspiegels beobachtet werden, können die Tracer, z. B. durch Drähte bzw. ein Drahraster, in ihrer Lage fixiert werden.

3.2 Abgrenzung zu anderen Messsystemen

3.2.1 2D-PTV

Grundsätzlich unterscheiden sich die Systeme 2D- und 3D-PTV in der Auflösung der Höhenkomponente. Zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten arbeiten beide Verfahren nach dem gleichen Prinzip und können beide angewandt werden, solange die Geschwindigkeitskomponente in Richtung des Erdmittelpunkts vernachlässigbar ist und die Wasserspiegellagen nicht interessieren.

Einem wesentlich vereinfachten Aufbau der 2D-PTV und der damit verbundenen größeren Mobilität stehen Abstriche in der Messgenauigkeit gegenüber. Eine weitere Einschränkung der 2D-PTV besteht in der Tatsache, dass für die Entzerrung des Bildes schwimmende, in ihrer Lage fixierte Punktmarken verwendet werden, deren Lage in der Ebene des Wasserspiegels vorausgesetzt ist. Der Wasserspiegel wird ideal als Ebene angenommen. Ergebnisse bei unebenem Wasserspiegel können nicht gewonnen werden oder beinhalten Messfehler. Bei Kenntnis der inneren Orientierung der Kamera-Objektiv-Kombination kann die Lage der Tracer im Bild für ebene Problemstellungen berechnet werden. Die Ungenauigkeiten entstehen vor allem durch die zumeist nicht ideal ebenen Wasserspiegel, was einen Einfluss sowohl auf die Position der Tracer als auch auf die Höhe der Punktmarken hat.

Der erforderliche, zueinander starre Messaufbau der Kameras bei der 3D-PTV ist nicht in jedem Fall zu gewährleisten und wegen der hohen Anforderungen der weiterverarbeitenden Programme an die Messgenauigkeit kann unter Umständen überhaupt keine Auswertung erfolgen. In einem solchen Fall (z. B. in großen Modellen, in denen ständiges Umsetzen des Sys-

tems vorgenommen werden muss oder bei Naturmessungen) kann sich der Einsatz der 2D-PTV als zielführend, weil einzig möglich, erweisen.

Ein weiterer Vorteil der 2D-PTV besteht in dem größeren Aufnahmefeld, bedingt durch den Einsatz lediglich einer Kamera, wohingegen beim Einsatz der 3D-PTV die Bilder dreier, notwendigerweise geneigter Kameras zur Überdeckung gebracht werden müssen, woraus ein deutlich kleinerer Bildausschnitt resultiert.

Letztendlich ist ein 3D-System durch die Anschaffung der Software sowie leistungsfähiger Rechner und der dreifach benötigten Kamerahardware deutlich teurer.

3.2.2 Particle-Image-Velocimetrie (PIV)

Im Gegensatz zur PTV, wo einzelne, diskrete Teile über Kontraste verfolgt werden, arbeitet die PIV mit der Verfolgung von Strukturen, deren Bewegung aus einem Mustervergleich (Kreuzkorrelation) aufeinander folgender Bilder ermittelt wird [Lausen, Weitbrecht 1999], [Lausen et al. 2001]. Im Fluid enthaltene oder zugegebene Partikel dienen als Strukturelemente. Durch den Vergleich von Strukturen erhält man zunächst von Bild zu Bild (bei entsprechend kleiner Intervalldauer und Tracerdichte) eine Momentaufnahme der Strömung. Durch Überlagerung einzelner Sequenzen können auch Mittelwerte der Geschwindigkeiten über größere Zeiträume gebildet werden.

Da oftmals die Fließgeschwindigkeiten in lediglich einer Ebene interessieren (Sonderfall Wasserspiegel), wird die PIV im wasserbaulichen Versuchswesen häufig in Kombination mit einem Laserlichtschnitt benutzt, durch den eine Ebene definiert werden kann. Der Vorteil der PIV liegt in der Möglichkeit, flächige Geschwindigkeiten innerhalb des Wasserkörpers oder in Luft (AD-Modelle) messen zu können. Auch ist durch die Verfolgung von Strukturen die Diskretisierung in extrem kleinen Zeitschritten möglich (200 bis 1000 Hz). Allerdings müssen entsprechende Strukturen vorhanden sein oder erzeugt werden, was sich beim Einsatz von Lasern mit sehr kleinen Bildausschnitten durch die Zugabe von z. B. Farbe oder Luftbläschen erfüllen lässt. Bei der Aufnahme von größeren Bildausschnitten ohne Laser ist die Verfolgung von Luftblasen in Turbulenzen oder eines Schaumfilms auf der Wasseroberfläche denkbar.

Nachteile der PIV sind der aufwändige Aufbau, die Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen beim Einsatz eines Lasers und der sehr kleine Bildausschnitt, der sich beim Verfahren mit Laser ergibt. Beim Verfahren ohne Laser entfallen diese Nachteile, die Einschränkung besteht dann darin, dass eine Identifikation der Messebene nicht ohne Weiteres möglich ist.

4 Zusammenfassung

Der Aufbau und Betrieb der 3D-PTV erfordert fachkundiges Personal und muss mit höchster Genauigkeit durchgeführt werden. Der hohe Datenanfall erfordert leistungsfähige Hard- und Software.

Die Stärken des Systems liegen in der Auswertung von Wasserspiegeln und Fließgeschwindigkeiten in Modellen mit ebenem oder gewölbtem Wasserspiegel durch die Betrachtung eines zur Mittelwertbildung ausreichend langen Zeitraums. Die Ermittlung von Schwankungsbreiten, Standardabweichungen etc. über eine statistische Auswertung lässt Aussagen über Eigenschaften wie Turbulenzgrad (je nach Skala muss hier die Größe der Tracer und deren Folgevermögen beachtet werden), Gleichförmigkeit und Instationarität zu.

Die Auflösung der Wasserspiegellagen funktioniert unter perfekten Randbedingungen bis in den Zehntelmillimeterbereich. Im Versuchsbetrieb wurde eine Genauigkeit von bis zu 0,3 mm erreicht. Die Lagegenauigkeit ist ca. um den Faktor 3 besser.

Bei der Auflösung von kleinen zeitlichen Intervallen zur Momentaufnahme der Strömung muss auf die Verteilung der Tracer im Bild geachtet werden, da eine zu geringe Tracerdichte nicht ausreichende Informationen liefert und eine zu hohe Tracerdichte, bzw. direkt nebeneinander schwimmende Teile die Auswertung erschweren.

Abschließend sei auf die zeitintensive Auswertung hingewiesen, die, in Abhängigkeit der Traceranzahl und der Aufnahmefrequenz, inklusive der Messung der Punkte in den Bildtripeln, der Zuordnung der Bahnlinien, der Transformation und der Plausibilisierung das Fünzigfache der Aufnahmedauer erreichen kann.

Vorteile

- Berührungslose Messung von Oberflächengeschwindigkeiten und Wasserspiegel.
- Zwei wesentliche hydraulische Parameter werden gleichzeitig gemessen.
- Sehr gute erreichbare Genauigkeiten.
- Großflächige (großräumige) Ergebnisse (mehrere Quadratmeter im Labor).
- Zeitgleiche Erfassung ganzer Strömungsfelder.

Einschränkungen

- Hohe Anforderungen an Mess- bzw. Systemgenauigkeit.
- Aufwändige Auswertung.
- Ausschließlich Messung von Oberflächengeschwindigkeiten.
- Messwerte nur dort, wo auch Tracer vorhanden sind.

Mit der 3D-PTV steht ein hochgenaues System zur räumlichen Erfassung von Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegeln zur Verfügung. Die Notwendigkeit dessen Einsatzes ist wegen der genannten Einschränkungen durch Vergleich mit anderen Messsystemen zu prüfen.

5 Literatur

ANLAUF, A.; HENTSCHEL, B. (2002): Untersuchungen zur Wirkung verschiedener Buhnenformen auf die Lebensräume in Buhnenfeldern der Elbe. In: Geller, W.; Puncocar, P.; Guhr, H.; von Tümpling jun. W.; Medek, J.; Smrták, J.; Feldmann, H.; Uhlmann, O. (Eds.): Die Elbe – neue Horizonte des Flussgebietsmanagements. 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar. Teubner, Stuttgart Leipzig Wiesbaden, pp.199-202.

ATV-DVWK 2003: Feststofftransportmodelle für Fließgewässer, ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, März 2003, pp 250-251.

BAW 2004: FuE-Projekt: Schlauchwehre an Bundeswasserstraßen, 2. Bericht über die physikalische Modelluntersuchungen an Schlauchwehren, BAW 2004.

GODDING/HENTSCHEL/KAUPPERT (2003): Videometrie im wasserbaulichen Versuchswesen. In: Wasserwirtschaft 4/2003, S. 36-40.

GRIMM et al. (2006): Entwicklungsstand der physikalischen Modelluntersuchung von Schleusen und Wehren. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 90

HENNING (2000): Untersuchung zur Auswirkung des Buhnenwinkels auf die Strömungsvorgänge in Buhnenfeldern. Diplomarbeit, Technische Universität Karlsruhe.

HENTSCHEL, B.; ANLAUF, A. (2001): Ökologische Optimierung von Buhnen in der Elbe. In: Weitbrecht, V.; van Mazijk, A. (Eds.): Bericht zum Workshop UFZ Leipzig-Halle, Magdeburg 22./23. Oktober 2001, pp.121-133.

KARG (2005): Untersuchungen zur Hydraulik durchrisener Buhnen. Diplomarbeit angefertigt an der Bundesanstalt für Wasserbau und der FH Karlsruhe.

KLEINWÄCHTER; EGGERS; HENNING; ANLAUF; HENTSCHEL; LARINK (2005): Distribution Patterns of Terrestrial and Aquatic Invertebrates Influenced by Different Groyne Types at the River Elbe (Germany). Archiv für Hydrobiologie, Large River Supplement.

LAUSEN, R.; WEITBRECHT, V. (1999): Einführung eines PIV-Messsystems an der BAW, Karlsruhe.

LAUSEN/PAVLOWSKI/SENGSTOCK (2001): Anwendung von Ganzfeldmessverfahren an der BAW, Karlsruhe.

LUHMANN, T. (2003): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Verlag Wichmann

OERTEL SEN., H. ; OERTEL JR., H. (1989): Optische Strömungsmesstechnik 1. Verlag G. Braun, Karlsruhe