

## VISUALISIERUNG VON ÜBERSTRÖMUNG UND NACHLAUF VON SOHLENSCHWELLEN MIT PIV

### OVERFLOW AND WAKE VISUALISATION OF SILLS WITH PIV

**Joachim Lengricht, Henriette Katscher, Ralf Bendel**

Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Professur Grundbau und Wasserbau  
Marschnerstraße 31, 04109 Leipzig

Störkörper in der Gerinneströmung, hydraulische Wirksamkeit, Wirbelaktivität, PIV

Baffle blocks in open channel flow, hydraulic efficiency, vorticity, PIV

#### Zusammenfassung

Für das Strömungsbild und die Energiedissipation an umströmten Körpern ist die Körpergeometrie entscheidend. In experimentellen Untersuchungen wird die Überströmung verschiedener sohlenfester Schwellen mit der Particle Image Velocimetrie visualisiert, um den Einfluss der geometrischen Gestaltung des Schwellenquerschnitts auf die Ausbildung von Wasserspiegellinie, Nachlauf und Totraum zu beurteilen. Zusätzlich werden die Strömungsgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsprofile in der Nachlaufzone sowie die Wirbelbildung erfasst und bewertet. Im kleinmaßstäblichen Versuch werden Ablösungs-, Rezirkulations- und Wiederanlagezonen aufgenommen und Geschwindigkeitsgradienten und Turbulenzintensitäten bestimmt. Im Ergebnis werden die verschiedenen Schwellengeometrien hinsichtlich ihrer Umströmungseigenschaften verglichen.

#### Einleitung

Die hydraulische Bemessung von Tosbecken und Fischpässen wird wesentlich von der Um- und Überströmung von Störkörpern bestimmt. In Tosbecken soll die kinetische Energie des einschließenden Wassers umgewandelt werden (Froudezahl  $Fr > 1$ ) und der Fließwechsel hin zum Strömen erzwungen werden ( $Fr < 1$ ). In durchströmten Fischauf- und -abstiegsanlagen werden mit Hilfe von Störelementen Beruhigungszonen für Fische und Wirbellose geschaffen. Bei deren Planung ist insbesondere die Ausbildung der Ruhezone und Toträume hinter diesen Störkörpern, die durch natürliche Steine gebildet oder künstlich aus Beton hergestellt werden können, von Interesse. In beiden Fällen wird die hydraulische Wirksamkeit der umströmten Körper maßgeblich von deren Geometrie bestimmt.

#### Fragestellung

Die störkörperinduzierte Strömungsbeeinflussung in Abhängigkeit von der Körpergeometrie wird untersucht, um die hydraulische Wirksamkeit der Störkörper vergleichend zu beurteilen. Dazu werden in der hier vorgestellten Untersuchung zunächst Schwellen herangezogen, deren Bereite exakt der des wasserdurchströmten Querschnittes entspricht. Die von sohlenfesten Störelementen im Strömungsregime verursachten Veränderungen waren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, sind jedoch bis heute nicht hinreichend erforscht worden (vgl. Balkowski 1976, Karki 1972, Peterka 2005).

# 13.2

## Methodik

Das Widerstandsverhalten von Störkörpern in schießender Wasserströmung wird anhand von sohlenfesten Schwellen untersucht. Es werden vier verschiedene Querschnittsformen herangezogen, die experimentelle Untersuchung erfolgt in der Strömungsrinne der Professur Grundbau und Wasserbau der Universität Leipzig (6,00 m Länge, 0,15 m Breite, 0,30 m Höhe). Die Visualisierung der Überströmung der Schwellen wird mit der Particle Image Velocimetrie (PIV) realisiert.

Um die Abhängigkeit der Wasserspiegellagenentwicklung und der Nachlaufausbildung von der Geometrie der Schwellen festzustellen, wird eine Variation der Schwellengeometrie vorgenommen. Gewählte Schwellenprofile sind Dreieck, Quadrat, symmetrisches Trapez und asymmetrisches Trapez. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird durch eine definierte geometrische Ähnlichkeit erreicht, die Schwellenhöhe beträgt einheitlich 10 mm.

## Versuchsaufbau

Sohle und Wände der Strömungsrinne bestehen aus farblosem, durchsichtigem Plexiglas. Um die verschiedenen Schwellenformen zu untersuchen, wird ein Laserlichtschnitt von unten durch die Sohle in den Strömungsquerschnitt gelegt, die Beobachtung der Strömungsvorgänge erfolgt durch die Rinnenwand (vgl. Abb. 1).

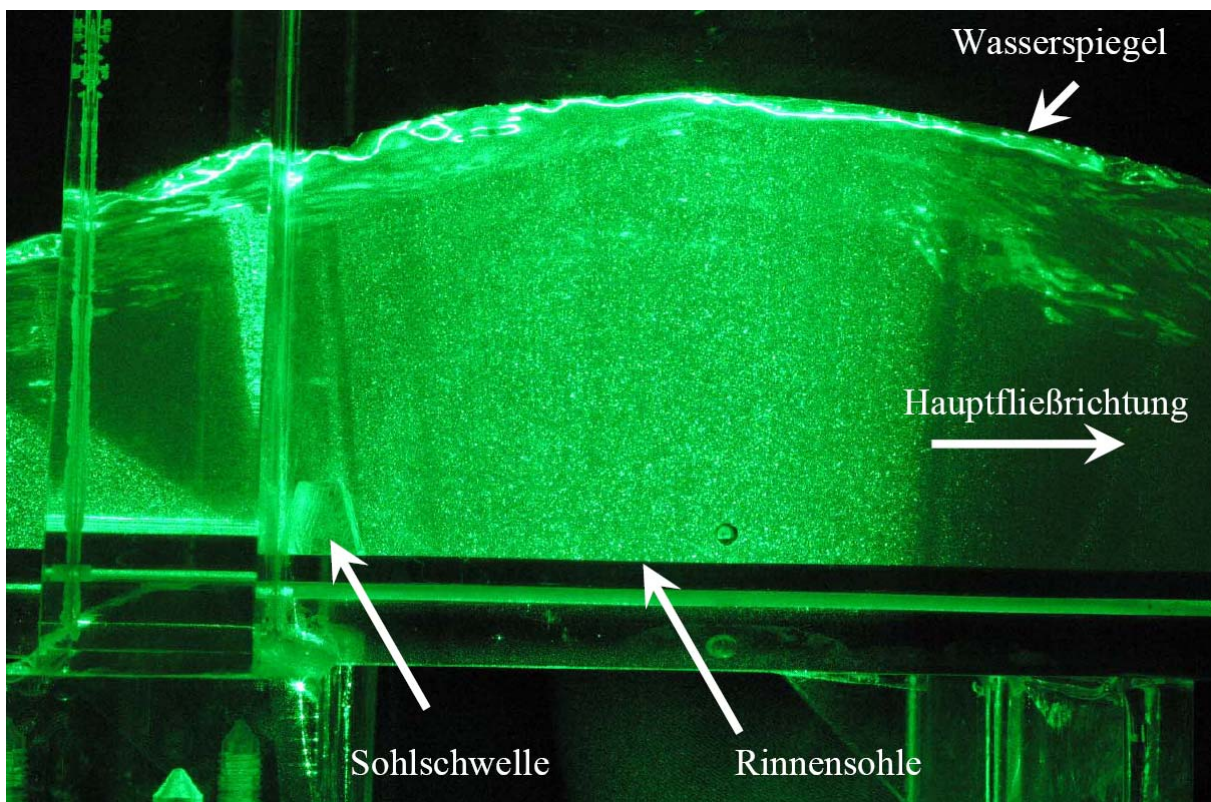


Abb. 1: Überströmung und Nachlauf der Sohlschwelle im Laserlichtschnitt, Fotografie

Die Variation der Froudezahl gelingt über ein unterströmtes Schütz mit veränderlichen Öffnungsweiten  $h_s$  und variable Gerinneneigungen. Am Ende der Versuchsstrecke ist ein Wehr der Höhe  $h_w$  angebracht, das die Einstellung eines festen Wasserstandes im Unterwasser der Schwelle ermöglicht.

Zwischen unterströmtem Schütz und Wehr wird in einem frei wählbaren Abstand die feste Sohlenschwelle in die Rinne eingebaut (vgl. Abb. 2 und Abb. 3).

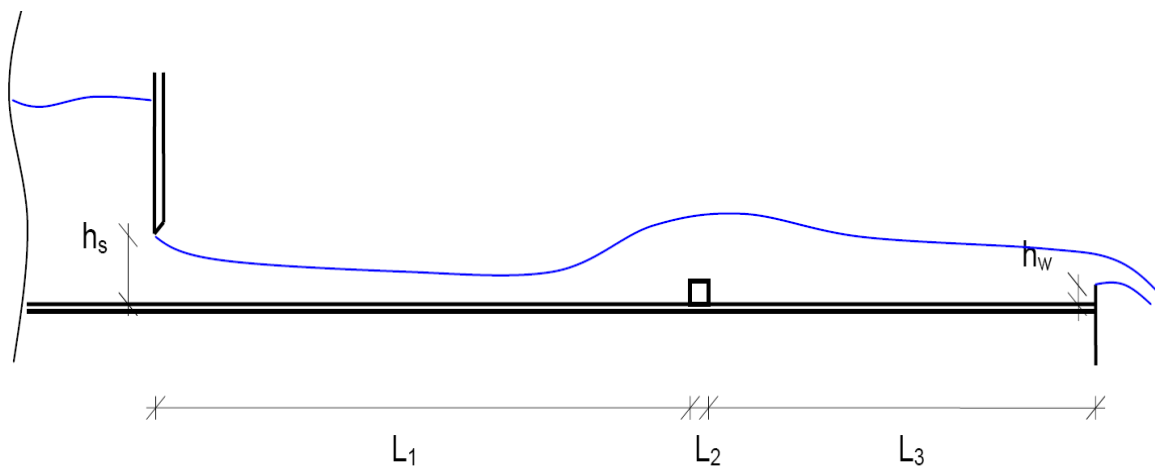


Abb. 2: Versuchsstand, schematisch

Querschnittsform	$L_1$ [mm]	$L_2$ [mm]	$L_3$ [mm]	$h_s$ [mm]	$h_w$ [mm]
Dreieck	235 - 299	83 83	325 - 392	48 48	12 12
Quadrat		10 10		48 48	12 12
Symm. Trapez		11 11		48 48	12 12
Asymm. Trapez		16		48	12

Abb. 3: Abmessungen des Versuchsstandes

Der verwendete Laser ist ein New Wave Mini YAG Laser mit einer Energie von 120 mJ pro Impuls und einer maximalen Pulsfrequenz von 15 Hz. Mit einer 10-30 PIV Kamera sind s/w-Bilder mit einer maximalen Bildfrequenz von 30 Hz und 1 Mio. Bildpunkten aufgenommen worden.

Ein Mono-PIV-System ist für die beschriebene Messaufgabe geeignet, da für eine Darstellung der Überströmung von Schwellen zunächst die Geschwindigkeiten in einer durch den Laserlichtschnitt zu definierenden 2D-Ebene von Interesse sind. Bewegungen quer zur Lichtschnittebene sind bei Versuchen mit Störkörpern, die sich nicht über die gesamte Breite des Rinnenquerschnitts erstrecken, von Bedeutung.

Weiterer Bestandteil des Versuchsaufbaus ist ein TSI Synchronizer, mit dem die Steuerung von Laser und Kamera über den PC gewährleistet wird.

# 13.4

## Versuchsdurchführung

Durch die Visualisierung der Schwellenüberströmung mit PIV wird der Einfluss der geometrischen Gestaltung des Schwellenquerschnitts auf die Ausbildung von Wasserspiegelinie, Nachlauf und Totraum beurteilt.

Die untersuchten Schwellenquerschnitte sind Quadrat, Dreieck, symmetrisches Trapez und asymmetrisches Trapez mit lotrechter angeströmter Vorderkante (vgl. Abb. 4).

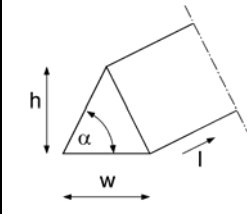
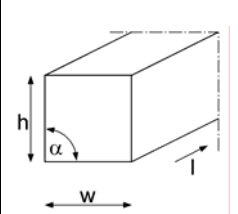
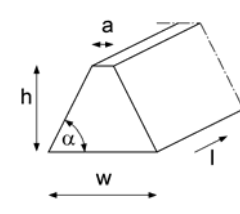
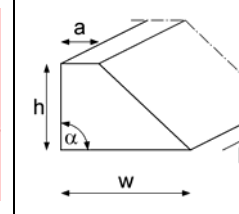
	Dreieck	Quadrat	Trapez, symm.	Trapez, asymm.
				
h [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0
w [mm]	8,3	10,0	11,0	16,0
a [mm]	-	-	6,0	6,5
l [mm]	150	150	150	150
$\alpha$ [°]	67°	90	76°	90

Abb. 4: Abmessungen der untersuchten Schwellenformen (Genauigkeit 1/10 mm)

Im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist eine geometrische Ähnlichkeit definiert worden: Die Höhe aller betrachteten Schwellen beträgt 10 mm. Die Länge quer zur Hauptströmungsrichtung beträgt einheitlich 150 mm, alle Schwellen erstrecken sich über die gesamte Breite des Gerinnequerschnitts.

Die Schwellen unterscheiden sich hinsichtlich der Neigung der Anströmfläche unter dem Winkel  $\alpha$  und der Breite der Aufstandsfläche  $w$ . Durch die schräge Anströmfläche wird bei der Dreiecksform und beim symmetrischen Trapez ein Teil der Strömung nach oben abgelenkt. Dem gegenüber steht die relativ kleine Aufstandsfläche der Dreiecksform. Der Quader- und der asymmetrische Trapezquerschnitt sind durch eine senkrecht zur Hauptströmungsrichtung ausgerichtete Anströmfläche gekennzeichnet, verfügen dabei jedoch über relativ große Aufstandsflächen, durch die die Stabilität des Elementes erhöht wird. Das asymmetrische Trapez, das nach Peterka eine besonders geeignete Störkörperform für Tosbecken darstellt, weist eine fast doppelt so große Aufstandsfläche wie die Dreiecksform auf (Peterka 2005).

Durch die Einstellung verschiedener Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserstände wird eine Variation der Froudezahl von 0,5 ( $Fr < 1$ , strömender Fließzustand) bis 3,5 ( $Fr > 1$ , schießender Fließzustand) erreicht.

Im Fokus der Untersuchung stehen die schwellenbeeinflusste Wasserspiegellagenentwicklung und Nachlaufausbildung, die hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeiten und der Wirbelintensität verglichen werden. Des Weiteren werden die Abmessungen des Totraumes sowie die Rezirkulation und die Wiederanlage der Strömung erfasst. Zur Ergänzung dieser Angaben wird die Intensität des Luftblaseneintrages in das Fluid aus den PIV-Aufnahmen abgeleitet.

## Ergebnisse

Generell können die Unterschiede der verschiedenen Schwellenformen unter den gewählten Versuchsbedingungen als relativ gering beschrieben werden, bei gleicher Froudezahl stellt sich ein ähnlicher Strömungsverlauf für alle Schwellenformen ein. Dennoch lassen sich deutliche Tendenzen beim Vergleich der Schwellenformen und Fließzustände feststellen.

Der maximale Wasserstand über der Schwelle bzw. in deren Nachlauf ist bei Schwellen mit schräger Frontfläche (Dreieck, symmetrisches Trapez) höher als bei senkrechter Frontfläche (Quadrat, asymmetrisches Trapez) (vgl. Abb. 5).

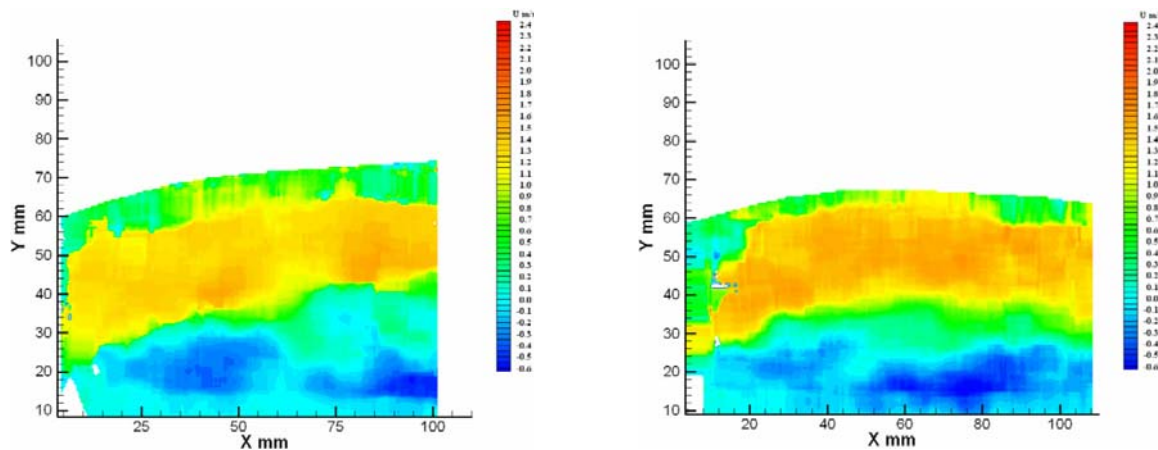


Abb. 5: Überströmung von Dreieck und Quadrat  $Fr = 2,75$  (Bendel 2007)

Die Beobachtungen zeigen, dass die Hauptströmung durch die geneigte Frontfläche zur Wasseroberfläche hin geleitet wird und infolgedessen eine Erhöhung des Wasserstandes verursacht. Dass sich der Nachlauf bei Schwellen mit geneigter Frontfläche infolgedessen über eine längere Distanz ins Unterwasser hin ausbildet ist anzunehmen, mit den bisherigen Ergebnissen jedoch noch nicht belegbar.

Im unteren Froudezahlbereich ( $Fr = 0,5$ ) befindet sich der höchste Wasserstand direkt über der Schwelle, im Nachlauf der Schwelle sinkt der Wasserstand ab. Mit steigender Froudezahl erhöht sich der maximale Wasserstand und wandert stromab, der Anstieg der Wasseroberfläche wird dabei nicht steiler (vgl. Abb. 6).

Im oberen Froudezahlbereich ( $Fr = 3,5$ ) ist ein Einfluss der Schwellen kaum feststellbar. Das Wasser schießt über die Schwelle und das Geschwindigkeitsprofil zeigt bereits nach  $L = 6h$  bis  $7h$  wieder das typische Geschwindigkeitsprofil einer ungestörten Gerinneströmung.



## 13.6

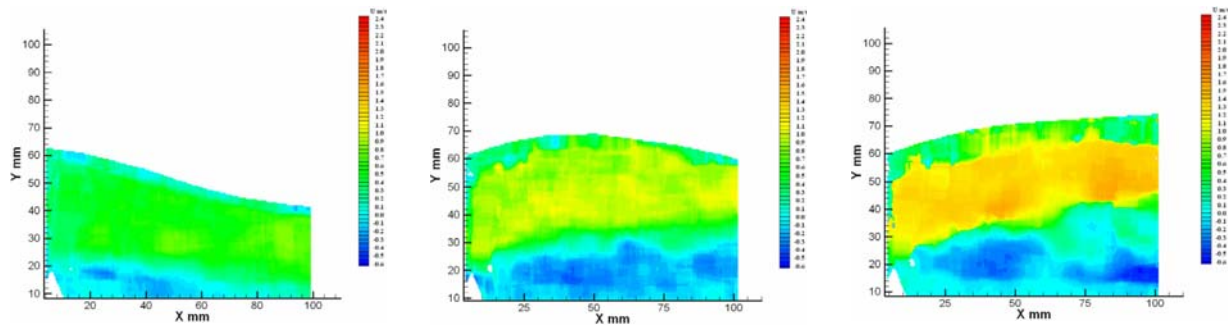


Abb. 6: Überströmung der Dreiecksschwelle bei  $Fr = 0,50 / 2,0 / 2,75$  (von li. nach re.) (Bendel 2007)

Mit zunehmender Froudezahl steigt die Länge der Nachlaufzone an und die Wirbelbildung nimmt zu. Eine Zunahme des Lufteintrages von der Wasseroberfläche ist zu verzeichnen, die Luftblasen reißen von den scharfen Schwellenkanten ab (vgl. Abb. 7). Die Maxima von Wirbelbildung und Lufteintrag stellen sich an der oberen Abrisskante des dreieckförmigen Schwellenquerschnittes ein.

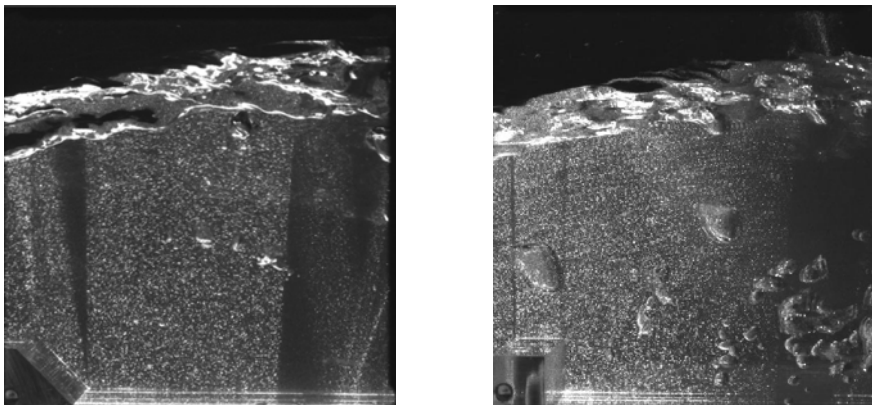


Abb. 7: Luftblaseneintrag

### Ausblick

Der Verlauf der Wasserspiegellinie, die Strömungsgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsprofile in der Nachlaufzone, die Wirbelbildung und die Abmessungen des Totraumes sind für verschiedene Lastfälle bzw. Initialströmungen erfasst und bewertet worden. Dazu sind die Körperüberströmungen örtlich und zeitlich aufgelöst worden. Die Identifikation von Ablöseblasen-, Rezirkulations- und Wiederanlagezonen und die Bestimmung von Geschwindigkeitsgradienten und Turbulenzintensitäten standen hier zunächst im Fokus und werden ebenso Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Anknüpfend an die Untersuchungen von Ikhwan und Ruck zu luftumströmten Körpern (vgl. Ikhwan und Ruck, 2006) werden derzeit mit der Stereo Particle Image Velocimetrie die räumlichen Effekte für verschiedene Wassertiefen und Körperhöhen erfasst, um mit parallelen Kraftmessungen an den Störkörpern zu einer Bewertung der hydraulischen Wirksamkeit unterschiedlicher Störkörperformen zu gelangen.

## Dankesworte

Besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Kai-Uwe Graw für die leihweise Überlassung des verwendeten PIV-Systems. Prof. Graw leitete bis zu seinem Wechsel an die TU Dresden im Oktober 2005 die Professur Grundbau und Wasserbau der Universität Leipzig.

## Literatur

Balkowski, M. et al., 1976: Zur Umströmung hintereinander liegender, wandfester Störkörper, Aerodynamisches Institut der RWTH Aachen, Fachgruppe Maschinenbau/Verfahrenstechnik, Westdeutscher Verlag, Aachen

Bendel, R., 2007: Untersuchung der Um- und Überströmung von Störkörpern mit Particle Image Velocimetry, Professur Grundbau und Wasserbau, Universität Leipzig, unveröffentlicht

Ikhwan, Muhammad und Ruck, Bodo, 2006: Flow and pressure field characteristics around pyramidal buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 94, pp. 745-765

Karki, K.S. et al., 1972: Supercritical Flow over Sills at Incipient Jump Condition, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 10, pp. 1753-1764

Peterka, A.J., 2005: Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, University Press of the Pacific Honolulu, Hawaii, Neuauflage der Originalausgabe von 1957