

## DISSIPATIONSINDIKATOREN HINTER STÖRKÖRPERN IM FREISPIEGELABFLUSS ERFASST MIT STEREO-PIV

### DISSIPATION INDICATORS BEHIND BLUFF BODIES IN OPEN CHANNEL FLOW DETECTED BY STEREO-PIV

**Helge Fuchs, Henriette Katscher, Joachim Lengricht**

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

Störkörper in der Gerinneströmung, hydraulische Wirksamkeit, Wirbelaktivität, Totraum, PIV  
Baffle blocks in open channel flow, hydraulic efficiency, vorticity, dead water, PIV

#### Zusammenfassung

Die hydraulische Wirkung von Störkörpern in der Gerinneströmung kann nur beurteilt werden, wenn deren Einfluss auf die Initialströmung bekannt ist. Hierzu ist das Strömungsfeld einzeln stehender Körper mit Stereo Particle Image Velocimetrie erfasst worden. Der Verlauf der Stromlinien wurde analysiert, um die Größe und Form der Großwirbel und des Totwassers zu bestimmen. Wirbel- und Turbulenzintensität wurden ermittelt und als Dissipationsindikator für die unterschiedlichen Körper verglichen. Die Ausdehnung dieses Totraumes gibt Auskunft über die Größe der für die Energieumwandlung in erheblichem Maße verantwortlichen, großskaligen Wirbel im Inneren dieser Rückströmzone. Weiterhin stellt die Umhüllende des Totraumes eine Scherschicht dar, in der durch die Fluidviskosität Reibung erzeugt wird, die die Dissipation entscheidend beeinflusst.

#### Einleitung

Als Störkörper werden künstliche Hindernisse bezeichnet, die das Strömungsfeld energiereicher Strömungen beeinflussen. In Fischpässen werden diese eingesetzt, um Beruhigungszonen für Fische und Wirbellose zu schaffen. Damit soll ihnen die Überwindung von Höhenunterschieden im Flusslauf, die durch schießenden Abfluss ( $Fr > 1$ ) und turbulente Strömung gekennzeichnet sind, ermöglicht werden. Beim Einsatz in Tosbecken steht die Dissipation kinetischer Energie im Vordergrund. Durch die Erzeugung von Großwirbeln, in denen verstärkt kinetische Energie der Strömung durch Impulsaustausch der Wasserpartikel in Wärme umgewandelt wird, soll der schießenden Strömung ein Fließwechsel zu unterkritischen Froude-Zahlen ( $Fr < 1$ ) erzwungen werden. Die Umströmungscharakteristik ist bisher nicht für alle bekannten Störkörperformen (Würfel, Pyramide, Pyramidenstumpf etc.) untersucht worden.

#### Motivation

Der Einsatz kubischer oder pyramidalen Körper als Störkörper in Tosbecken oder zur Beruhigung in Fischpässen, kann nur beurteilt werden, wenn der Einfluss auf die Initialströmung bekannt ist. Erhöhen großskalige Wirbel und hochturbulente Bereiche einerseits die Energiedissipation, so können diese andererseits eine Gefahr für das aquatische Leben sein. Hierzu ist die Nachlaufströmung einzeln stehender Körper mit der Stereo Particle Image Velocimetrie räumlich analysiert worden, um zu einer Beschreibung der hydraulischen Vorgänge zu gelangen und einen Ansatz zu erarbeiten, mit dem die körperinduzierte Dissipation

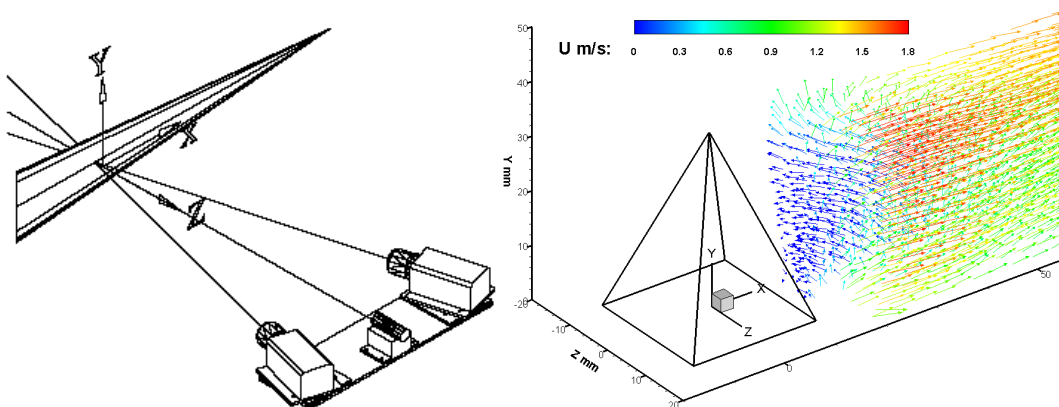
quantitativ bewertet werden kann. Die von sohlenfesten Störelementen im Strömungsregime verursachten Veränderungen waren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen im Windkanal (Martinuzzi & Abu Omar, 2003). Ikhwan (2005) untersucht die Luftumströmung von Pyramiden mit verschiedenen Basiswinkeln und quantifiziert mit LDA und Druckmessungen das gestörte Druck- und Geschwindigkeitsfeld bei der Pyramidenumströmung. Anknüpfend an die Untersuchungen von Ikhwan und Ruck (2006) zum Druck- und Geschwindigkeitsfeld luftumströmter Pyramiden haben Lengricht et al. (2007) begonnen, die räumlichen Effekte der Störkörperumströmung für verschiedene Wassertiefen und Körperhöhen in der Gerinneströmung mit freier Wasseroberfläche zu erfassen, um mit parallelen Kraftmessungen an den Störkörpern zu einer Bewertung der hydraulischen Wirksamkeit unterschiedlicher Störkörperformen zu gelangen.

## Versuchsaufbau

In der Umlaufrinne (Länge 6,00 m, Breite 0,15 m breit und Höhe 0,30 m) der Professur Grundbau und Wasserbau der Universität Leipzig sind zunächst Einzelkörper in zwei Anströmrichtungen (normal zu den Symmetrieachsen) mit der Stereo Particle Image Velocimetry für Froudezahlen  $1,8 \leq Fr \leq 2,5$  im hydraulischen Modell untersucht worden. Verwendet wurden Pyramiden mit verschiedenen Basiswinkeln sowie ein Würfel als Referenzkörper, alle mit einer Projektionsfläche von  $A_{Proj} = 4,0 \text{ cm}^2$ . Systembedingt handelt es sich um wandbefestigte Körper, so dass nicht von einer ungestörten Anströmung  $u_\infty$  ausgegangen werden kann. Um den Einfluss der Grenzschicht, die durch charakteristisch geringere Geschwindigkeiten geprägt ist, auf die Wirbelausbildung ermitteln zu können, ist zusätzlich der Einfluss der Störkörperhöhe geprüft worden.

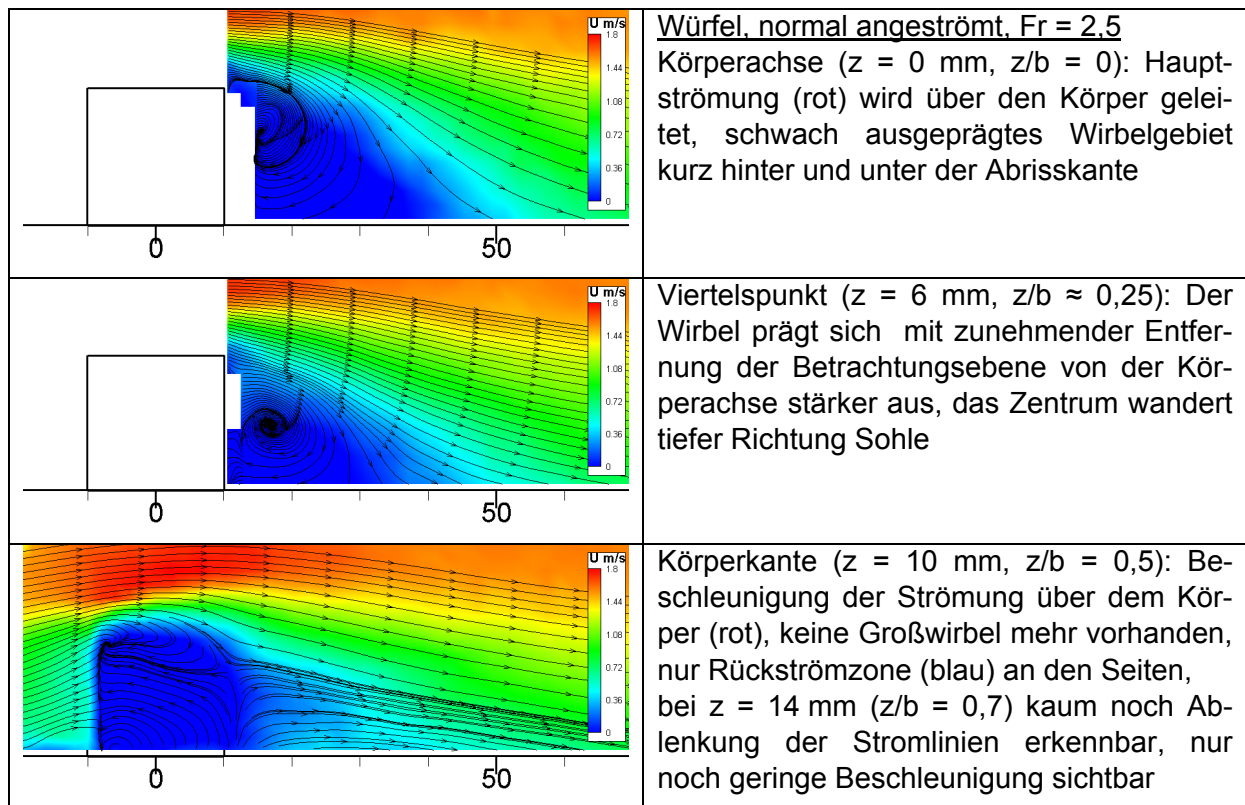
## Visualisierung

Untersucht wurde ein stationärer dreidimensionaler Strömungszustand der in einem räumlichen Koordinatensystem X, Y, Z die zugehörigen Geschwindigkeitskomponenten u, v, und w erhält (siehe Abb. 1).

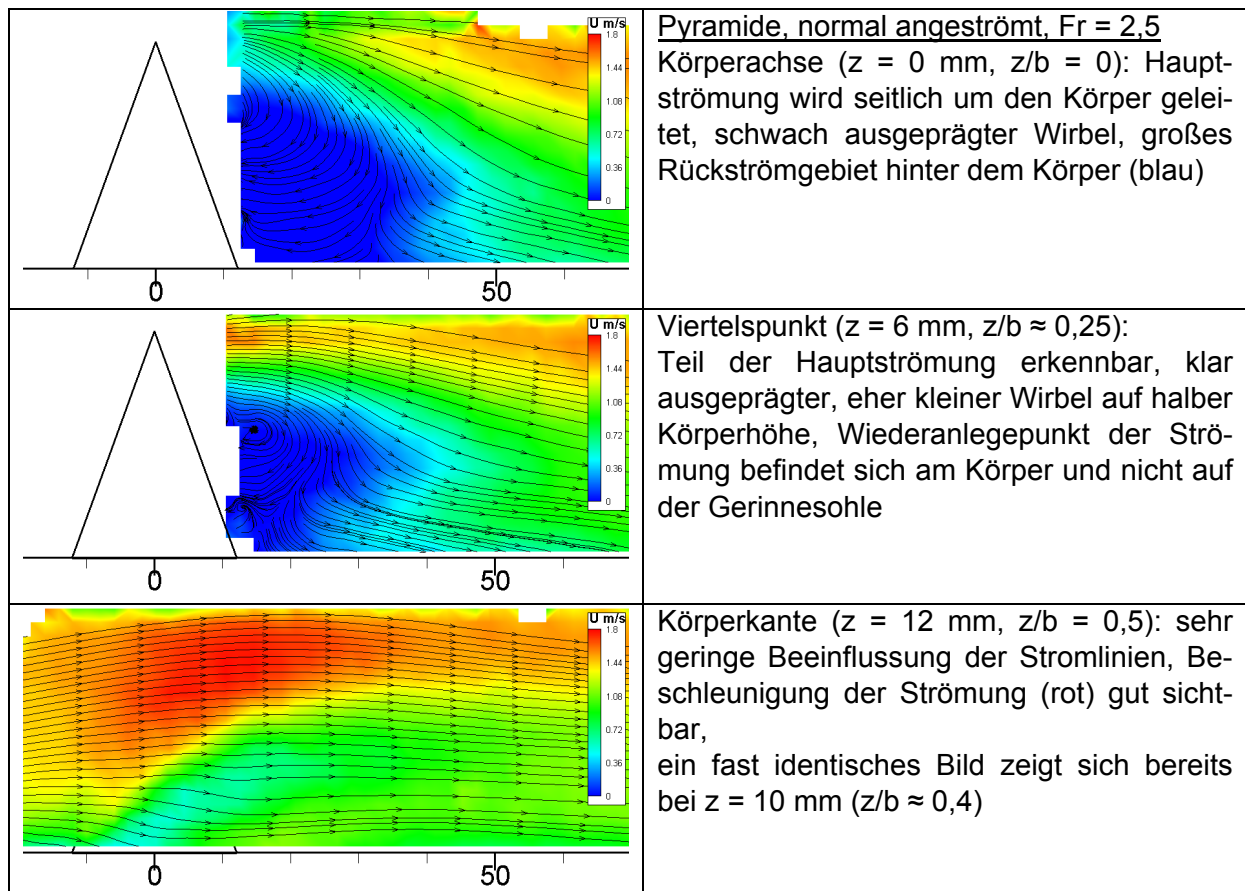


**Abb. 1 Vorzeichendefinition und dreidimensionales Vektorfeld, schematisch**

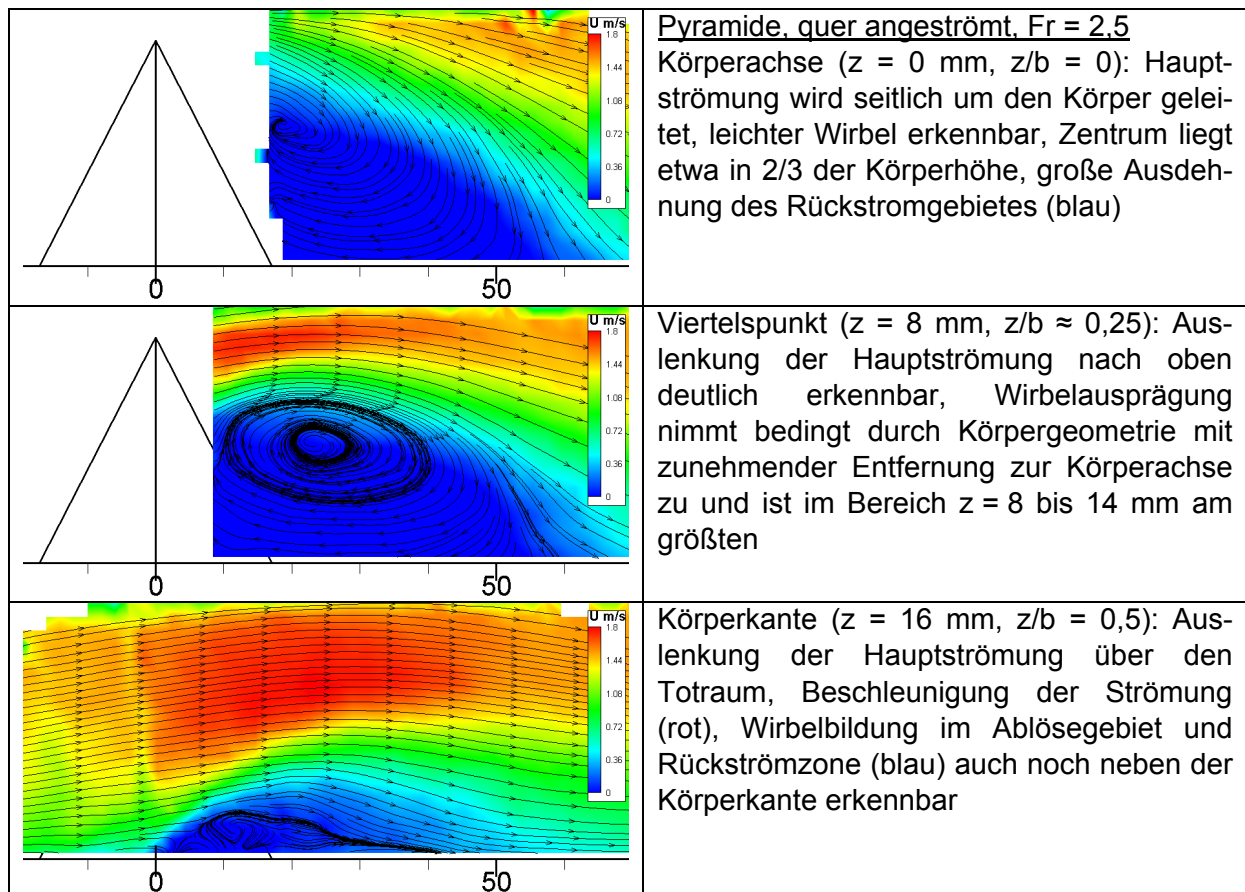
Die Abbildungen 2 bis 4 veranschaulichen die Nachlaufströmung für Kubus und Pyramide. Die Geschwindigkeitsfelder zeigen signifikante Unterschiede der von den unterschiedlichen Störkörpern induzierten Um- und Nachströmung auf. Im Einzelnen verdeutlicht Abb. 2 die Nachlaufströmung für den Kubus. Abb. 3 zeigt die Rückstromgebiete hinter der orthogonal angeströmten Pyramide. In Abb. 4 wird die Beeinflussung der Hauptströmung für den Fall der schräg angeströmten Pyramide besonders deutlich. Zur besseren Einordnung der Position der jeweiligen Betrachtungsebene wurde die normierte Breite  $z/b$  eingeführt.



**Abb. 2** Stromlinienverlauf für den normal angeströmten Würfel in ausgewählten Schnitten



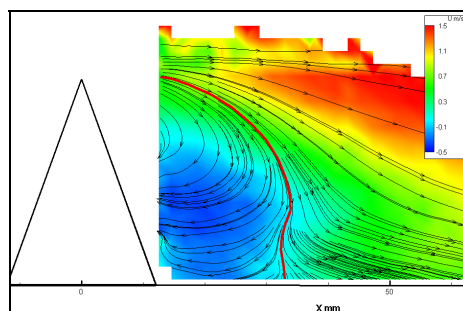
**Abb. 3** Stromlinienverlauf für die normal angeströmte Pyramide in ausgewählten Schnitten



**Abb. 4** Stromlinienverlauf für die diagonal angeströmte Pyramide in ausgewählten Schnitten

### Trennstromlinien

Bei der Strömung reibungsbehafteter Fluide kommt es durch die Umwandlung kinetischer Energie in Wärme zu einem Druckabfall, welcher bei starker Ausprägung die Strömung zur Ablösung zwingt. Man kann in diesem Zusammenhang das Strömungsbild daher in Hauptströmung und Totraum unterteilen. Als Totraum wird die zeitlich gemittelte Ablösezone vor oder hinter einem umströmten Körper bezeichnet. Die physikalische Erscheinung „Totwasser“ ist in Momentaufnahmen als Solches nicht vorhanden. Die Geometrie der Ablösezone ergibt sich vielmehr aus der Überlagerung von Momentaufnahmen über einen diskreten Zeitraum. Die Grenze zwischen Hauptströmung und Totraum ist die Trennstromlinie (in Abb. 5 rot markiert) welche die Verbindungsstromlinie zwischen dem Punkt der Ablösung und dem Wiederanlegepunkt bildet.



**Abb. 5** Verlauf der Trennstromlinie vom Ablösepunkt bis zum Wiederanlegepunkt hinter der normal angeströmten Pyramide bei  $Fr = 2,5$  (Lichtschnitt in Körperachse)

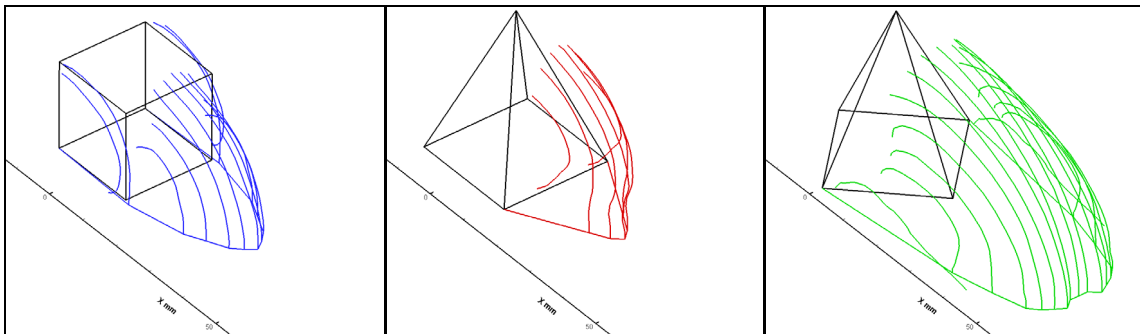
Die Bestimmung der Trennstromlinien erfolgt zweidimensional in der einzelnen Lichtschnittebene.

Die Stromfunktion ergibt sich aus dem Integral des Geschwindigkeitsfeldes über die Höhe  $z$ :

$$\psi(z) = \int_{z_0}^{z_1} u(z) dz . \quad (1)$$

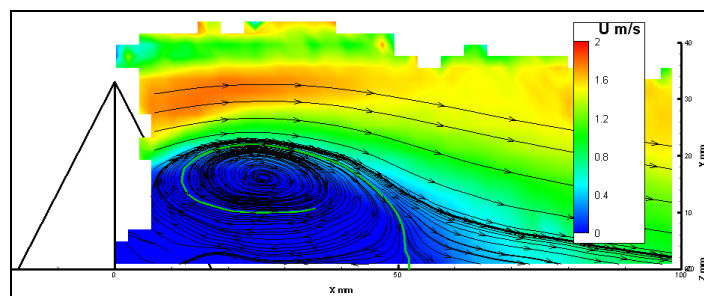
Verbindet man Punkte gleicher Werte der Stromfunktion  $\psi$  so ergibt sich eine Stromlinie. Der Volumenstrom zwischen zwei Stromfunktionen ist per Definition stets konstant. Die analytische Definition des Totraumes erfolgt mit Hilfe der Nullstromlinie mit  $\psi = 0$ , d. h. es gibt zwischen Wand und Stromlinie keinen Volumenstrom in Richtung der Initialströmung.

Durch Auswertung des Stromlinienverlaufs der einzelnen Vektorfelder kann man den Nachlaufbereich der umströmten Körper dreidimensional darstellen. Abb. 6 zeigt den Vergleich des Nachlaufgebietes, charakterisiert durch die Summe der ermittelten Trennstromlinien hinter dem jeweiligen Körper. Die charakteristischen Unterschiede sind dabei gut erkennbar. So bildet sich an den ebenen Seiten des Würfels eine Grenzschicht aus, die die Hauptströmung sowohl seitlich als auch nach oben verdrängt. Hinter der normal angeströmten Pyramide entsteht das kleinste Ablösegebiet, an den Seiten legt sich die Strömung am Körper an. Die diagonal montierte Pyramide erzeugt das größte Ablösegebiet.



**Abb. 6 Vergleich der Trennstromlinien des Kubus mit der normal und quer angeströmten Pyramide bei  $Fr = 2,5$**

Im Seitenbereich des Totwassers der diagonal angeströmten Pyramide wird der Großwirbel von innen heraus genährt. Im Bereich der Körperachse ( $z = 0$  mm,  $z/b = 0$ ) wird dem Großwirbel über die Scherschicht Wasser zugeführt, welches innerhalb der Wirbelströmung zu den Seiten transportiert wird. Erkennbar wird dies im Stromlinienbild daran, dass die rückverfolgte Trennstromlinie nicht zu einem Ablösepunkt führt, sondern ihren Ursprung im Zentrum der Wirbel hat (siehe Abb. 7). Die an der Vorderkante des Körpers abgelöste Hauptströmung legt sich laut Stromlinienbild erst bei  $x_R \approx 120$  mm wieder an, d.h. der gesamte Volumenstrom zwischen dem Wiederanlegepunkt der Trennstromlinie ( $x_R = 53$  mm) und der Hauptströmung ( $x_R \approx 120$  mm) wird aus dem Großwirbel gespeist.



**Abb. 7 Bestimmung der Trennstromlinie; Pyramide mit  $\theta = 70^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $z = 10$  mm,  $z/b = 0,3$ ,  $Fr = 2,5$**

Durch Integration kann unter den ermittelten Trennstromlinien das Totraumvolumen bestimmt werden. Das Verhältnis von Totraumgröße zu Körpervolumen ist für die diagonal angeströmte Pyramide etwa viermal größer als bei den normal angeströmten Körpern. Die Ursache dafür liegt darin, dass die Körpergeometrie die Hauptströmung verstärkt nach oben und seitlich um den Körper lenkt. Die Einzelwerte sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Körper	A <sub>proj.</sub>	V <sub>Körper</sub>	V <sub>Totraum</sub>	V <sub>Totraum</sub> /V <sub>Körper</sub>	V <sub>Totraum</sub> /A <sub>proj.</sub>
Kubus (α = 90°)	4,0 cm <sup>2</sup>	8,0 cm <sup>3</sup>	9,4 cm <sup>3</sup>	<b>1,18</b>	2,35 cm
Pyramide (θ = 70°, α = 90°)	4,0 cm <sup>2</sup>	6,44 cm <sup>3</sup>	7,5 cm <sup>3</sup>	<b>1,16</b>	1,88 cm
Pyramide (θ = 70°, α = 45°)	5,66 cm <sup>2</sup>	6,44 cm <sup>3</sup>	31,5 cm <sup>3</sup>	<b>4,9</b>	5,57 cm

**Tab. 1 Vergleich der Totwassergröße mit dem Volumen der untersuchten Körper**

Der Totraum im Oberwasser des Köpers liegt im Körperschatten und kann nicht ausreichend illuminiert werden. Deswegen kann über diesen Bereich keine Aussage getroffen werden. Vom Punkt der Strömungsablösung ausgehend bis zum Wiederanlegepunkt bildet sich eine Scherschicht, gekennzeichnet durch einen Geschwindigkeitsgradienten analog einer Grenzschicht, aus. Durch Viskosität setzt die Scherschicht Fluid aus dem Totraum in Bewegung, was zu einer Drucksenkung im Totwasser führt. Im Bereich des Wiederanlegepunktes teilt sich die Scherschicht, so dass ein Teil des transportierten Volumens in das Rückströmgebiet befördert wird.

### Viskose Dissipation

Die Fluidviskosität kennzeichnet die Verschiebbarkeit einzelner Fluidpartikel gegeneinander in Anhängigkeit von der inneren Reibung. In reibungsbehafteten Fluiden erzeugt ein aufgeprägter Geschwindigkeitsgradient, bedingt durch die Viskosität, eine Scherspannung

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (2)$$

die in ihrer Größe proportional zur Geschwindigkeitsdifferenz bzw. dem Geschwindigkeitsgradienten ist. Die Wirbelintensität (Vorticity) kann als ein Indikator für die viskose Dissipation ermittelt werden. Sie bestimmt sich aus den Gradienten der Geschwindigkeitskomponenten in Bildebene, u und v:

$$\text{Vorticity} = \frac{\Delta v}{\Delta X} - \frac{\Delta u}{\Delta Y} \left[ \frac{m}{s} \right]. \quad (3)$$

Per Definition ergeben im Uhrzeigersinn drehende Wirbel oder einer der beiden zugehörigen Gradienten eine negative Wirbelintensität und umgekehrt. Die Wirbelstärke der Bodengrenzschicht ist daher stets negativ. Entscheidend für eine große Dissipation ist dabei nicht das Vorzeichen, sondern der Betrag. Beginnend mit der Betrachtung des ungestörten Strömungsfeldes (ohne Körper) wurde die grundsätzlich in der Strömung vorhandene, über den Lichtschnitt gemittelte Wirbelintensität zu Vorticity = -10 (m/s)/m bestimmt. Dieser Wert für die Wirbelintensität in der ungestörten Initialströmung wird verwendet um die durch den Körper hervorgerufenen Geschwindigkeitsgradienten von denen der Initialströmung zu unterscheiden. Dazu wird das Integral über die Wirbelstärke mit Einzelwerten von Vorticity < -10 (m/s)/m der jeweiligen Lichtschnittebene gebildet. Abb. 8 zeigt den Verlauf der durch die Körper induzierten Wirbelintensität (Vorticity < -10 (m/s)/m) der einzelnen Lichtschnittebenen. Im unteren Bereich der Grafik sind zur besseren Übersicht die Konturen der dazugehörigen Körper angedeutet. Im Vergleich produziert die diagonal angeströmte Pyramide in



allen Schnitten die größte Wirbelintensität. Hier wird der größte Totraum und somit die längste Scherschicht erzeugt. Das Maximum der Wirbelstärke ist im Bereich bei  $Z = 10$  bis  $16$  mm zu finden, was dem Bereich der maximalen Ausprägung der seitlichen Großwirbel entspricht (siehe auch Abb. 4, Mitte). Die geringste Wirbelintensität wird von der normal angeströmten Pyramide, dem Körper mit dem geringsten Totraumvolumen, ausgelöst. Der Verlauf der Wirbelstärke ist hier über die Körperbreite annähernd konstant. Zwischen den Graphen der beiden Pyramiden findet sich das Ergebnis für den normal angeströmten Würfel. Das Maximum ist für diesen Körper an den Kanten zu finden, die (wie bereits in Abb. 2, unten ersichtlich) eine große vertikale Scherschicht erzeugen.

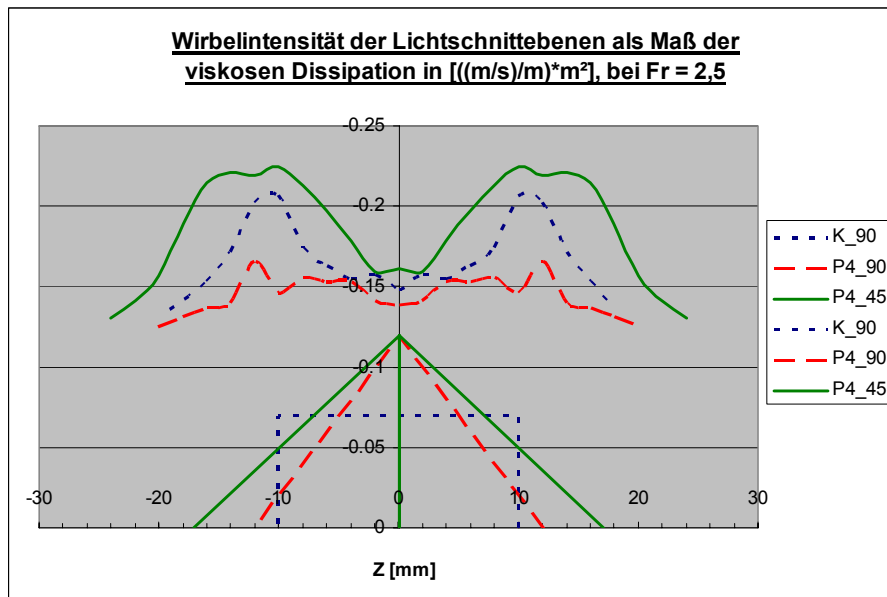


Abb. 8 Verlauf der durch die Körper induzierten Wirbelintensität

### Diffuse Dissipation

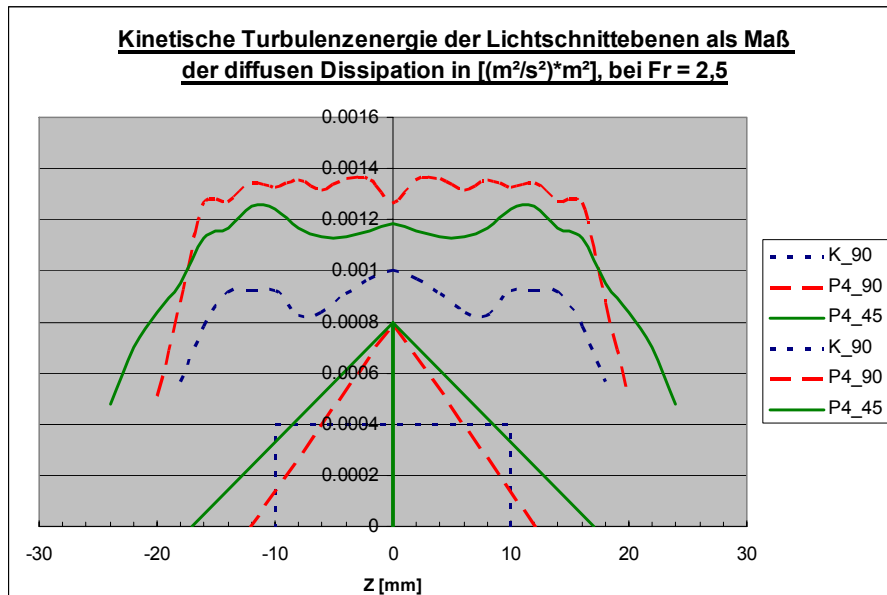
Verschiedene Strömungshindernisse verursachen ein unterschiedliches Maß an Turbulenz und somit Schwankungen der Geschwindigkeit der sie umgebenden Strömung. Die Größe der Geschwindigkeitsschwankungen als Maß für die Produktion turbulenter kinetischer Energie wird beschrieben mit

$$k = \frac{1}{2} \cdot (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \left[ \frac{m^2}{s^2} = \frac{N \cdot m}{kg} \right]. \quad (4)$$

Die hochfrequenten turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen verursachen einen Impulsaustausch zwischen einzelnen Fluidmolekülen, was zur Umwandlung kinetischer Energie in Wärme führt.

Im ungestörten Strömungsfeld ist der gemittelte Einzelwert der vorhandenen turbulenten kinetischen Energie zu  $k_{0,avg} = 0,137 \text{ m}^2/\text{s}^2$  ermittelt worden. Diese turbulente kinetische Energie der ungestörten Initialströmung wird als Vergleichswert zur Bestimmung der körperinduzierten Turbulenzenergie herangezogen. Bestimmt man das Integral der turbulenten kinetischen Energie (mit Einzelwerten  $k > 0,137 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) über den Lichtschnitt, so erhält man den Verlauf der durch die Körper induzierten Turbulenzenergie in den Lichtschnittebenen (siehe Abb. 9). Es kann gezeigt werden, dass sich der durchschnittliche Momentanwert der körperinduzierten turbulenten kinetischen Energie für die verschiedenen Körper nur gering unterscheidet ( $k_{K_90,avg} = 0,275 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ;  $k_{P4_90,avg} = 0,273 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ;  $k_{P4_45,avg} = 0,281 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ). Er entspricht in allen Fällen etwa dem Doppelten der turbulenten kinetischen Energie der Initialströmung und ist über die Körperbreite annähernd konstant. Unterschiede im Verlauf der turbulenten

kinetischen Energie über die Körperbreite erklären sich aus der unterschiedlichen Größe der durch die Körper beeinflussten Bereiche. Im unteren Bereich der Abb. 9 ist schematisch die Geometrie der zugehörigen Körper angedeutet. Es wird ersichtlich, dass die turbulente kinetische Energie, die durch die Pyramide erzeugt wird, sowohl bei senkrechter wie bei schräger Anströmung größer ist, als die von einem Würfel erzeugte turbulente kinetische Energie. Der größte Wert ergibt sich, wenn die Pyramide normal angeströmt wird.



**Abb. 9 Verlauf der durch die Körper induzierten turbulenten kinetischen Energie**

## Ausblick

Für pyramidale und kubische Versuchskörper sind Geschwindigkeitsprofile und Stromlinienverläufe ausgewertet, sowie Wirbelintensitäten und Turbulenzenergien als Dissipationsindikatoren quantifiziert und verglichen worden. Die Pyramide verursacht in diagonaler Anströmrichtung, bedingt durch die Ausbildung seitlicher Großwirbel, die größte Wirbelintensität der untersuchten Körper. Weiterhin ist die von der Pyramide erzeugte kinetische Turbulenzenergie, unabhängig von der Anströmrichtung, größer als die des Würfels.

Im nächsten Schritt sollen die Dissipationsterme verknüpft und die hydraulische Wirksamkeit so analytisch bewertet werden.

## Dank

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Graw und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Horlacher vom Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden für die leihweise Überlassung des PIV Systems.

## Literatur

- Ikhwan, M. und Ruck, B., 2006: Flow and pressure field characteristics around pyramidal buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 94, pp. 745-765
- Ikhwan, M., 2005: Investigation of Flow and Pressure Characteristics around Pyramidal Buildings: Dissertationsschrift; Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe
- Lengricht, J. Katscher, H. und Bendel, R., 2007: PIV as a tool for bluff body design, Lake Placid, New York: Proceedings Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2007, pp. 626 - 631
- Martinuzzi, R. J. und Abu Omar, M., 2003: Study of the flow around surface-mounted pyramids, Experiments in Fluids, Vol. 34, No. 3, pp. 379-389