

Windkanalexperimente zur Bestimmung der Strömungsstrukturen um einen quer zur Anströmung auf einer Bodenplatte lagernden Zylinderabschnitt.

P. Menzel, M. Witte und A. Leder

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

Einleitung

In der Ozeanografie, der Fischerei und anderen Disziplinen der Meeresnutzung stellt das Auffinden und Wiederfinden von Objekten, die am Meeresboden lagern, eine besondere Herausforderung dar. Leistungsfähige Fächerecholote erleichtern hierbei die Suche nach der „Nadel im Heuhaufen“. In Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Meeresbodens und des Sedimenttransports kommt es jedoch aufgrund von turbulenten, bodennahen Strömungen zur Versandung der Objekte. Mit Hilfe experimenteller und numerischer Untersuchungen soll im Rahmen dieses Forschungsprojektes die Versandung von Objekten mit unterschiedlicher Geometrie untersucht werden. Der vorliegende Beitrag stellt erste Ergebnisse zur charakteristischen Strömungsstruktur im Umfeld eines Zylinderabschnitts vor.

Hintergrund und Fragestellung

Die Versandung von Objekten am Meeresboden ist auf eine Reihe von Prozessen zurückzuführen. Im küstennahen Bereich kann sich der Verlauf des Küstenprofils mit der Zeit ändern, so dass ein Objekt am Meeresboden durch einen Sedimentzuwachs verschüttet wird. Ähnlich verhält es sich mit Sanddünen und Rippeln, die auch fern einer Küste auftreten können. Diese können über am Meeresboden lagernde Objekte wandern und somit zur Versandung beitragen. Neben diesen Transportprozessen gibt es auch Vorgänge, bei denen es zur Erosion kommt. Dies geschieht beispielsweise im Flachwasserbereich dort, wo der Einfluss von Oberflächenwellen an Bedeutung gewinnt. Die dabei entstehenden Wirbel tragen Sediment ab, heben es an und verfrachten es. Global betrachtet entsteht so zwar kein Netto-Abtransport, da immer wieder Material nachtransportiert wird, im Nahbereich um das Objekt jedoch kommt es u.U. zur Auskolkung im Auflagebereich und einem damit einhergehenden Einsinken des Objektes. Ein Prozess von besonderem Interesse ist die Auskolkung im Umfeld eines Objektes infolge gleichmäßiger Anströmung, wie sie auch fern der Küste auftritt. Hier kommt es infolge erhöhter Strömungsgeschwindigkeit zur Mobilisierung des Sediments, welches aus Bereichen mit hoher Wandschubspannung abtransportiert wird. Im weiteren Verlauf können die Objekte in den Auskolkungsbereich gleiten und somit nach und nach im Boden versinken.

Welchen Einfluss verschieden Sedimenttransportprozesse auf die Versandung eines Objektes am Meeresboden haben, soll mit Hilfe von Laborversuchen und numerischen Simulationen untersucht werden. Als Probekörper dient ein auf einer Endscheibe lagernder Zylinder. In ersten Versuchen wurde das Nachlaufgebiet unter Einhaltung der Reynoldszahl vermessen. Aus dem so bestimmten Geschwindigkeitsfeld wurden die am Zylinder angreifenden Momente bestimmt, um eine Vorzugslage des Zylinders bezüglich der Anströmung zu bestimmen. Weiterhin wurden Messungen nahe des Bodens durchgeführt, die Aufschluss über die räumliche Verteilung der Wandschubspannung geben. Die Kombination mehrerer Messebenen zu einem Volumendatensatz ermöglicht die Lokalisierung charakteristischer Turbulenz- und Wirbelstrukturen.

Globales Ziel der Experimente und der begleitenden numerischen Simulationen ist es, ein Modell zu entwickeln, mit dessen Hilfe die charakteristische Bodenstruktur im Umfeld eines Körpers am Meeresboden unter bekannten Umweltbedingungen in Abhängigkeit der Zeit vorausgesagt werden kann. Dieses numerische Modell soll das Auffinden der Objekte mittels aus Echolotdaten erzeugten Meeresboden-Abbildungen erleichtern.

Experimentelle Methoden und Versuchsaufbauten

Zur Bestimmung der charakteristischen Strömungsstrukturen im Umfeld eines am Boden lagernden Zylinders sowie der am Zylinder angreifenden strömungsinduzierten Kräfte wurden Messungen im Windkanal des Ism vorgenommen. Diese Messungen wurden unter Einhaltung der Reynoldszahl mit einem Time-Resolved Stereo-PIV-System bei einer Wiederholrate von 1 kHz vorgenommen. Eine ausführliche Beschreibung des Windkanals sowie des Messsystems findet sich in Jensch (2011). Die Versuchsparameter sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tab. 1: Versuchsparameter

Zylinderdurchmesser:	$d=58 \text{ mm}$
Zylinderlänge:	$l=190 \text{ mm}$
Strömungsgeschwindigkeit:	$U_0=40 \text{ m/s}$
Reynoldszahl:	$Re=1,6 \cdot 10^5$
Wiederholrate:	1 kHz
Geschw.-felder / Messebene:	2048

Auf einer horizontal in der Messstrecke angeordneten Plexiglasplatte wurde der Probezylinder mittels einer zentralen Befestigungsschraube installiert. Die ebenfalls horizontal ausgerichteten Messebenen wurden im Nachlauf des Zylinders definiert. Die Anordnung der Messebenen ist Abbildung 1 zu entnehmen. Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 2 ersichtlich. Hier wird die Anordnung der PIV-Kameras (schräg von oben und von unten) bezüglich der Lichtauskopplung (Gegenlicht) deutlich.

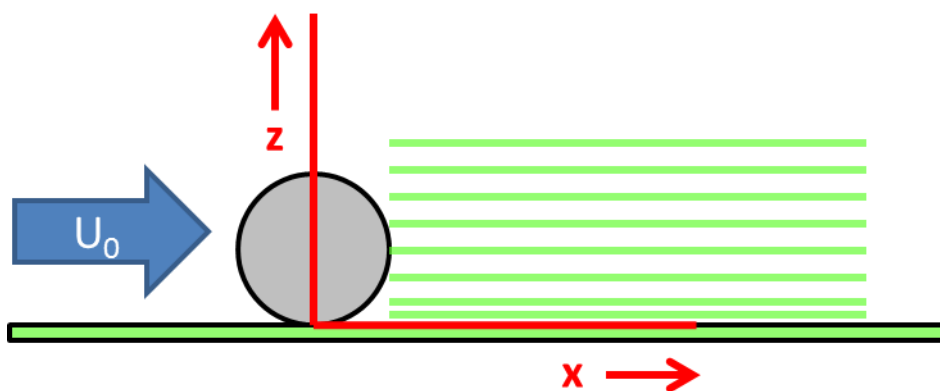


Abb. 1: Anordnung der Messebenen

Hierbei wurde die unterste Messebene bei $z = 3 \text{ mm}$ über der Bodenplatte aufgenommen. Die weiteren Messebenen lagen bei $z = 6, 12, 24, 36, 48, 60$ und 72 mm . Dieses Messprogramm wurde jeweils für einen quer und einen unter einem Winkel von 45 Grad zur Anströmung ausgerichteten Zylinder durchgeführt. Auf diese Weise konnten Volumendatensätze dreikomponentiger Geschwindigkeitsfelder aufgenommen werden.

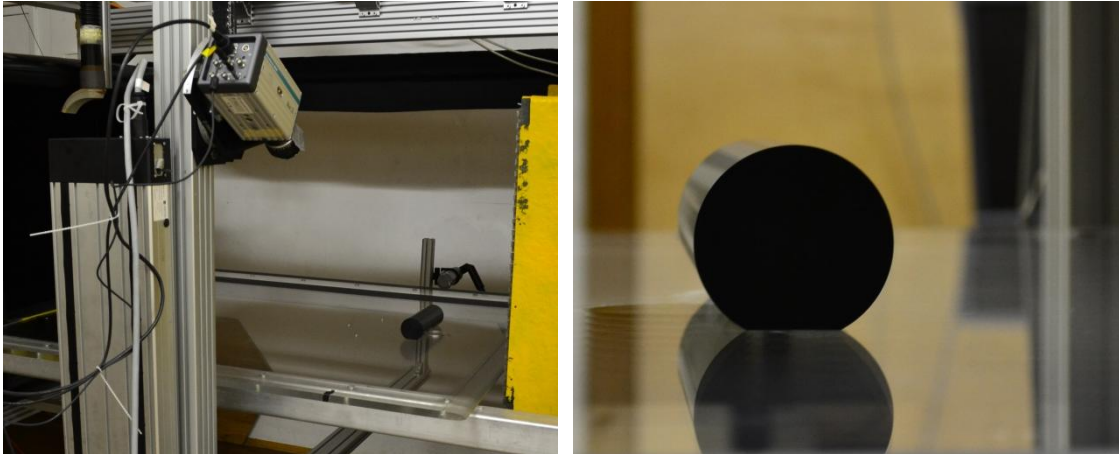


Abb. 2: Messaufbau im Windkanal (links) sowie Zylinder auf der Bodenplatte (rechts)

Bestimmung des Drehmomentes

Der Bestimmung des auf den Zylinderabschnitt mit einer Länge von $l = 190 \text{ mm}$ wirkenden Drehmomentes kommt in den Untersuchungen eine besondere Bedeutung zu. Hierdurch soll geklärt werden, wie sich ein am Meeresboden lagerndes zylindrisches Objekt bezüglich der Anströmung vorzugsweise ausrichtet. Hierzu wurde der Modellzylinder um 45 Grad zur Anströmung gedreht und das Geschwindigkeitsfeld im Nachlauf vermessen. Anhand des Geschwindigkeitsfeldes wurde unter der Annahme einer homogenen Druckverteilung der auf den Zylinder wirkende Impuls berechnet.

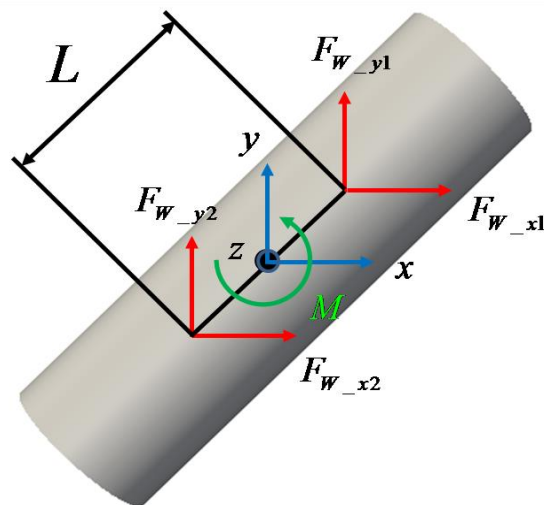


Abb. 3: Die auf den Zylinder wirkenden Kräfte

Das aus den experimentell Ermittelten Geschwindigkeitsdaten resultierende Moment M mit einem Wert von $M=0,17 \text{ Nm}$ kann eine Drehung des Zylinder um die z -Achse bewirken und den Zylinder quer zur Anströmung ausrichten. Dieses Verhalten wird auch in der Natur häufig beobachtet und entspricht somit den Erwartungen.

Im Folgenden werden ausschließlich Zylinder untersucht, die quer zu Anströmung ausgerichtet sind.

Berechnung von Wirbelkernlinien

Den charakteristischen Wirbelstrukturen im Nahfeld des Zylinderabschnitts kommt bezüglich der Entstehung von Kolklöchern eine besondere Bedeutung zu. Wirbel können zu erhöhten

Wandschubspannungen und somit zum verstärkten Abtransport von Sedimentpartikeln führen. Zum Verständnis von Wirbelstrukturen bieten sich unterschiedliche Darstellungsformen an. Angefangen bei der Darstellung über Stromlinien, Isoflächen verschiedener skalarer Kriterien, wie Q (Hunt et. al 1988) oder λ_2 (Jeong und Hussain 1995), haben Sujudi und Haimes (1995) einen Formalismus entwickelt, der direkt die Kernachse eines Wirbels detektiert. Ausgangspunkt des Verfahrens ist die Theorie kritischer Punkte, die erstmals im Bereich der Strömungsmechanik durch Helman und Hesselink (1989 und 1991) für die Visualisierung und Analyse von Strömungsstrukturen angewendet wurde. Die Kernachse eines Wirbels ist durch einen spiralförmigen Verlauf dicht benachbarter Stromlinien gekennzeichnet. Ein spiralförmiger Verlauf der Stromlinien wird durch die Eigenwertverteilung des Geschwindigkeitsgradiententensors identifiziert, bei der es einen realen und zwei konjugiert komplexe Eigenwerte gibt. Der zum realen Eigenwert gehörende Eigenvektor zeigt dabei in Richtung der Wirbelkernachse. Die Kernachse selbst wird durch den „parallel vector operator“ Formalismus extrahiert (siehe Abbildung 6, türkise Linie), den Peikert und Roth (1999) vorgeschlagen haben.

Bestimmung der Wandschubspannung

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits erwähnt, konnte die unterste Messebene in einem Abstand von 3 mm über dem Boden angeordnet werden. Der Laserlichtschnitt hatte eine vertikale Ausdehnung (Dicke) von etwa 4 mm. Es wird davon ausgegangen, dass diese Ebene eine mittlere Geschwindigkeit im Bereich von 1 mm bis 5 mm über der Bodenplatte widerspiegelt. Unter der Voraussetzung von Wandhaftung kann aus den experimentell ermittelten Geschwindigkeitsdaten der mittlere Gradient der Geschwindigkeit und damit die Wandschubspannung τ_w nach Gleichung (1) ermittelt werden.

$$\tau_w = \mu \sqrt{\left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dz}\right)^2} \quad (1)$$

Der Verlauf der Wandschubspannung im Nachlauf des quer zur Anströmung auf der Endscheibe lagernden Zylinders ist in Abbildung 4 dargestellt.

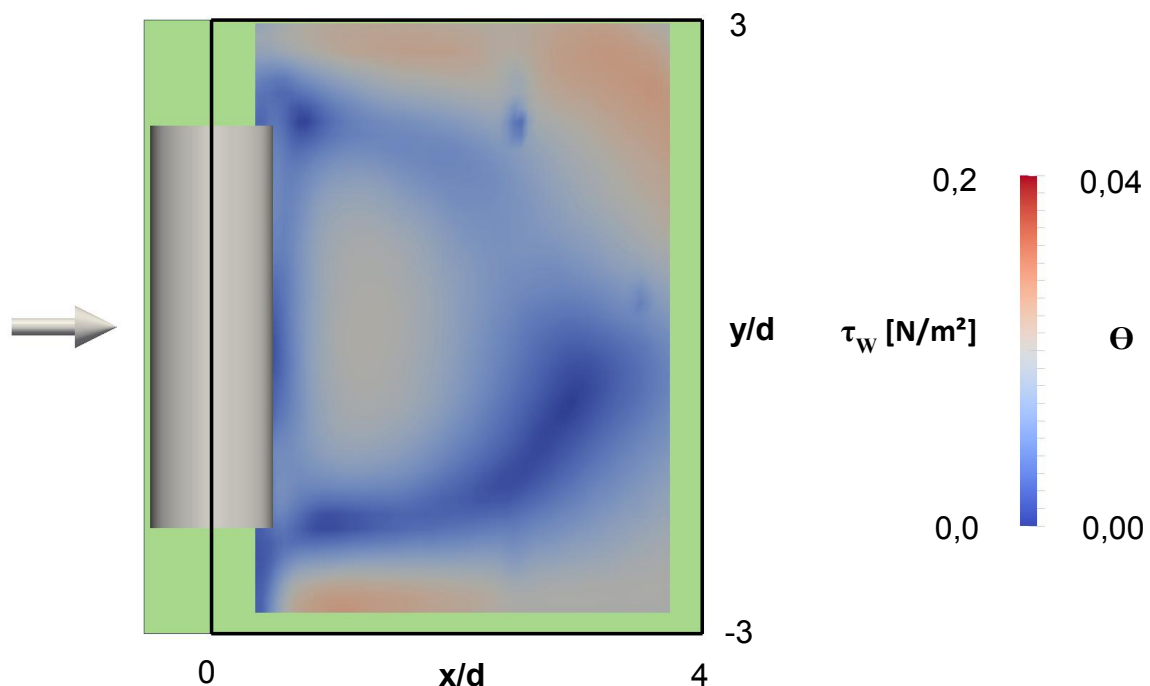


Abb. 4: Wandschubspannungen im Ablösegebiet und nahen Nachlauf des Zylinders

Deutlich zeichnet sich ein Bereich minimaler Wandschubspannungswerte ab. Der Bereich der Minimalwerte (in Abbildung 4 blau) beschreibt den in Abbildung 5 als graue Isofläche dargestellten Bereich der Einhüllenden des Rückstromgebietes. Hier findet ein Wiederanlegen der Strömung an den Boden statt. Innerhalb des Rückstromgebietes kommt es zu einem lokalen Maximum, dessen Betrag jedoch unterhalb der in der freien Strömung ermittelten Werte bleibt.

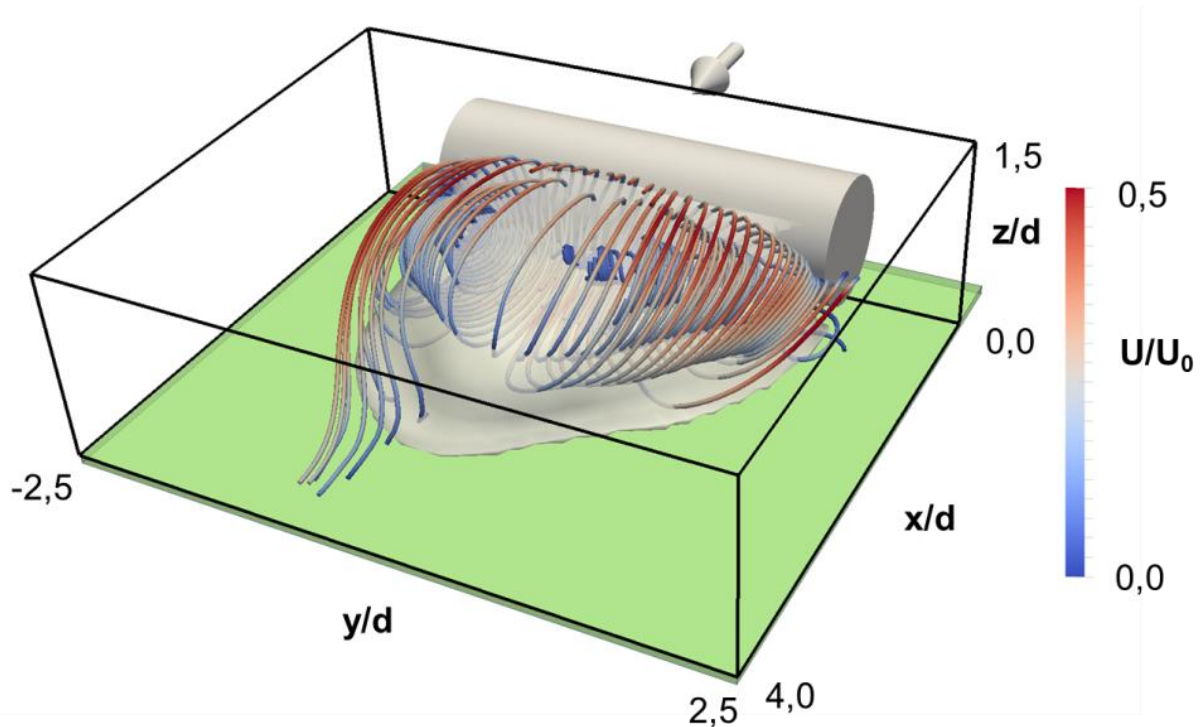


Abb. 5: Einhüllende des Rückstromgebietes sowie Stromlinien

Der Grund hierfür ist Abbildung 6 zu entnehmen. Hier wird anhand der eingezeichneten Stromlinien deutlich, dass sich ein Wirbel mit Achse in y-Richtung ausbildet, dessen Wirbelkern der Einhüllenden des Rückstromgebietes folgt. Anhand der bestimmten Wandschubspannungen lassen sich Aussagen über den Verlauf des für den Bewegungsbeginn von Sedimentpartikeln kennzeichnenden Shields-Parameters treffen. Wie bereits von Shields (1936) beschrieben, kann der Shields-Parameter θ nach Gleichung (2) ermittelt werden.

$$\theta = \frac{\tau_w}{(\rho_s - \rho)gd_K} \quad (2)$$

Der Shields-Parameter wurde unter der Annahme eines mittleren Korndurchmessers von $d_K = 3 \text{ mm}$, einer Dichte des Sandkorns von $\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3$ sowie der Dichte von Wasser mit $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ berechnet. Der kritische Shields-Parameter beschreibt den Bewegungsbeginn des Sedimentkorns und nimmt bei einer Strömungsgeschwindigkeit von Wassers im Naturfall von $U_{\text{Natur}} = 0,27 \text{ m/s}$ einen Wert von $\theta_C = 0,035$ an. Demnach kommt es in der Natur bei dieser Reynoldszahl zur Akkumulation von Sediment im Bereich des Rückstromgebietes. Eine Abbildung der Wandschubspannung sowie der entstehenden Wirbelstruktur ist in Abbildung 6 (gelbe Stromlinien) zu sehen. Die türkise Wirbelkernlinie stellt die Achse des gebogenen Wirbels dar.

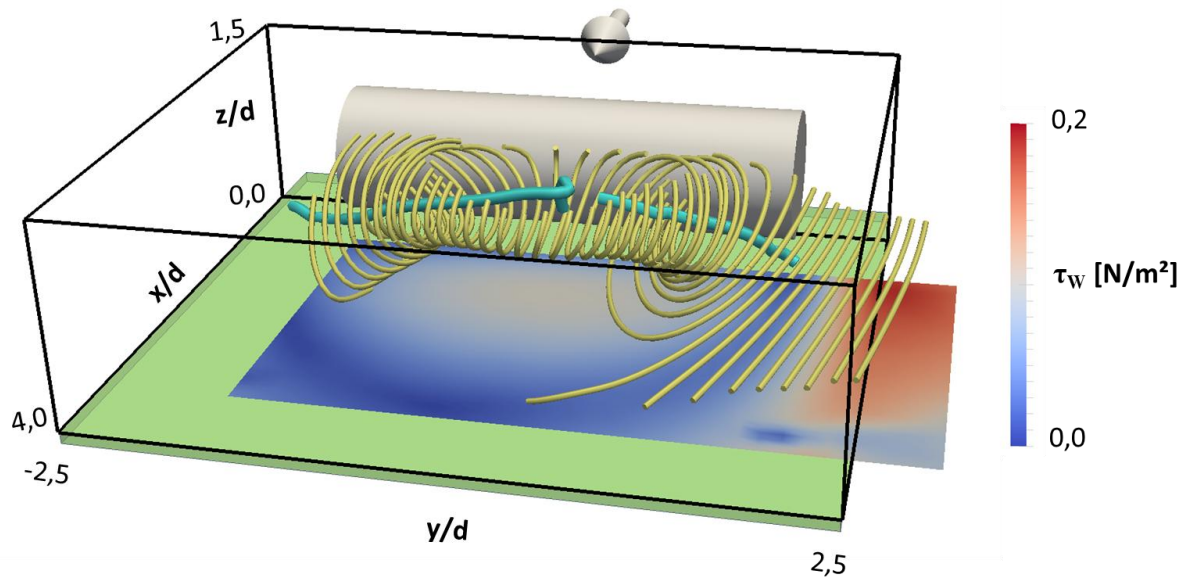


Abb. 6: Wirbelkernlinie (türkis) sowie Stromlinien (gelb) und Wandschubspannung (Farbkontur) im Nachlauf eines zylinderähnlichen Objektes

Danksagung

Dieses Forschungsvorhaben wird unterstützt durch eine Zuwendung der Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch die Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) in Eckernförde. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojekts.

Literatur

- Helman, J.; Hesselink, L.; (1989); **Representation and Display of Vector Field Topology in Fluid-Flow Data Sets**; Computer 22(8): 27-36.
- Helman, J. L.; Hesselink, L.; (1991); **Visualizing Vector Field Topology in Fluid-Flows**; IEEE Computer Graphics and Applications 11(3): 36-46.
- Hunt, J. C. R.; Wray, A. A.; Moin, P.; (1988); **Eddies, streams and convergence zones in turbulent flows**; Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases.
- Jensch, M.; (2011), **Strömungsanalysen zur Erfassung von Struktur und Dynamik turbulenter Nachlaufströmungen**; MENZEL-Verlag; Ostseebad Kühlungsborn; ISBN 978-3-9813444-1-7
- Jeong, J.; Hussain, F.; (1995); **On the Identification of a Vortex**; Journal of Fluid Mechanics 285: 69-94.
- Menzel, P.; Leder, A.; (2011); **Laboruntersuchungen zur Versandung von Objekten am Meeresboden**; In Proceedings der 19. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 6. - 8. September 2011, Technische Universität Ilmenau, Hrsg.: Thess, A.; Resagk, C.; Ruck, B., Leder, A., Dopheide, D., ISBN 978-3-9805613-7-2
- Peikert, R.; Roth, M.; (1999) **The "Parallel Vectors" Operator - A Vector Field Visualization Primitive**; Proceedings of IEEE Visualization '99: pp. 263-270.
- Shields, A.; (1936), **Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung**; Mitteilung der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, Berlin
- Sujudi, D.; Haines, R.; (1995); **IDENTIFICATION OF SWIRLING FLOW IN 3-D VECTOR FIELDS**; American Institute of Aeronautics and Astronautics. Cambridge, MA 02139, Massachusetts Institute of Technology: 8.