

## **Erprobung eines neuartigen Lichtfeldkamera-Messsystems zur gleichzeitigen Messung von 3D-3C-Geschwindigkeitsfeldern sowie einer 3D-Oberflächenkontur.**

**P. Menzel, C. Perwaß<sup>1</sup>, A. Petersen<sup>1</sup>, A. Pinnow<sup>1</sup>, L. Wietzke<sup>1</sup> A. Wolter und A. Leder**

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

<sup>1</sup>Raytrix GmbH  
Schauenburgerstrasse 116, 24118 Kiel

### **Einleitung**

Basierend auf der klassischen Particle Image Velocimetry (PIV) sind zahlreiche unterschiedliche System zur volumetrischen Vermessung von 3-Komponentigen Geschwindigkeitsfeldern bekannt. Diese Systeme benötigen in der Regel mehrere Detektoren in Form von Kameras, welche das Volumen aus unterschiedlichen Richtungen beobachten bzw. eine defokussierte Abbildung eines Streuteilchens auf mehreren Detektoren erzeugen, woraus dann die Position eines Streuteilchens im Raum bestimmt werden kann. Sollen Festkörperstrukturen zusätzlich vermessen werden, so ist ein weiteres Messsystem zusätzlich einzusetzen. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Untersuchung der Versandung von Objekten am Meeresboden (siehe Menzel 2013) soll die Umströmung eines auf dem Sedimentboden des Versuchskanals lagernden Zylinderabschnitts untersucht sowie dessen Versandung beschrieben werden. Hierbei ist die Veränderung der Strömungsstruktur in Abhängigkeit der Bodenstruktur, welche wiederum durch die Strömung selbst verändert wird, bestimmt werden. Hierzu wurde ein Lichtfeldkamera-Messsystem verwendet, welches mit nur einem Sensor in der Lage ist, 3-Komponentige 3-Dimensionale Geschwindigkeitsfelder sowie eine 3-Dimensionale Oberflächenstruktur zu vermessen.

### **Messprinzip**

Der Grundstein für sogenannte Lichtfeld-Kameras wurde bereits durch Ives (1903) sowie Lippmann (1903) gelegt. Sie verwendeten einen Bildträger, dem viele kleine Linsen vorgelagert waren. Das entstehende Mehrfachbild ermöglicht die Betrachtung der Szene aus vielen verschiedenen Blickwinkeln (Lichtfeld). Dadurch entstehen eine sehr hohe Tiefenschärfe sowie die Fähigkeit, die Fokusebene der Aufnahme nachträglich zu verändern. Außerdem können analog zu einem multi-stereo System auf diesem Wege Informationen über die 3D Struktur extrahiert werden.

In den folgenden Jahrzehnten wurde die Technik weiter erforscht, siehe z.B. Ives (1930). Er ergänzte den Aufbau durch eine große Hauptlinse, welche ein verkleinertes Abbild der Umgebung erzeugt. Das Abbild wird dann mittels eines Lochgatters (Feld aus Lochkameras) auf einen Bildträger abgebildet. Dies erlaubt auch Szenen aufzunehmen, welche deutlich größer sind als das Kamerafeld. Mit Beginn des 21. Jahrhunderts entstanden, nun plenoptische Kameras genannte, Modelle für verschiedene Einsatzgebiete. Levoy et al. (2006) entwickelten ein plenoptisches Mikroskop, welches statt der Hauptlinse zur Verkleinerung eine Mikroskop-Optik zur Vergrößerung der Szene verwendet. Die Systeme bestehen meist aus einer konventionellen digitalen Kamera, welche um ein Micro-Lens-

Array, kurz MLA, erweitert wird (siehe Abb. 1). Die Hauptlinse bildet die Objekte in den virtuellen Raum ab. Von dort werden für alle Linsen Bilder der Szene auf dem Kamerasensor erzeugt. Das so entstehende Lichtfeldbild wird anschließend genutzt, um 2D Bilder mit frei wählbarer Fokusebene oder 3D Rekonstruktionen zu erstellen. Eine eingehende Beschreibung der zeitlichen Entwicklung wird in Roberts (2003) gegeben.

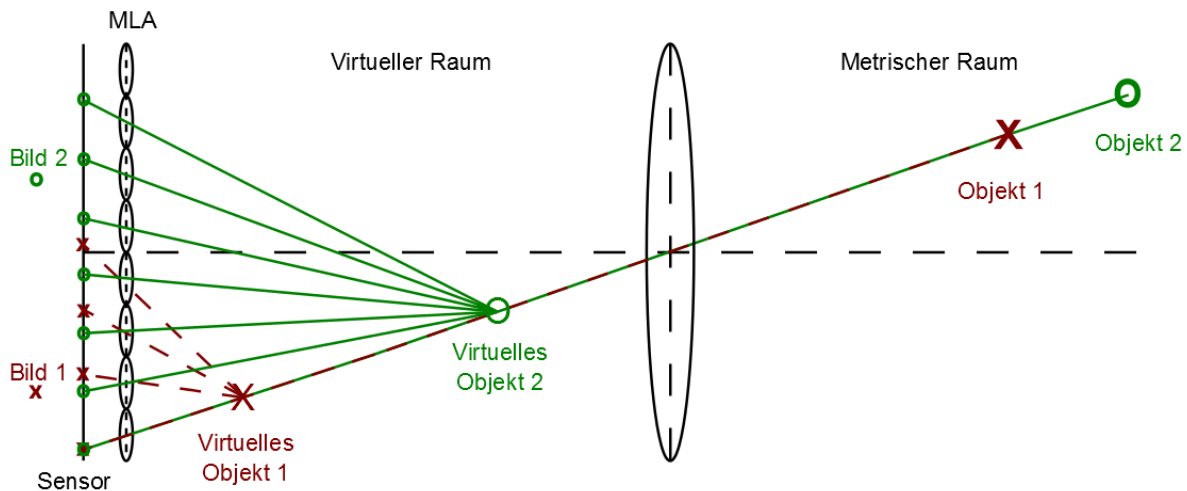


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer plenoptischen Kamera.

Die hier verwendete Kamera wurde von Perwass & Wietzke (2012) eingeführt. Sie erweitert die Qualität der Tiefenauflösung, indem Mikrolinsen unterschiedlicher Fokallänge genutzt werden. Dies erlaubt es, einen größeren Tiefenbereich abzudecken, ohne dabei die Auflösung zu reduzieren.

### Particle-Tracking auf Basis plenoptischer Aufnahmen

Das hier vorgestellte Verfahren zur Flussschätzung basiert auf der visuellen Verfolgung (Tracking) von Partikeln, welche einer Strömung ausgesetzt sind. Dank der verwendeten plenoptischen Kamera wird dabei nicht nur die Bewegung parallel zum Bildsensor beobachtet, sondern zusätzlich die Tiefe (Abstand zur Kamera) bestimmt. Daraus lassen sich vollständige 3-dimensionale Trajektorien aller detektierten Partikel bestimmen. Wie in Abb. 1 erkennbar ist, können dabei auch die Positionen von Partikeln bestimmt werden, welche in einem Stereo Kamerasystem aufgrund von Verdeckungen nicht verwendbar sind. Entsteht in einem Mikrolinsenbild eine Verdeckung zweier Partikel, bleiben diese in anderen Bildern getrennt sichtbar.

Um auch sehr hohe Geschwindigkeiten auflösen zu können, wird die Kamera in einem Doppelbild-Modus betrieben. Es werden dabei zwei Bilder in direkter Folge aufgenommen, welche eine sehr geringe zeitliche Verschiebung aufweisen. Die so erstellten Trajektorien sind somit auf jeweils 2 Stützpunkte begrenzt.

Der Algorithmus zur Flussschätzung läuft in mehreren Stufen ab. Zuerst wird eine Bildsequenz nach Partikel in den Linsenbildern durchsucht und diese als ungültig bzw. gültig klassifiziert. Abb. 2b zeigt die mit einem grünen Kreis eingefassten gültigen sowie die mit einem roten Kreis eingefassten ungültigen Partikel. Anschließend wird die Verschiebung der Partikel innerhalb der Doppelbilder bestimmt. Die räumlichen Beziehungen werden über die in unterschiedlichen Mikrolinsenbildern detektierten Partikel hergestellt, wobei in Abb. 2a die Linsen unterschiedlicher Brennweite mit unterschiedlichen Farben dargestellt sind. Daraus können nun 3D Positionen trianguliert werden.

Es resultiert für jeden Zeitpunkt eine Menge an 3D Positionen mit zugehörigen Positionsänderungen, welche den lokalen Geschwindigkeiten entsprechen. In der Post-Processing Stufe wird ein Vektorfeld in einem regelmäßigen Gitter interpoliert, um die

weitere Verarbeitung zu vereinfachen. Unter der Annahme eines stationären Strömungsfeldes, kann das Gitter über eine ganze Sequenz gemittelt werden, was die Genauigkeit weiter erhöht.

Das Verfahren mit einer plenoptischen Kamera bietet verschiedene Vorteile gegenüber anderen Verfahren. Im Gegensatz zu multi-Kamera Systemen ist keine aufwendige externe Kalibrierung (Beziehungen zwischen Kameras) nötig. Dank der direkten Berechnung der lokalen Geschwindigkeiten können mittels des plenoptischen Verfahrens die Eigenschaften des Gitters zur statistischen Mittelung im Post-Processing optimal gewählt werden.

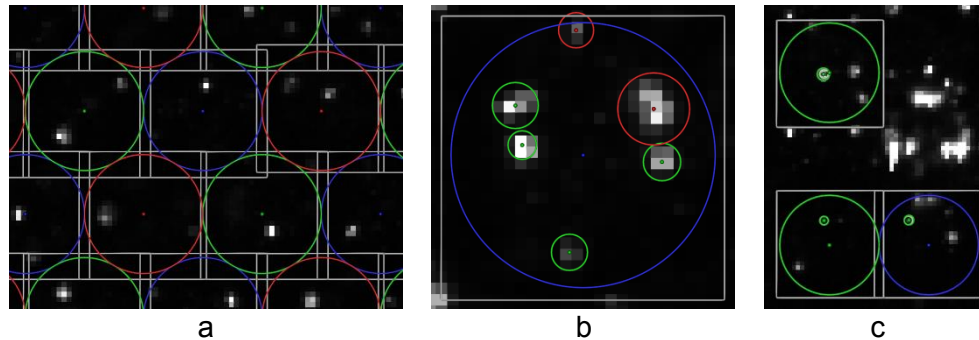


Abb. 2: Schematischer Aufbau einer plenoptischen Kamera.

Eine deutliche Verbesserung gegenüber anderen optischen Verfahren stellt die Verwendung der Daten vieler Mikrolinsen für ein einzelnes Partikel dar. Dabei werden bis zu 12 und mehr Linsen für die Schätzung einer 3D Position verwendet. Abb. 2c zeigt beispielhaft die Zuordnung eines Partikels aus drei unterschiedlichen Mikrolinsen zu einem 3D-Partikel. Im Vergleich dazu können Stereo und Tri-Stereo Kamerasysteme lediglich 2 bzw. 3 Bilder verwenden. Dank dieser hohen Redundanz, lassen sich auch bei einer sehr hohen Partikeldichte ein valides zeitliches Tracking und eine robuste 3D Schätzung durchführen.

### Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung

Zur Demonstration der Fähigkeiten des Messsystems wurde eine am Ism bestehende Versuchsanordnung zur Bestimmung der Versandung von am Meeresboden lagernden Objekten verwendet. Hierbei wird ein Zylinderabschnitt mit einer Länge von  $L = 190$  mm sowie einem Durchmesser von  $D = 58$  mm auf einem Sandbett mit einem Korndurchmesser von  $0,1 \text{ mm} < d_k < 0,3 \text{ mm}$  gelagert und senkrecht zu seiner Zylinderachse mit Wasser angeströmt. Der Versuchskanal, dessen Abmessungen sowie die Versuchsanordnung sind Abb. 3 zu entnehmen. Die hierbei entstehenden Strömungs- und Bodenstrukturen wurden bereits in Menzel et al. (2013) sowie Menzel & Leder (2013) publiziert.

Die Versuche wurden seitlich des Zylinders im bereits versandeten Zustand vorgenommen. Somit sind deutliche Kolkstrukturen detektierbar. Die Bodenstruktur wurde mit der Lichtfeldkamera in Form einzelner Fotografien aufgenommen. Hierzu wurde eine möglichst koaxiale Beleuchtung mit Hilfe mehrerer Scheinwerfer realisiert, so dass eine über die Beobachtungsfläche weitestgehend homogene Beleuchtung ohne Schattenwurf erzielt wurde. Zu Vergleichszwecken wurde die Bodenstruktur zusätzlich mit dem Laserabstandssensor erfasst. Anschließend wurde die Messstrecke vorsichtig mit Wasser befüllt. Die Vermessung der mittleren Strömungsstruktur wurden unter Verwendung eines 120 mJ-Nd:YAG-Doppelpulslasers durchgeführt. Als Streuteilchen wurden Polyamidpartikel mit einem Durchmesser von etwa  $d_p = 54 \text{ }\mu\text{m}$  verwendet, wobei die Teilchendichte mit etwa 10% der Dichte bei einer äquivalenten planaren PIV-Messung gewählt wurde. Das vom Messsystem vorgegebene Objektiv mit einer Brennweite von 100 mm ermöglichte unter Einhaltung des dem Versuchsaufbau geschuldeten Messabstandes ein Messvolumen von etwa  $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}^3$ , wobei die Beleuchtung auch größere Volumina zulassen würde.

Mit der 29 Megapixel-Kamera konnte bei einer Einzelbildrate von 4 Hz gemessen werden, wobei eine Erfassung der Bilder in Echtzeit möglich ist. Die 3D-Oberflächenstrukturen können ebenfalls in Echtzeit visualisiert werden.

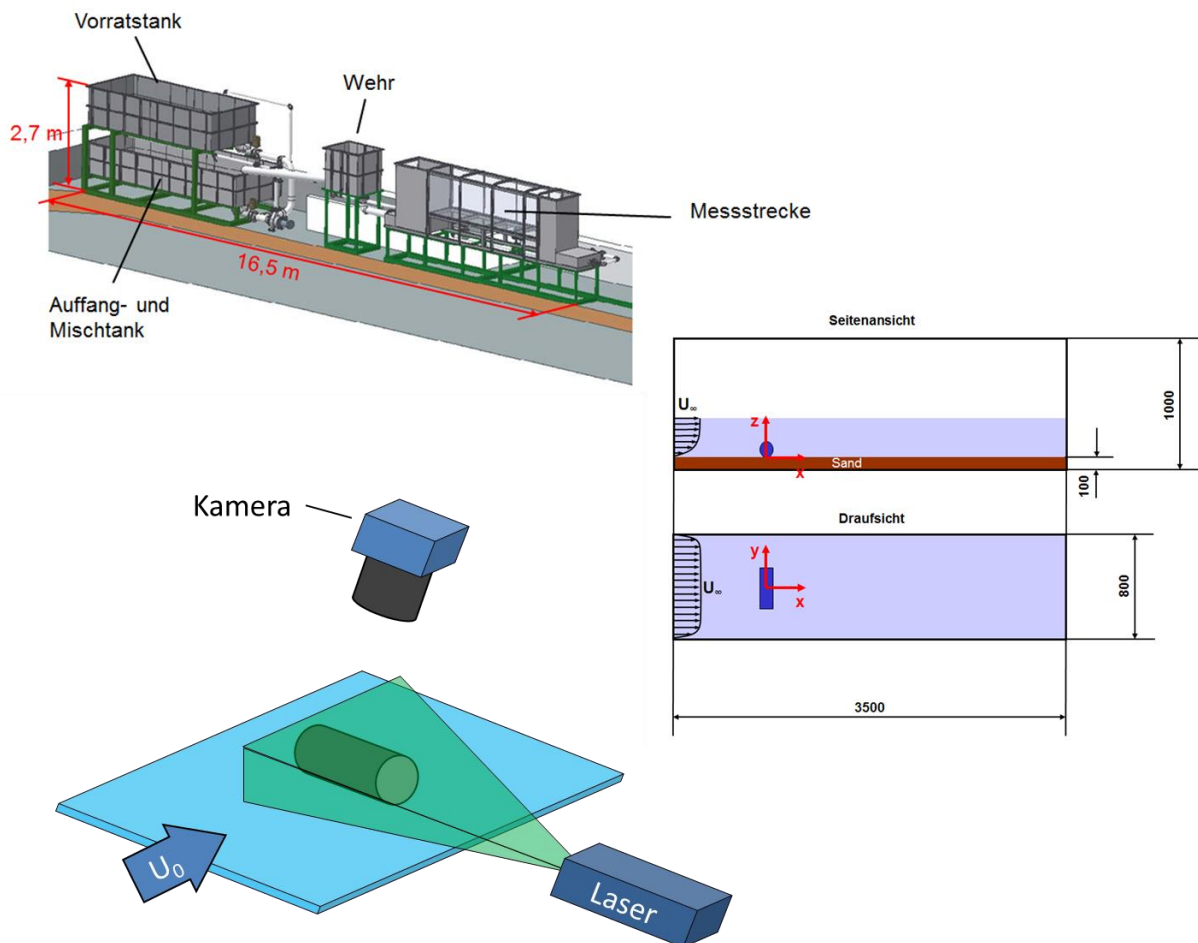


Abb. 3: Versuchskanal, Aufbau und Koordinatensystem

Zur Validierung der gemessenen Bodenstruktur wurde ein Laserabstandssensor verwendet, welcher mittels automatisierter Traversierung ein Bodenprofil erstellt. Der Sensor arbeitet nach dem Triangulationsprinzip und erlaubt eine absolute Genauigkeit für den Abstand von 0,3 mm, wobei der Messpunkt selbst infolge der Ausdehnung des Laserstrahls einen Durchmesser von etwa 2,3 mm aufweist. Die so erreichbare Ortsauflösung beträgt in der Ebene etwa 2 mm und in der Tiefe etwa 1 mm, wobei starke Höhengradienten einer deutlich höheren Ungenauigkeit unterliegen.

### Vermessung der Bodenstruktur und Validierung

Mit Hilfe des Laserabstandssensors wurde das Bodenprofil im Versuchskanal fast vollständig vermessen. Im Anschluss wurden Teilausschnitte im Bereich des am Boden lagernden Zylinders mit Hilfe der Lichtfeldkameratechnik aufgenommen. Während die Messung mit dem Laserabstandssensor eine Zeit von mehreren Stunden benötigt, fällt der Zeitaufwand pro Fläche unter Verwendung der Lichtfeldkamera mit nur wenigen Sekunden erheblich geringer aus. In Abb. 4 ist die mittels Lichtfeldkamera aufgenommene Bodenstruktur dargestellt. Hierbei wurden insgesamt neun Einzelaufnahmen zusammengefügt, wobei an den Schnittstellen aufgrund leichter Verzerrungen an den Bildrändern sowie der Ungenauigkeit bei der Ausrichtung der Kamera leichte Unstetigkeiten auftreten. Verglichen mit den Messungen des Laserabstandssensors ist eine deutlich höhere räumliche Auflösung

möglich. Auch kleine Strukturen werden sehr gut wiedergegeben. Um die Ergebnisse beider Messungen direkt miteinander vergleichen zu können, wurden drei Schnitte an den Positionen  $y/L = 0$ ,  $y/L = -0,5$  sowie  $y/L = -0,8$  analysiert. Die Positionen sind in Abb. 4 als weiße Linien auf der vermessenen Oberfläche eingezeichnet.

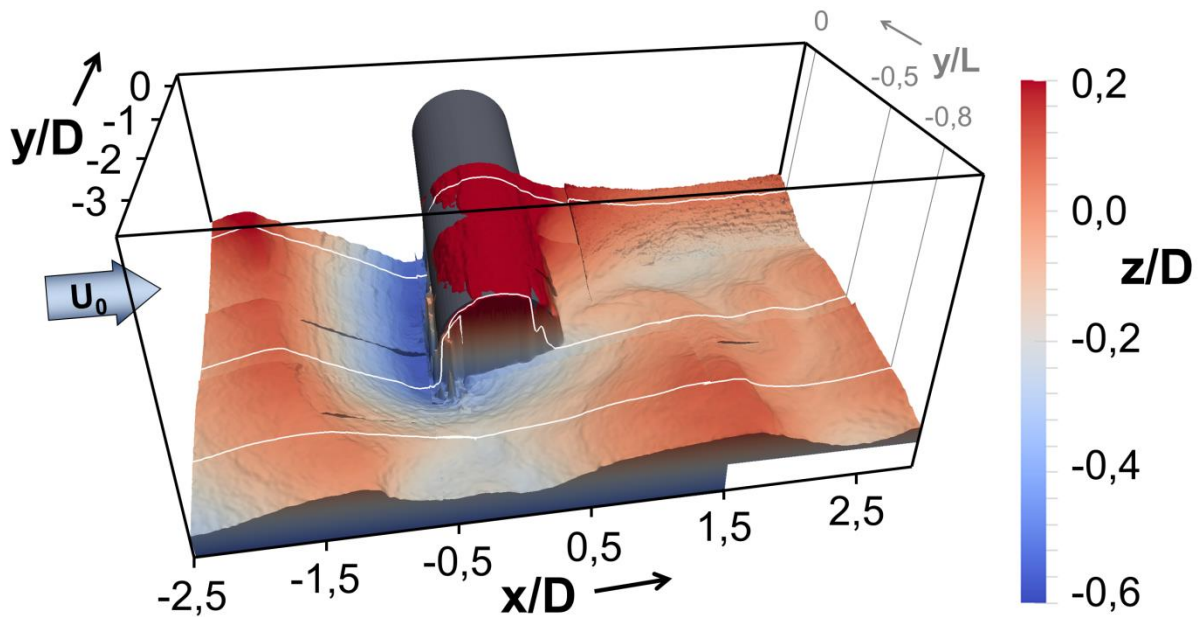


Abb. 4: Oberflächenstruktur, aufgenommen mit der Lichtfeldkamera

Ein Vergleich der drei vermessenen Profile findet sich in Abb. 5 – 7, wobei die mittels Lichtfeldkamera aufgenommenen Profile als rote Linien und die Ergebnisse des Laserabstandssensors als schwarze Linien eingezeichnet sind. Der Zylinder ist als Ellipse eingezeichnet, da die vertikale Achse überstreckt dargestellt wurde.

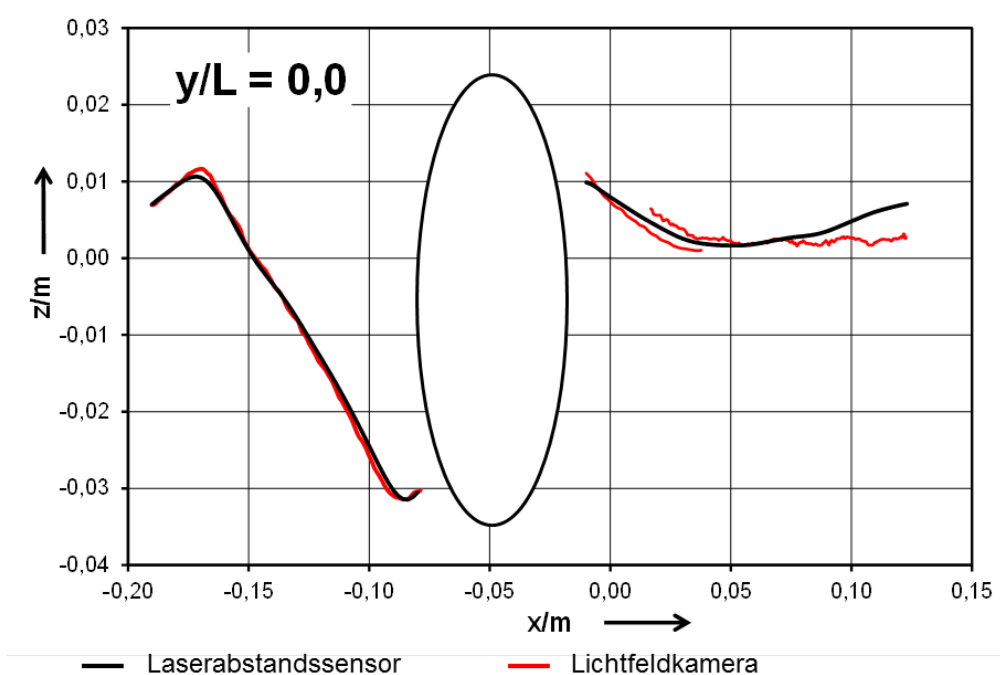


Abb. 5: Oberflächenprofil in der Mitte des Zylinders

Es stellt sich heraus, dass beide Ergebnisse nahe beieinander liegen und sich um weniger als 2 mm unterscheiden. Einzige Ausnahme bleibt in Abb. 5 der Bereich um  $0,01 \text{ m} > x > 0,12 \text{ m}$ . Hier kam es bei den Messungen mit der Lichtfeldkamera aufgrund einer schlechten Bildausleuchtung zu größeren Ungenauigkeiten.

Es wird somit deutlich, dass die Genauigkeit der Messungen stark von der Qualität der Ausleuchtung abhängt. Beim Vergleich der Profillinien ist zu beachten, dass die Messungen mit dem Laserabstandssensor einer starken Glättung unterzogen wurden, um die messtechnisch bedingten Ungenauigkeiten zwischen zwei benachbarten Messpunkten zu minimieren. Entsprechend ist so der zufällige statistische Fehler minimiert worden.

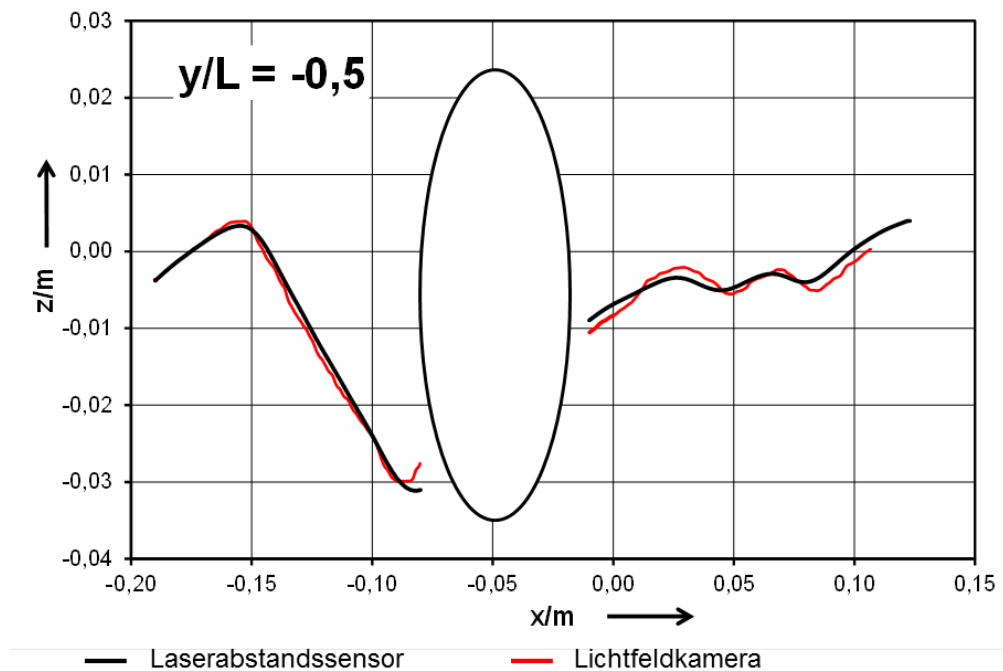


Abb. 6: Oberflächenprofil am Zylinderende

Tangential zum Zylinderende wurde der in Abb. 6 aufgezeichnete Verlauf der Oberfläche extrahiert. Auch hier ist eine sehr gute Übereinstimmung feststellbar. Stromab des Zylinders fallen leichte Differenzen auf, die z.T. aus der Positionierengenauigkeit der Kamera in y-Richtung herrühren. Aufgrund der starken Gradienten der Oberflächenauslenkung in beiden Raumrichtungen skaliert hier die vertikale Ungenauigkeit mit der horizontalen. Dieser Effekt tritt auch in Abb. 7 außerhalb des Zylinders auf.

Es bleibt festzuhalten, dass die Genauigkeit der Oberflächenvermessung mit der Lichtfeldtechnik mit der des Laserabstandssensors weitgehend vergleichbar ist. Die Messzeit ist deutlich geringer und die Bereitstellung der Oberflächendaten für die elektronische Auswertung unproblematisch. Zu beachten ist, dass die Genauigkeit der Messungen stark von der Qualität der Ausleuchtung, der exakten Ausrichtung und einer genauen Positionierung abhängt.

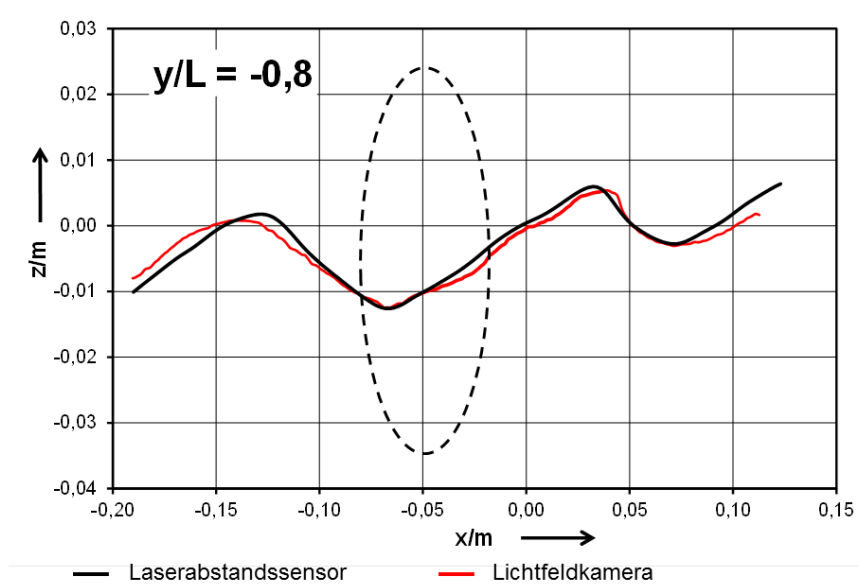


Abb. 7: Oberflächenprofil seitlich des Zylinders

### Geschwindigkeitsmessung

Zur Bestimmung des zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfeldes wurden 752 Doppelbildaufnahmen (1504 Einzelbilder) bei einer Einzelbildwiederholrate von 4 Hz aufgenommen und mit Hilfe der mitgelieferten Software ausgewertet.

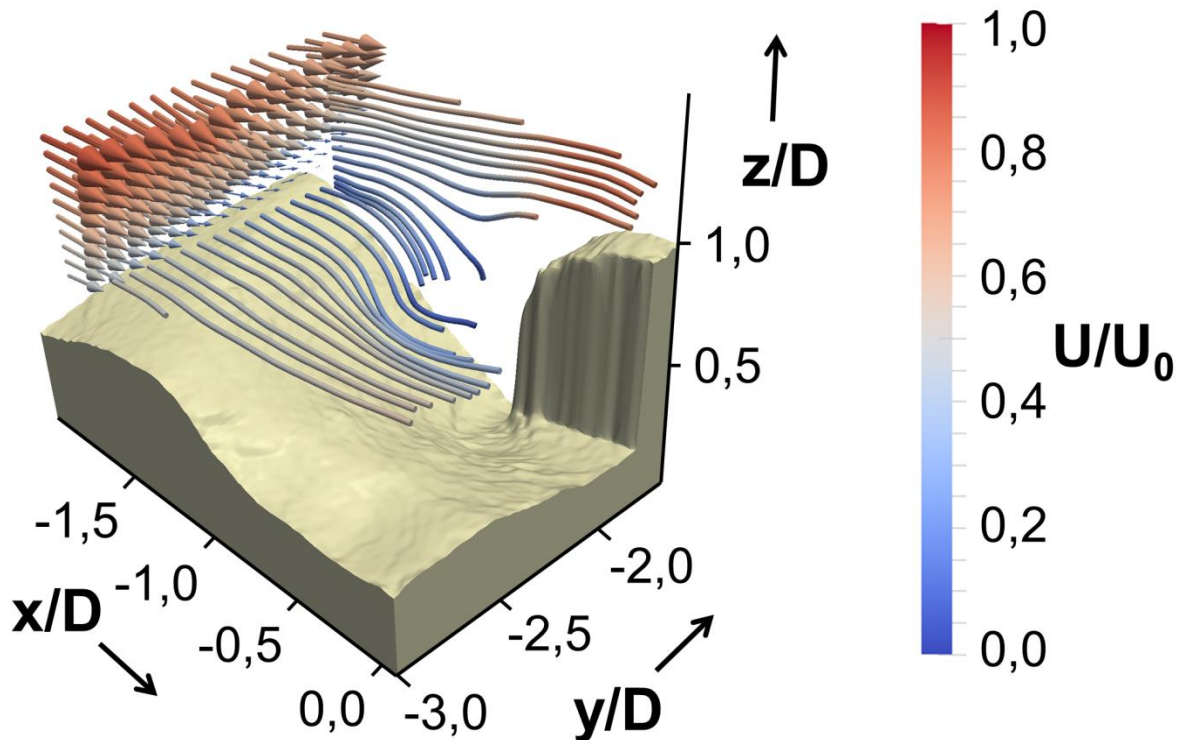


Abb. 8: Geschwindigkeitsfeld vor dem Zylinder, visualisiert anhand von Geschwindigkeitsvektoren und Stromlinien.

Die mittels Particle Tracking berechneten Geschwindigkeitsfelder wurden auf anschließend auf einem gleichmäßigen Gitter gemittelt. Ein Auszug aus dem Geschwindigkeitsfeld ist in Abb. 8 dargestellt, wobei die Anströmung anhand von Vektoren wiedergegeben ist.

Die Stromlinien sollen die im zeitlichen Mittel auftretenden Strukturen veranschaulichen, wobei die Umströmung des Zylinderendes mit der einhergehenden Beschleunigung der Strömung deutlich wird. Eine Validierung der gemessenen Geschwindigkeitsbeträge soll in späteren Analysen vorgenommen werden.

Das so erhaltene 3-Dimensionale 3-Komponenten Geschwindigkeitsfeld sowie die 3-Dimensionale Oberflächenstruktur lassen umfangreiche Analysen sowie eine genaue Beschreibung der Strömungsstrukturen in Wechselwirkung mit der Bodenstruktur zu. Beispielhaft zeigt Abb. 9 ein Geschwindigkeitsvektorfeld bei etwa  $y/L = 0,45$ . Deutlich ist im Bereich der Anströmung ein zum Boden abnehmendes Geschwindigkeitsprofil erkennbar. Weiterhin kann ein freier Staupunkt unmittelbar vor dem Zylinder gefunden werden. Im Bereich des Kolkgrabens vor dem Zylinder zeichnet sich der obere Teil des räumlich stark ausgedehnten Hufeisenwirbels ab, wie er bereits in kleinerer Form in Windkanalmessungen gefunden wurde. Der zu erwartende Hufeisenwirbel ist schematisch als roter Pfeil eingezeichnet.

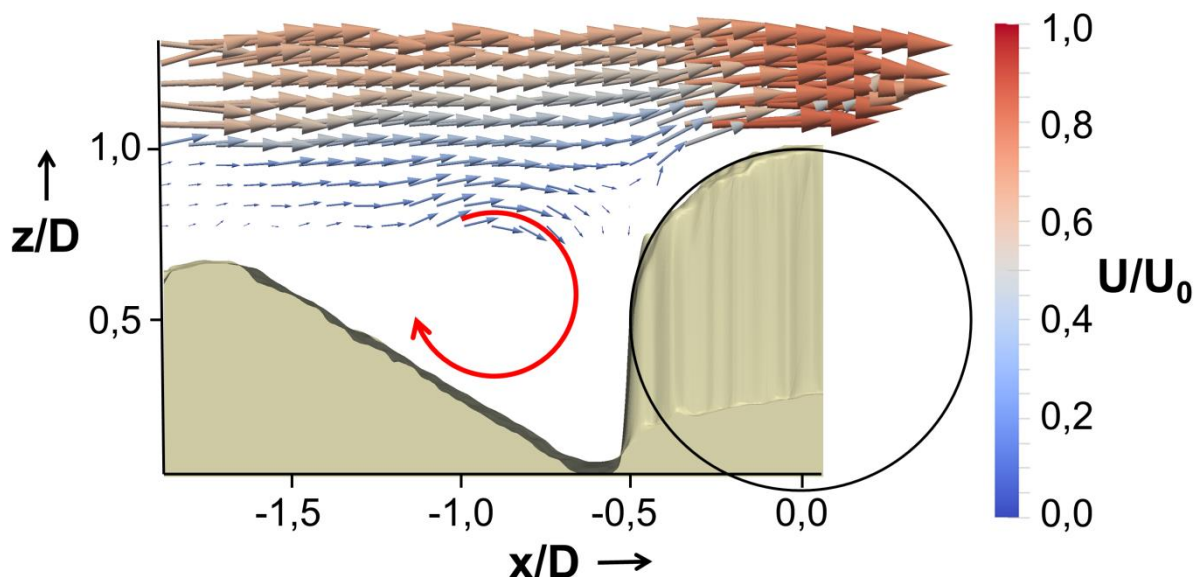


Abb. 9: Geschwindigkeitsfeld vor dem Zylinder.

### Zusammenfassung und Ausblick

Das Lichtfeldkamarasystem wurde erfolgreich erprobt und dessen Tauglichkeit für die vorliegende Aufgabenstellung nachgewiesen. Es wurden gleichzeitig 3-D-Oberflächenstrukturen sowie 3D-3K-Geschwindigkeitsfelder aufgenommen. Das Messsystem ist somit in der Lage, die Wechselwirkung zwischen Strömung und einer festen Körperstruktur zu untersuchen. Zukünftig sollen die Strukturen auf ihren zeitlichen Verlauf hin untersucht werden. Das Messsystem soll um zusätzliche Kalibrier-, Auswerte- und Exportmöglichkeiten erweitert und mit einem System zur Ansteuerung des Lasers versehen werden.



## 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.

Weiterer Dank gilt den Kollegen am Ism, im Besonderen Tom Rückborn, Martin Brede, Jörg Wentzlaff und Ulf Grebin.

## Literatur

Cataño-Lopera, Y.A.; Demir, S.T.; García, M.H.; (2007); Self-Burial of Short Cylinders Under Oscillatory Flows in Combined Waves Plus Currents; IEEE J. Ocean. Eng., vol. 32, no. 1, pp. 191-203, Jan. 2007.

Ives, F.; (1903); US patent 725,567

Ives, H. E.; (1928); "A camera for making parallax panoramagrams", Journal of the Optical Society of America 17, 435–439

Levoy, M.; Ng, R.; Adams, A.; Footer, M.; Horowitz, M.; (2006); "Light field microscopy", ACM Trans. Graph. 25(3), 924934

Lippmann, G.; (1908); "Epreuves reversibles, photographies integrales", Academie des sciences, 446451

Menzel, P.; Rückborn, T.; Leder, A.; (2013); Flow and scour around cylindrical objects in laboratory experiments; OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE , vol., no., pp.1,8, 10-14 June 2013, doi: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607970

Menzel, P.; Leder, A.; (2013); Kolkbildung im Umfeld zylindrischer Objekte sowie deren Versandung im Wasserkanalexperiment; Proceedings der 21. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 3. - 5. September 2013, Universität der Bundeswehr München, Hrsg.: Kähler, C.J.; Hain, R.; Cierpka, C.; Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D., ISBN 978-3-9805613-9-6, ISSN 2194-2447

Perwass, C.; Wietzke, L.; "Single lens 3D camera with extended depth-of-field". In: Proc. SPIE 8291, Human Vision and Electronic Imaging XVII (2012)

Roberts, D. E.; (2003); "History of lenticular and related autostereoscopic methods", Leap Technologies, LLC, 19264 Seeley Ridge Road, Hillsboro, WI 54634-3494