

SmartPIV - Strömungsvisualisierung mit dem Smartphone in der Lehre

SmartPIV – Smartphone-based flow visualization for education

C. Cierpka^a, P. Mäder^b

a, Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau

b, Fachgebiet Softwaretechnik für sicherheitskritische Systeme, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau

Particle Image Velocimetry, Smartphone, Lehre

particle image velocimetry, smartphone, educational fluid mechanics

Zusammenfassung

Smartphones haben unsere Verhaltens- und Kommunikationsweisen in jüngerer Zeit weitreichend verändert und gehören gerade für Studierende zu ihrer alltäglichen Erfahrungswelt. Die Strömungsmechanik und Thermodynamik und einige ihrer grundlegenden Phänomene gehören zwar auch zu unserer täglichen Erfahrungswelt, deren Vermittlung im Rahmen der Lehre ist jedoch schwierig. Ein sehr anschaulicher Zugang kann durch die digitale Messung des Geschwindigkeitsfeldes mittels Particle Image Velocimetry (PIV) in Strömungen gewonnen werden. Die Anschaffungskosten für konventionelle PIV Systeme sind allerdings sehr hoch und werden daher von vielen Hochschulen und Universitäten aufgrund begrenzter Lehrbudgets gescheut. Smartphones sind dagegen relativ preiswert und verfügen über umfangreichen Sensorik. Moderne Smartphones werden daher bereits erfolgreich für physikalische Versuche in der Lehre eingesetzt (Staack 2018). Auch für die Strömungsvisualisierung mittels Schlierenverfahren (Miller und Loebner 2016; Settles 2018) oder zur Bestimmung der Oberflächenspannung (Goy et al. 2017) und Fließeigenschaften von Fluiden (Marshall 2017) können moderne Smartphones in der Lehre und im Feldversuch genutzt werden. Neben dem zweidimensionalen Geschwindigkeitsfeld in der Ebene (Cierpka et al., 2016, 2018) konnten durch die Verwendung von zwei Helmkameras auch stereoskopische Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt werden (Mosch 2016, Tuchscher 2017). Das System wurde bereits erfolgreich für die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes an einer rotierenden Scheibenelektrode eingesetzt (Kohl 2017). Aguirre-Pablo et al. zeigten 2017 sogar einen Ansatz zur tomografischen Geschwindigkeitsfeldmessung mit Smartphones und farbigen LEDs.

All diese Systeme verwenden bisher aufgezeichnete Videos der Smartphones, welche nachträglich mittels moderner PIV Software auf PCs ausgewertet werden. Ziel des gegenwärtigen Projektes ist es eine App zu entwickeln, mit der die online Auswertung der Kamerabilder möglich ist und das Vektorfeld direkt über die momentan aufgezeichneten Bilder projiziert wird. Somit lassen sich Veränderungen in der Strömung durch die Studierenden direkt nachvollziehen.

Motivation

Bei der Strömungsmechanik und der Thermodynamik handelt es sich erfahrungsgemäß um Fächer, die von den meisten Studierenden als schwierig eingestuft werden. Strömungsvorgänge werden mittels nicht-linearer Differentialgleichungen beschrieben. Diese sind nicht intuitiv zugänglich und die Nichtlinearität führt immer wieder zu überraschenden Effekten.

Typische Problemstellungen sind dabei die Umströmung eines Hindernisses, Grenzschichtströmungen und Kanalströmungen. Die Umströmung eines Zylinders ist beispielsweise sehr komplex und ändert sich mit der Anströmgeschwindigkeit so grundlegend, dass hier zunächst kein intuitiver Zugang möglich ist. Bei kleiner Anströmgeschwindigkeit wird der Zylinder laminar umströmt und die Strömung liegt komplett an (Abb. 1a).

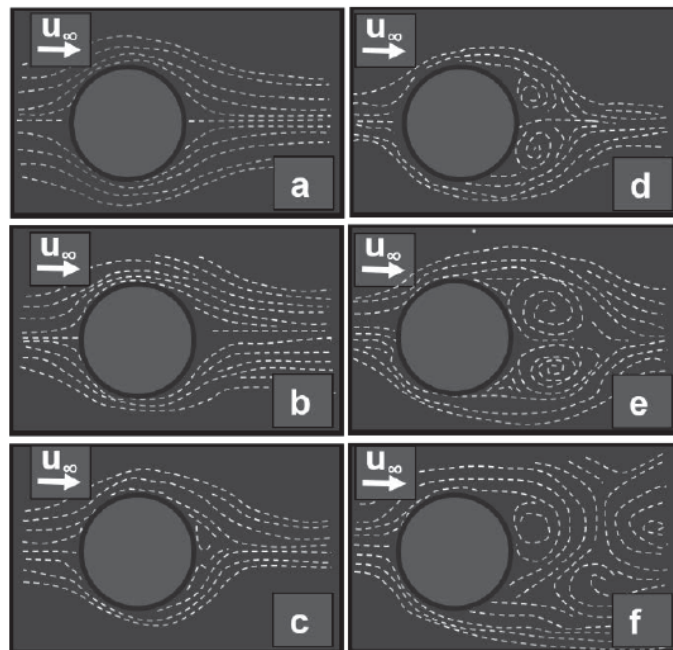


Abbildung 1: Mit zunehmender Geschwindigkeit ändert sich die Umströmung des Zylinders von der laminar anliegenden Strömung zur turbulent abgelösten Umströmung inklusive Wirbelablösung (nach Prandtl, 1927).

Mit steigender Geschwindigkeit ändert sich die Strömung deutlich, von anfänglich laminarer Ablösung mit Wirbelbildung (Abb. 1c-e) bis hin zur turbulenten Nachlaufströmung (Abb. 1f). Wird die Anströmgeschwindigkeit schließlich schließlich turbulent, verschieben sich die Ablösepunkte entgegen der Intuition, durch den höheren Impulsaustausch in der turbulenten Grenzschicht, wieder nach hinten. Ähnlich komplex sind Grenzschicht- und Kanalströmungen. Modellexperimente während der Ausbildung von Studierenden der Ingenieurwissenschaften können hier maßgeblich das Verständnis steigern und damit den Lernerfolg erhöhen.

Optische Methoden eignen sich besonders gut zur Strömungsvisualisierungen bzw. der Messung des Geschwindigkeitsfeldes. Bei der Particle Image Velocimetry werden der Strömung kleine Partikel zugefügt. Diese bewegen sich möglichst ideal mit der Strömung mit. Werden nun in einem definierten zeitlichem Abstand zwei Bilder der Partikel gemacht, kann mit digitalen Methoden deren Verschiebung bestimmt werden und daraus schließlich die Geschwindigkeit berechnet werden. Systeme mit Doppelpulslasern zur Beleuchtung und wissenschaftlichen Kameras zur Aufnahme, übersteigen allerdings schnell die Budgets von Universitäten. Außerdem zeigt die Erfahrung, dass es bei der Anwendung von komplexer Messtechnik häufig Berührungspunkte bei den Studierenden gibt. Smartphones hingegen werden intuitiv bedient und ein Großteil der Nutzer ist mit Applikationen für die Erstellung und Bearbeitung von Videos und Fotos vertraut. Moderne Smartphones können Videos mit 240 Hz aufnehmen, wobei die typischen Sensorabmessungen 1280×720 Pixel bei 1..1,6 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ betragen. Da diese Geräte als Massenware produziert werden, liegen die Kosten meist unter 1.000 Euro. Diese Aufnahmegeschwindigkeiten reichen in vielen Fällen aus, um eine Strömung mit einem kontinuierlichen Laser zu beleuchten und für die PIV Analyse geeignete Aufnahmen zu generieren. Typischerweise werden die Videos anschließend in Einzelbilder zerlegt und mittels leistungsstarker PC Systeme ausgewertet. Hier konnte im Versuch ge-

zeigt werden, dass die Ergebnisse zwischen einem Smartphone und einer wissenschaftlichen Hochgeschwindigkeitskamera sehr gut übereinstimmen (Cierpka et al. 2016). In studentischen Arbeiten wurde ein ähnliches System basierend auf zwei Helmkameras bereits zur stereoskopischen Vermessung aller drei Geschwindigkeitskomponenten in einer Ebene verwendet. Da die Endgeräte nicht für eine genaue Zeitsynchronisation entwickelt wurden, wurden die Videos kontinuierlich aufgezeichnet und der Laser gepulst. Da die Bilder nicht global auf einmal aufgezeichnet wurden, sind einzelne Bildbereiche beleuchtet während andere Bereiche dunkel erscheinen. Aus diesen einzelnen beleuchteten Zeilen können dann zeitsynchrone Einzelbilder zusammengesetzt werden (Tuchscherer 2017; Kohl 2017). Für tomographische Messungen wurde ein ähnlicher Ansatz gewählt, bei dem die zeitliche Synchronisation über die Verwendung von gepulsten LEDs unterschiedlicher Farbe realisiert wurde. Da die zeitliche Abfolge der LEDs bekannt war, konnten bei vier Smartphones die Bilder des roten, grünen und blauen Kanals zugeordnet werden (Aguirre-Pablo et al. 2017). Auch für Schlierenaufnahmen mittels Spiegeln aus einem 3D Drucker (Miller und Loebner 2016) oder für Hintergrundschlierenaufnahmen wurden Smartphones bereits erfolgreich eingesetzt (Settles 2018). Zudem werden Smartphones insbesondere in der Lehre zur Physik für verschiedenste Laborexperimente bereits erfolgreich verwendet. Hierbei macht man sich die unterschiedlichen verbauten Sensoren (Mikrophone, Kamera, Lagesensor, Beschleunigungssensor) zunutze und es kann bereits auf einige Apps zurückgegriffen werden (Goy et al. 2017; Staacks et al. 2018; Dyer 2018).

Da für die Auswertung der PIV Bilder diese bisher auf konventionelle Rechner übertragen werden musste war das Ziel des Projektes im Rahmen studentischer Projekte einen Versuchsstand für die Anwendung der Strömungsvisualisierung mittels Smartphone aufzubauen und ein App zu entwickeln, die die Auswertung der Bilder auf dem Smartphone ermöglicht.

Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau des Praktikumsversuches wird in Abb. 2 gezeigt. Die Messungen werden an einem mit Wasser betriebenen Strömungskanal durchgeführt. Der Kanal wird vollautomatisch von einem Rechner angesteuert und überwacht. Die Messstrecke des Strömungskanals hat einen quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 50 mm und ist etwa 1,5 m lang. Somit kann die sich entwickelnde Kanalströmung direkt nach der Düse und die sich entwickelnde Kanalströmung bis hin zu vollausgebildeten Kanalströmung gemessen werden.

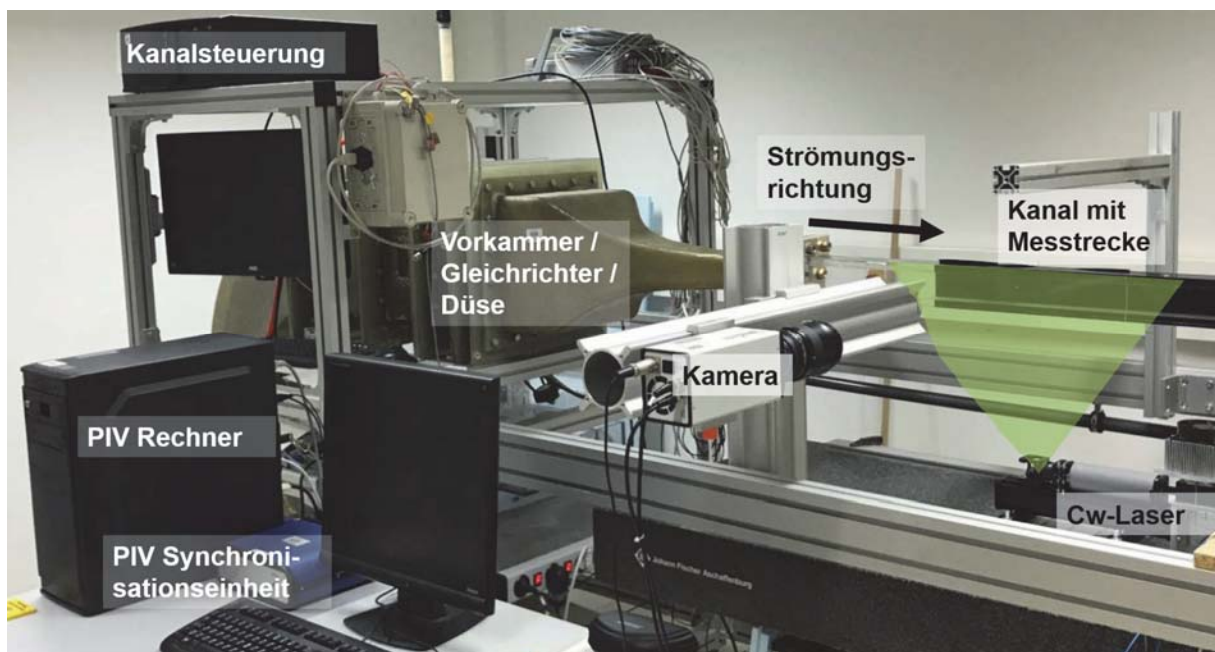


Abbildung 2: Strömungskanal für die Versuche.

Für einen Vergleich mit dem Smartphone werden konventionelle PIV Messungen zeitgleich durchgeführt. Die PIV-Messungen werden über einen separaten Messrechner gesteuert. Zur Hardware des eigentlichen Messsystems gehören Synchronisationseinheit, die Kamera und der cw-Laser, welcher die Messebene von unten beleuchtet.

Bei dem eingesetzten Laser handelt es sich um einen Dauerstrichlaser, der jedoch nur dann ausgelöst wird, wenn ein Signal von der Synchronisationseinheit abgesendet wird. Dadurch kann er in dieser Konfiguration auch zur Aufnahme von Doppelbildern verwendet werden (ohne dass ein Doppelpuls-Laser benötigt wird). Die verwendete Kamera besitzt eine Auflösung von 1280×1024 Pixel und wird im Hochformat eingesetzt. Das verwendete Objektiv hat eine Brennweite von 100 mm. Sowohl für die Ansteuerung der Hardware als auch für die Auswertung wird die Softwarelösung Davis (LaVision GmbH) eingesetzt. Für die Messungen mit dem Smartphone wird dieses auf dem gleichen Träger wie die wissenschaftliche Kamera installiert, jedoch näher an die Messstrecke herangeschoben. Der Laser wird im Dauerstrichmodus betrieben, eine zusätzliche Synchronisation ist nicht mehr notwendig.

Anforderungen an die App(likation)

Um die Strömungsvisualisierung mit dem Smartphone einer breiten Personengruppe einfach zur Verfügung stellen zu können, soll die App sowohl für Android als auch iOS komfortabel über den entsprechenden Appstore zum Download angeboten werden. Wichtig ist, dass die App so gestaltet ist, dass ihre Funktionen intuitiv, ähnlich einer Videobearbeitungsapp verwendet werden können. Für die Anwendung im Laborpraktikum ist es wichtig, dass die unterschiedlichen Parameter wie beispielsweise die Größe der Auswertefenster manuell eingestellt werden können. Zudem sollen die Ergebnisse sowohl aus Echtzeitdaten, als auch aus zuvor aufgenommenen Videos ermittelt werden können. Damit geht die Anwendung über die reine Echtzeitdarstellung hinaus. Um beispielsweise Aufgaben im Rahmen eines Praktikumsversuches abarbeiten zu können oder in einem industrienahen Umfeld kleinere Messaufgaben durchführen zu können, soll es dem Benutzer zudem möglich sein, die Ergebnisse in verschiedenen Formaten und mit ggf. reduzierter Datenmenge abzuspeichern, da Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sehr datenintensiv sind.

Der häufigste Anwendungsfall soll die Benutzung des Live-Modus sein. Nachdem der Anwender die gewünschten Einstellungen vorgenommen hat, wird der Livemodus gestartet und es werden die aktuell von der Kamera aufgenommenen Bilder angezeigt. Über diese Bilder soll dann in Echtzeit das berechnete Vektorfeld überlagert werden. Außerdem soll die mittlere Geschwindigkeit als Text angezeigt werden. Wenn die Strömungssituation verändert wird (siehe Beispiel am Zylinder), spiegelt sich das direkt im Vektorfeld anhand der Richtung und des Betrages der Vektoren wider.

Der zweite Anwendungsfall ist der Aufnahmemodus bei dem nach vorher eingestellten Parametern ein Video der Strömung erstellt und abgespeichert wird. Diese Videos können dann im Analyse-Modus ausgewertet werden. Hier steht nicht mehr die Echtzeitfähigkeit im Vordergrund und es können beispielsweise kleinere Abfragefenster gewählt werden. Je nach Analyseinstellungen dauert es mehrere Minuten bis das Ergebnis vorliegt. Dem Video soll dann wie im Live-Modus das Vektorfeld überlagert werden und der Benutzer kann sich das Video mit dem Vektorfeld anzeigen lassen und beliebig vor- und zurückspulen.

Der Menüpunkt Einstellung muss dem Benutzer ermöglichen, grundlegende Einstellungen zu ändern. Dies beinhaltet das Ab- und Anschalten von Autofokus und Autobelichtungseinstellung, die manuelle Verlängerung/Verkürzung des Zeitabstands zwischen einem Bilderpaar je nach Aufnahmefrequenz und die Veränderung der Anzahl der Abfragefenster in x- und y-Richtung. Zudem soll es die Möglichkeit geben, dass die Einstellungen anhand von voreingestellten Erfahrungswerten gewählt bzw. vollautomatisch eingestellt werden können. Es ergeben sich unter Berücksichtigung aller Anwendungsfälle drei Betriebsmodi: Live-Modus, Aufnahme-Modus und Analyse-Modus, die alle im Rahmen eines studentischen Projekts zur Softwareentwicklung umgesetzt wurden.

Ergebnisse

Das Konzept wurde zunächst in mehreren Funktionsgruppen für die Software umgesetzt. Screenshots der ersten SmartPIV-App sind in Abb. 3 zu sehen. Das Grundmenü mit mittigem Vorschaubild und seitlichen Tasten für Einstellungen (links) ist prinzipiell so aufgebaut, dass es einer typischen Videoaufnahmeapp entspricht und somit leicht bedienbar ist. Auf der rechten Seite ist das Menü zur manuellen Einstellung der Aufnahmeparameter und Parameter zur Auswertung der Bilder für den Live-Modus dargestellt. Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich schon anhand der ersten Testergebnisse, dass es von Vorteil ist die Autofokusfunktion und die automatische Belichtungssteuerung auszuschalten, da es durch eventuelle im Bild befindliche größere Partikel oder Luftblasen zu Artefakten in den Videos kam.

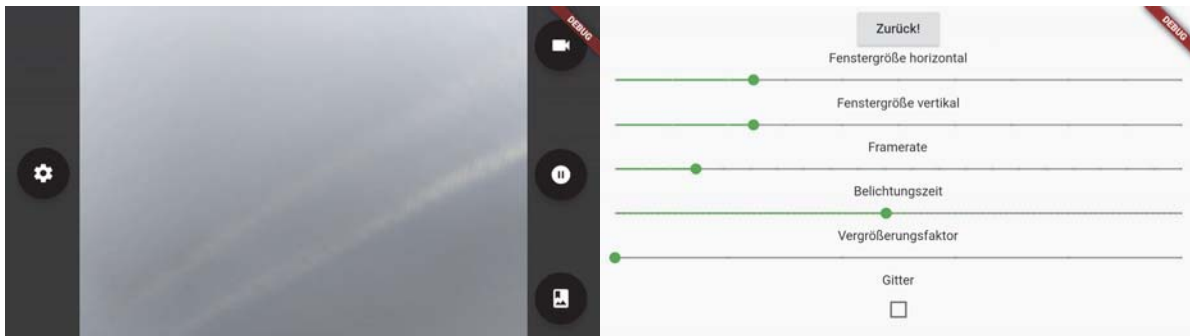


Abbildung 3: Screenshots der ersten SmartPIV-App. Grundmenü mit mittigem Vorschaubild und seitlichen Tasten für Einstellungen (links). Menü zur manuellen Einstellung der Aufnahmeparameter und Parameter zur Auswertung der Bilder für den Live-Modus (rechts).

In Abb. 4 ist das Menü für die Auswahl bereits vorgespeicherter Videos auf der linken Seite zu sehen. Damit können Videos von unterschiedlichen Experimenten gespeichert werden und offline bearbeitet werden. Limitierend ist hier die Größe der Videos. Um viele Videos auf dem Smartphone abspeichern zu können, soll für eine zukünftige Version geprüft werden, inwieweit die Daten des Videos reduziert werden können, indem das zeitliche Sampling der Strömung angepasst wird bzw. räumlich Informationen komprimiert werden. Auf der rechten Seite ist beispielhaft ein überlagertes Vektorfeld mit Skalierung der Größe der Vektoren und deren Farbigkeit anhand der Geschwindigkeit dargestellt.

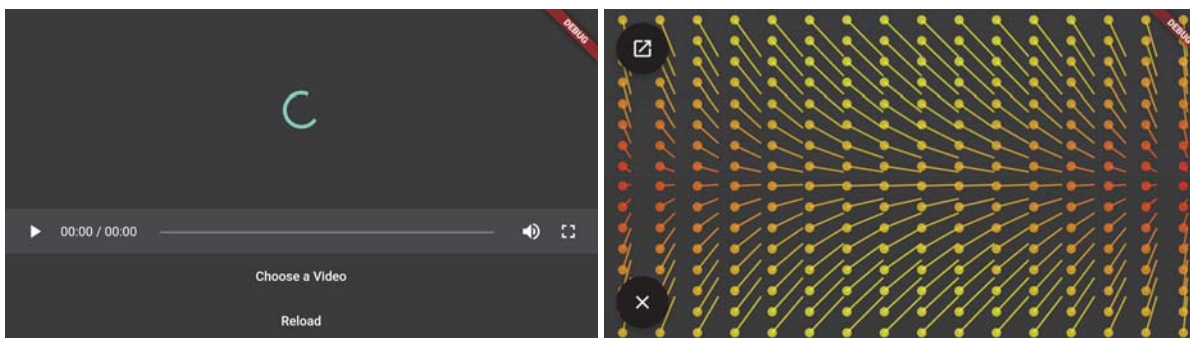


Abbildung 4: Menü für die Auswahl bereits vorgespeicherter Videos (links) und beispielhaft überlagertes Vektorfeld mit Skalierung der Größe der Vektoren und deren Farbigkeit (rechts).

Da die Echtzeitfähigkeit der App im Vordergrund der Entwicklung stand, wurden drei unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes untersucht. Die Auswertung eines Bildes mittels direkter Kreuzkorrelation dauert auf dem Test-Smartphone ca. 15 Minuten. Dieses Verfahren kann daher ausgeschlossen werden. Derzeit wird in einem anderen studentischen Projekt geprüft, ob eine Verlagerung in den Grafikchip hier eine deutliche

Beschleunigung der Berechnung ermöglichen kann. Die Kreuzkorrelation mittels schneller Fouriertransformation (FFT) wurde ebenfalls implementiert und dauert für ein Bild ca. sechs Sekunden. Das Vektorfeld würde also alle 6 Sekunden aktualisiert, was zwar schon sehr schnell ist, allerdings in der Anwendung als zu langsam empfunden wurde. Aus diesem Grund wurde als dritte Variante der optische Fluss (optical flow) implementiert, um die Echtzeitfähigkeit zu erreichen. Die Auswertung eines Bilderpaares dauert auf dem Test-Smartphone ca. 100 ms und erlaubt eine flüssige Aktualisierung der Vektorfelder. Dieses Ergebnis kann in Zukunft nochmals verbessert werden, indem der Algorithmus auf mehreren Kernen gleichzeitig läuft. Die Korrektheit der Ergebnisse aller Methoden wurde anhand der mit dem konventionellen System aufgenommenen und ausgewerteten Daten und der mit dem Smartphone aufgenommenen und mit der konventionellen Software ausgewerteten Daten überprüft. In der aktuellen App findet sowohl der optische Fluss also auch die Kreuzkorrelation mit FFT Verwendung.

Transfer und Ausblick

Die App steht natürlich interessierten Nutzern für die Lehre und Anwendung in anderen Bereichen zur Verfügung. Die Autoren weisen darauf hin, dass die App als nicht-kommerzielles Projekt zur Strömungsvisualisierung entwickelt wurde und übernehmen keine Garantie für die ermittelten Geschwindigkeitswerte und die korrekte Funktionsweise.

In Zukunft ist auch die automatische Bestimmung der Vergrößerung geplant. Dies kann entweder über die einmalige Eingabe einer Referenzlänge erfolgen bzw. gibt es hier Möglichkeiten aufgrund von Kamerainformationen die Vergrößerung intern bestimmen zu lassen. Um die Anwendung flüssiger zu gestalten wird derzeit geprüft, ob die Bildauswertung auf den Grafikchip des Smartphones ausgelagert werden kann.

Nach einer eingehenden Testphase sollen weitere Methoden zur Verbesserung der Ergebnisse (Bildvorverarbeitung und Mittelung der Korrelationsebenen) in eine nächste Version einfließen, wobei stets eine möglichst einfache Bedienung gewährleistet sein soll, um das intuitive Erleben der Strömungsmechanik zu ermöglichen.

Dankesworte

Die Entwicklung der Strömungsvisualisierungen mit dem Smartphone in der Lehre werden im Rahmen eines Fellowships zu „Innovationen in der digitalen Hochschullehre Thüringen“ vom Stifterverband und dem Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft gefördert. Ganz maßgeblich zum Erfolg beigetragen haben außerdem die studentischen Mitarbeiter: Julia Bruischütz, Constanze Poll, Teresa Bravo Roger, Jonas Stephan, Jonas Hüther, Jonas Hiese, Sebastian Jeschke, Marcus Orban, Marcel John, Christian Engelhardt sowie Henning Otto und Jörg König bei der Betreuung am Versuchsstand.

Literatur

Aguirre-Pablo, A.A., Alarfaj, M.K., Li, E.Q., Hernández-Sánchez, J.F., Thoroddsen, S.T. 2017: “Tomographic Particle Image Velocimetry using Smartphones and Colored Shadows”, Scientific Reports 7, 3714, DOI 10.1038/s41598-017-03722-9

Cierpka, C., Buchmann, N.A., Hain, R. 2016: “Strömungsvisualisierung mit dem Smartphone”, Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 06.-08.09.2016, Cottbus, Germany

Cierpka, C., Hain, R., Buchmann, N.A. 2016: “Flow visualization by mobile phone cameras”, Experiments in Fluids 57, 108

Dyer, S. 2018: “Using Mobile Devices to Improve Engineering Education: A Process Control Laboratory Example”, ASEE Conference Boulder, USA, 25. März, Paper ID 24188

Goy, N.A., Denis, Z., Lavaud, M., Grolleau, A., Dufour, N., Deblais, A., Delabre, U. 2017: “Surface tension measurements with a smartphone”, Physics Teacher, American Association of Physics Teachers 55, 498-499

- Kohl, A.** 2017 „Strömungsmessung an einer in Wasser eingetauchten rotierenden Scheibenelektrode“, Bachelorarbeit, Technischen Universität Ilmenau
- Marshall, K.A., Liedtke, A.M., Todt, A.H., Walker, T.** 2017: “Extensional rheometry with a handheld mobile device”, Experiments in Fluids 58, 69
- Miller, V.A., Loebner, K.T.** 2016, „Smartphone Schlieren“, arXiv preprint arXiv:1609.04298, 201
- Mosch, M.** 2016: „Untersuchungen zur Anwendung der PIV mit einer Helmkamera“, Studienarbeit an der Universität der Bundeswehr München
- Settles, G.S.** 2018: “Smartphone schlieren and shadowgraph imaging”, Optics and Lasers in Engineering 104, 9-21
- Stacks, S., Heinke, H., Stampfer, C.** 2018: “Smarte Experimente”, Physik Journal 17, 35-38
- Tuchscherer, M.** 2017: „Stereo-PIV mit zwei Helmkameras“, Masterarbeit an der Technischen Universität Ilmenau