

– Antrag für Fellowship für Innovationen in der digitalen Hochschullehre –

## **SmartStröm – smarte Strömungsvisualisierung mit dem Mobiltelefon in der Lehre für Studierende der Ingenieurwissenschaften und Informatik**

Prof. Dr.-Ing. Christian Cierpka

Technische Universität Ilmenau  
Institut für Thermo- und Fluidodynamik  
Technische Thermodynamik

Prof. Dr.-Ing. Patrick Mäder (JP)

Technische Universität Ilmenau  
Fakultät für Informatik und Automatisierung  
Softwaretechnik für sicherheitskritische Systeme

### Kurzbeschreibung

Smartphones haben unsere Verhaltens- und Kommunikationsweisen in den letzten Jahren 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 in Strömungen gewonnen werden. Die Anschaffungskosten für entsprechende Messsysteme sind allerdings sehr hoch (~150.000 €) und werden daher von vielen Hochschulen und Universitäten gescheut. Mit den gegenwärtigen Rechenleistung und digitalen Kameras, die häufig die Aufnahme von Videosequenzen mit bis zu 240 Hz erlauben, können stattdessen Smartphones genutzt werden, um Strömungen im Rahmen von Laborversuchen zu visualisieren und das Interesse sowie die Kompetenzen für die Fächer Strömungsmechanik, Thermodynamik, Softwaretechnik und Computer Vision zu fördern.

### Persönliche Motivation

**Christian Cierpka:** Neben meiner Forschungstätigkeit qualifiziere ich mich seit einigen Jahren mit Fortbildungen zum Thema (bessere und innovative) Lehre an Hochschulen und arbeite beispielsweise in zwei Studiengangskommissionen (u. A. im Pilotversuch Diplomabschluss an der TU Ilmenau) mit. Das „Zertifikat Hochschullehre Bayern“ mit Inhalten in den Bereichen Lehr-/Lernkonzepte, Präsentation/Kommunikation, Prüfen, Reflexion und Evaluation sowie Beraten und Begleiten habe ich bereits 2016 in der Ausbaustufe und Vertiefungsstufe abgeschlossen (132+80 Arbeitseinheiten von je 45 Minuten) wodurch auch mein Interesse an innovativen Lehrmethoden geweckt wurde. In meiner Lehrfunktion bin ich daher beständig daran interessiert sinnvoll neue Methoden in den Vorlesungsalltag einzubringen und dadurch an der Weiterentwicklung und Verbesserung des Studiums und der Lerninhalte mitzuwirken. Daher begrüße ich ganz besonders, dass im Rahmen des Fellowships durch die öffentlichen Lehr-/Lern-Konferenzen ein intensiver Austausch mit anderen Lehrenden über dieses und andere innovative Lehrkonzepte möglich ist und erhoffe mir hier auch für meine eigene Lehre neue Impulse (gern auch aus anderen Fachbereichen) zu erhalten.

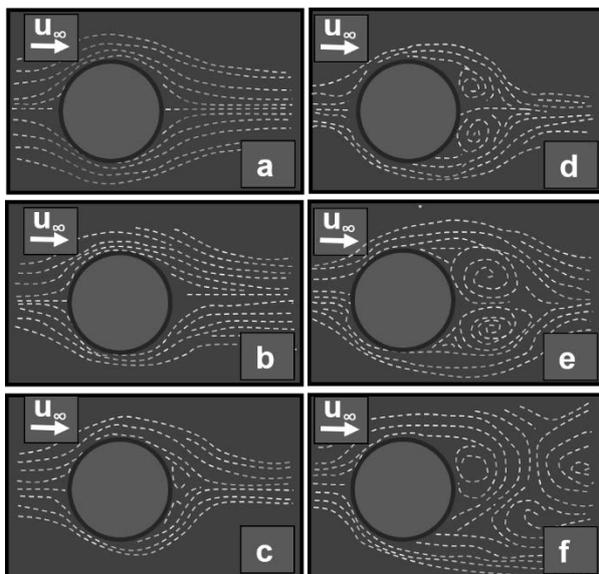
Meine Lehrphilosophie besteht darin in den Vorlesungen und Übungen anhand von nachvollziehbaren Beispielen aus der Industrie, der aktuellen Forschung und dem Alltag die wesentlichen Inhalte der Thermofluidodynamik zu vermitteln und somit Zusammenhänge aufzuzeigen. Ich möchte die Studierenden in die Lage versetzen ihr Potential zu nutzen und

ingenieurtechnische Problemstellungen selbständig und zielorientiert analysieren und lösen zu können. Neben der Darstellung der notwendigen fachlichen Inhalte, lege ich besonderen Wert darauf das Interesse, die Neugier und im besten Falle Begeisterung für das Fachgebiet zu wecken. Hier habe ich anhand eigener Erfahrungen bei der Betreuung von Übungen und Laborpraktika festgestellt, dass besonders dann Lernerfolge zu erzielen waren, wenn die Studierenden die in den Vorlesungen theoretisch erarbeiteten Grundlagen selbständig anhand eigener Experimente überprüfen konnten. Häufig ist der Umgang mit komplexen Mess- und Versuchseinrichtungen aber schwierig, da zum einen die nötige Erfahrung und das Verständnis fehlt, zum anderen können sehr teure Geräte oft nicht in der Lehre eingesetzt werden. Da die Studierenden auf der anderen Seite aber den Umgang mit dem Smartphone täglich erleben, könnte hier der Schlüssel liegen diese Hürden abzubauen und den Thüringer Absolventen besonders in Zeiten der digitalen Industrie 4.0. einen Vorteil auf dem Arbeitsmarkt zu verschaffen.

**Patrick Mäder.** Aus Sicht eines Hochschullehrers im Bereich Informatik bietet das vorgeschlagene Vorhaben ein ideales Anwendungsbeispiel zur Verwendung in Seminaren, Softwareprojekten und Abschlussarbeiten. Die erfolgreiche Vermittlung von Informatikinhalten erfordert aus meiner Erfahrung zum einen intuitive und verständliche Beispiele und zum anderen das Anwenden der erlernten Konzepte. Die SmartStröm-Idee bietet beides. Studierende bekommen die Gelegenheit mit neuen Technologien (Software und Hardware) ein wissenschaftlich und technisch anspruchsvolles Problem zu lösen und können ihre Lösung anderen Studierenden zur Verfügung stellen. Darüber hinaus finde ich es sehr reizvoll, mit Hilfe dieses Vorhabens fakultätsübergreifende Kontakte zwischen den Lehrenden, aber auch den Studierenden zu etablieren.

### Detaillierte Beschreibung des Vorhabens

Bei der Strömungsmechanik und der Thermodynamik handelt es sich erfahrungsgemäß um



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

Fachgebiete die von den meisten Studierenden als schwierig eingestuft werden. Das liegt sicherlich auch daran, dass Strömungsvorgänge nur anhand nicht-linearer Differentialgleichungen beschrieben werden können und eben diese Nichtlinearität immer wieder zu überraschenden Effekten führt. So ist zum Beispiel die Strömung hinter einem Hindernis sehr komplex und ändert sich mit der Anströmgeschwindigkeit so grundlegend, dass hier zunächst kein intuitiver Zugang möglich ist. Dies ist im Alltag beispielsweise an Brückenpfeilern zu beobachten. Bei kleiner Anströmgeschwindigkeit wird das Hindernis (beispielsweise ein Zylinder) laminar umströmt und die Strömung liegt komplett an (Abb. 1a). Mit steigender Geschwindigkeit kommt es zur Ablösung und zur Wirbelbildung (Abb. 1c-e), die mit einer bestimmten Frequenz

abschwimmen (von Kármánsche Wirbelstraße). Wird die Geschwindigkeit weiter gesteigert, entwickelt sich ein turbulenter Nachlauf (Abb. 1f). Wird die Anströmgeschwindigkeit schließlich turbulent, verschieben sich die Ablösepunkte entgegen der Intuition wieder nach hinten. Neben der Ausbildung eines Nachlaufs mit Wirbelstraße sind das Konzept und das Verhalten der Grenzschichtströmung, sowie die Ablösung in einem Diffusor und die Ausbildung eines Rezirkulationsgebietes für das Verständnis enorm wichtig aber nicht intuitiv einsichtig.

Noch komplexer stellen sich thermische Konvektionsströmungen mit Wärmeübertragung in Wasser und Luft dar. Wärmeübertragungsprozesse spielen in Wärmekraftmaschinen, in der Metallurgie, in der Raumklimatisierung und in vielen anderen ingenieurtechnischen Anwendungen eine wichtige Rolle. Die Wärmeübertragung durch natürliche und erzwungene Konvektion ist dabei durch die Existenz von großskaligen Strömungsmustern gekennzeichnet, welche im Originalmaßstab nur mit sehr aufwändiger Messtechnik visualisiert werden können und intuitiv schwer zu verstehen sind. Modellexperimente können hierzu jedoch schon während der Ausbildung von Studierenden der Ingenieurwissenschaften dazu dienen, diese thermodynamischen Prozesse in anschaulichen Versuchen den Studierenden nahe zu bringen und sie z.B. für die hochkomplexe Analyse von Luftströmungen in Büroräumen, Fahrzeugkabinen und Flugzeugen zu interessieren.

Im Institut für Thermo- und Fluidodynamik gibt es dazu jahrelange Erfahrungen und weltweit einzigartige Versuchseinrichtungen wie das „Ilmenauer Fass“ für das Studium der natürlichen Konvektion und die „SCALEX“-Anlage zur Untersuchung von Mischkonvektion im stark verkleinerten Maßstab. Leider können diese Anlagen bisher aufgrund ihrer Komplexität nicht in die Lehre im Studium einbezogen werden. Die Sichtbarmachung von Strömungsstrukturen in Konvektionsströmungen mit Smartphones, z.B. in der „SCALEX“-Anlage und in weiteren vereinfachten Konvektionsmodellzellen wäre ein pädagogisch wichtiger Beitrag zum Verständnis von kohärenten Strukturen in Konvektionsströmungen in Natur (z.B. Entstehung von Wirbelstürmen) und Technik (z.B. Behaglichkeit in Raumluftströmungen) und würde es zudem ermöglichen Studierende an aktuelle Forschungsprojekte heranzuführen und so dem Humboldt'schen Ideal von forschender Lehre näher zu kommen.

### Curriculare Einbindung

Im Rahmen des Studiums an der Fakultät Maschinenbau an der TU Ilmenau sind Vorlesungen zur Thermofluidodynamik, Strömungsmechanik und Aerodynamik für die Bachelorstudiengänge Maschinenbau, Mechatronik und Fahrzeugtechnik sowie den neu geschaffenen Diplomstudiengang Thermo- und Fluidodynamik fest verankert. Im Master und Hauptstudium des Diploms gibt es dann eine Spezialvorlesung zum Thema Strömungsmess- und Versuchstechnik. Hier werden auch Praktikumsversuche angeboten, mit dem Ziel das selbstständige wissenschaftliche Arbeiten zu erlernen und einen, auf eigenen Erfahrungen basierenden Zugang zur Strömungsmechanik/Thermodynamik zu erlangen. Dass nach Praktika, bei denen die Versuche durch die Lehrenden vorgeführt werden, die Studierenden nicht ausreichend auf selbstständige Forschungstätigkeiten vorbereitet sind, zeigt sich insbesondere bei der Integration der Studierenden in Drittmittelprojekte im Rahmen deren Abschlussarbeiten. Häufig sind die Studierenden dabei unsicher, wenig selbstständig und haben zudem Berührungsängste bzw. Defizite beim Umgang mit modernen Messtechniken, insbesondere bei der Programmierung im Rahmen der Datenaufbereitung.

Der Ausbau des wissenschaftlichen Praktikums als wichtige 3. Säule neben Vorlesung und Übung ist notwendig, um das theoretisch vermittelte Wissen durch aktives Erleben zu vertiefen. Die Visualisierung von Konvektionsströmungen spielt dabei sowohl für Themen der Vorlesung Technische Thermodynamik (z.B. Sonnenkollektoren in Solarkraftwerken) als auch für Anwendungsbeispiele der Vorlesung Wärmeübertragung (Charakterisierung von

Wärmeübertragern) eine wichtige Rolle. Darüber hinaus besteht ein sehr enger Bezug im Rahmen des Lehrexports für die Masterausbildung Regenerative Energietechnik und zu den im Mastermodul Thermo- und Fluidodynamik im Maschinenbau angebotenen Spezialvorlesungen zur Thermischen Konvektion und Strukturbildung in turbulenten Strömungen.

An der Fakultät für Informatik und Automatisierung soll das Vorhaben im Rahmen des obligatorischen Softwareprojekts (Bachelor), des Wahlpflichtmoduls Parallel Computing und einer Reihe von Haus- und Abschlussarbeiten eingebunden werden. Im Softwareprojekt, bearbeitet eine Gruppe von ca. sechs Studierenden eine anspruchsvolle Implementierungsaufgabe von der Spezifikation, Architektur, Implementierung bis zum Deployment. Hier bietet SmartStröm eine ideale Herausforderung für mehrere aufeinander aufbauender Aufgabenstellungen. In der Veranstaltung Parallel Computing werden Grundlagen, Konzepte und Technologien paralleler Programmierung vermittelt. Insbesondere die Entwicklung von parallelen Programmen für mobile Geräte stellt hier ein neues, sehr wichtiges Anwendungsgebiet dar. SmartStröm soll in eines der obligatorischen Assignments im Rahmen der Veranstaltung eingebunden werden. Darüber hinaus wird derzeit ein neues Modul „App Development“ erarbeitet, welches im Sommersemester 2019 erstmal angeboten werden soll und in welchem SmartStröm als ein durchgehendes Beispiel eingebunden werden soll.

### Projektziel

Aus der Erkenntnis heraus, dass ein intuitiver Zugang zum Verständnis der komplexen Strömungsvorgänge nur über die Anschauung möglich ist, wurde die Idee entwickelt das Smartphone, welches mittlerweile aus dem Alltag der Studierenden nicht mehr wegzudenken ist, in den Lernprozess zu integrieren. Ziele sind zum einen das strömungsmechanische Verständnis durch die Anschauung zu verbessern und zum anderen Hemmnisse im Bereich Datenauswertung und Programmierung abzubauen. Dazu soll eine Reihe von fakultativen Praktikumsversuchen mit insgesamt 4 SWS für Studierende im Master und Diplom aufgebaut werden.

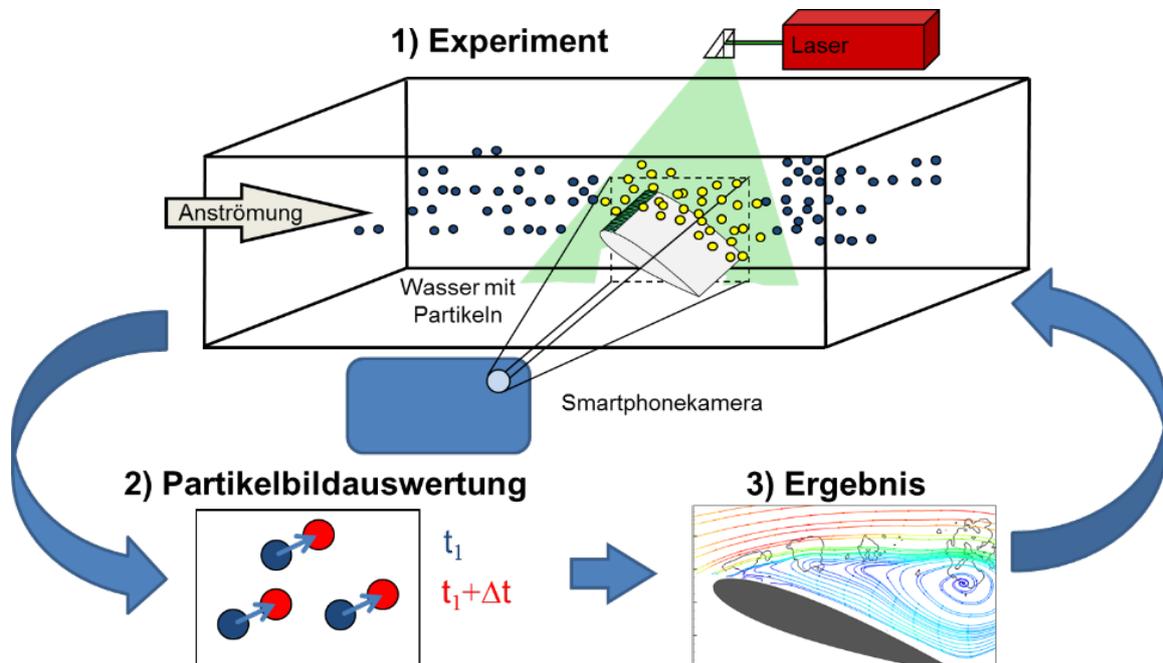
### Projekttablauf

In dem geplanten Projekt sollen die Studierenden die Möglichkeit bekommen im Rahmen mehrerer Laborversuche mit ihren eigenen Smartphones Strömungen zu visualisieren. Bei der Particle Image Velocimetry (PIV) werden der Strömung kleine Partikel beigegebenen. Über die digitale Auswertung der Partikelbilder in einem Smartphone Video kann die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden (ähnlich der in Abbildung 1 gezeigten Aufnahmen mit Aluminiumglitter). Dazu müssen die sogenannten Tracerpartikel der Strömung möglichst ideal folgen und werden typischerweise mit einem Laserlichtschnitt beleuchtet (Abbildung 2, a). Über die Bildaufnahme zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten kann über eine Korrelation bzw. eine Einzelpartikelverfolgung die zurückgelegte Wegstrecke (bei bekannter Vergrößerung) bestimmt und bei bekanntem Zeitversatz die Geschwindigkeit errechnet werden (Abbildung 2, b-c). Wesentliche Kernelemente eines PIV-Systems sind daher eine Lichtquelle und eine Kamera, mit der in kurzem Zeitabstand mindestens zwei Bilder aufgenommen werden können. Um auch hohe Geschwindigkeiten messen zu können, werden bei diesen Systemen meist Doppelpulslaser und Doppelbildkameras verwendet. Diese müssen zusätzlich über eine Elektronik präzise synchronisiert werden, was wissenschaftliche PIV Systeme teuer in der Anschaffung macht (100.000-150.000 €). Die hohen Anschaffungskosten eines PIV-Systems mit Laser und wissenschaftlicher Kamera lassen

Universitäten vor der Anschaffung und dem Einsatz dieser Systeme in der Lehre häufig zurückschrecken. Gegenüber den wissenschaftlichen Anforderungen sind die Strömungsgeschwindigkeiten für Experimente für die Lehre oft moderat und es besteht nicht die Notwendigkeit die Messunsicherheit auf ein Minimum zu reduzieren, weshalb wesentlich einfachere Kameras genutzt werden können [1]. Durch den Einsatz von cw-Lasern (Dauerstrichlaser) oder LEDs zur Beleuchtung und der Verwendung von Smartphonekameras kann der Preis auf einen Bruchteil von wissenschaftlichen Systemen reduziert werden.

Moderne Smartphones haben für Sportaufnahmen heutzutage häufig Kameras verbaut, die derzeit mit bis zu 240 Hz Videos aufnehmen können, wobei die typischen Sensorabmessungen 1280x720 Pixel bei 1..1,6  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$  betragen. Da diese Geräte als Massenwaren produziert werden, liegen die Kosten meist unter 1.000 Euro und nahezu jeder Student besitzt ein solches Gerät. Wenn Videos von Partikelverteilungen in einer Strömung aufgenommen werden, können diese prinzipiell für die Geschwindigkeitsbestimmung mittels PIV verwendet werden. Dies wurde vom Antragsteller Cierpka für einen einfachen Testaufbau bereits auf nationalen und internationalen Konferenzen dargestellt und in einem Journalbeitrag diskutiert [1-3]. Hier wurde in einem Vergleich der Ergebnisse zwischen einem Smartphone und einer wissenschaftlichen Hochgeschwindigkeitskamera sehr gute Übereinstimmung erzielt. Die in studentischen Abschlussarbeiten entwickelten Verfahren zur Messung der Frequenzstabilität für Helmkameras lassen sich auf das beantragte Projekt übertragen [4,5]. Momentan wird in einer gemeinsam von beiden Antragstellern betreuten Masterarbeit der Einsatzbereich hinsichtlich der Rechenleistung moderner Smartphones für das beantragte Projekt untersucht [6].

Eine Übersicht, wie das SmartStröm-System im Rahmen der Praktika für die Lehre eingesetzt werden soll, ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Übersicht über die Anwendung des geplanten Messsystems mit dem Smartphone.

Besonders reizvoll ist die schnelle Datenauswertung, die den unmittelbaren Einfluss der Parameter (beispielsweise Anstellwinkel, Anströmgeschwindigkeit, Wärmeeintrag) auf die Strömung zeigt. Hier können die Studierenden die Reaktion der Strömung auf die vorgenommenen Einstellungen direkt erleben und ein intuitives Verständnis entwickeln. Der am Fachgebiet vorhandene Wasserumlaufkanal soll für den Einsatz des SmartStröm-Systems entsprechend angepasst werden. Besonders wichtig ist hier die Lasersicherheit, damit ein

sicheres Arbeiten mit größeren Studierendengruppen möglich wird. Zusätzlich sollen drei unterschiedliche Modelle für die Strömungssichtbarmachung (Zylinder, Tragflügel und Diffusor) hergestellt werden. Diese Modelle sollen möglichst einfach zu wechseln sein, um einen variablen Praktikumsversuch zu erlauben. Bei dem Tragflügel soll zudem der Anstellwinkel variiert werden können, um dessen Einfluss auf den Auftrieb direkt erlebbar zu machen. Anhand des Modells des Diffusors soll das Konzept der Grenzschichtströmung visualisiert werden und der Diffusorwinkel verstellt werden können. Für thermisch getriebene Strömungen kann das SmartStröm-System ohne größere Umbauten an Konvektionsmodellzellen eingesetzt werden und ist daher auch als Demonstrationsexperiment für unterschiedliche Vorlesungen ideal einsetzbar.

Während des Sommersemesters (erstmalig 2019) ist dann folgender Ablauf geplant, wobei eine Einheit 4 Wochenstunden entspricht:

Zunächst werden die Studierenden im Rahmen einer gemeinsamen Vorlesung der Antragsteller über die Grundlagen der Messtechnik und Datenverarbeitung informiert. Zudem sollen sie über die zu erwartende Strömung und deren Messung gemeinsam unter Anleitung reflektieren und das prinzipielle Messsystem und die Anforderungen an das eigene Smartphone erarbeiten (1). Dazu werden die Studierenden in Gruppen (erfahrungsgemischt, max. 5 Studierende) eingeteilt. Die Studierenden installieren sich zunächst die bis dahin vorliegende erste Version der App aus dem entsprechenden App Store. Die App soll eine Reihe von einzustellenden Parametern bieten, welche zu alternativen Versuchen im Verlauf der Experimente genutzt werden können (u.a. Frame-Rate, Tracking-Verfahren, Annahmen über die zu messende Strömung).

Dann erfolgt in gemeinsamer Arbeit die grundlegende praktische Umsetzung am Wasserkanal (2). Im Rahmen von insgesamt fünf gemeinsamen Rechnerübung (3,5,7,9,11) wird die Software entwickelt, wobei die Studierenden hier die Grundlagen vermittelt bekommen und während der nächsten Versuche Anpassungen und Verbesserungen selbständig vornehmen müssen, um für die unterschiedlichen Modelle gute Ergebnisse zu erzielen. Jetzt folgen die eigentlichen Versuche zum Grenzschichtkonzept und der Diffusorströmung (4), der Zylinderumströmung (6), der Tragflügelumströmung (8), der thermischen Konvektionsströmung (10). Zudem gibt es zwei Übungen zur Datenauswertung und Darstellung (12,13). In einer Abschlussveranstaltung (14) sollen die Ergebnisse sowohl unter strömungsmechanischen Gesichtspunkten, als auch im Rahmen der Softwareentwicklung diskutiert werden. Im Sinne des Flipped Classroom Konzeptes sollen die Studierenden lernen unter Begleitung durch die Antragsteller das komplexe Problem in interdisziplinärer Teamarbeit gemeinsam zu lösen und Ergebnisse konstruktiv zu diskutieren.

*Ablaufplan (grün => praktische Arbeit, blau => gemeinsame Gruppenarbeit am Rechner, schwarz => Vorlesung)*

1. Vorlesung zu den Grundlagen der PIV Messtechnik und den Messanforderungen (gemeinsame Diskussion und Erarbeitung des Messkonzeptes)
2. **Praktische Umsetzung (ungestörte Kanalströmung, Laserbeleuchtung, Partikelfolgeverhalten, Bildauslesen in Matlab)**
3. Einführung zur Erstellung der Software (Rechnerübung in Matlab)
4. **Grenzschichtströmung (Einfluss der Gradienten auf die Software) und Diffusorwinkel (Einfluss des Diffusorwinkels auf die Strömung)**
5. **Datenauswertung und Softwareanpassung (Bestimmung des Ablösekriteriums und typischer Grenzschichtparameter)**

6. Zylinderumströmung (Bildauswertung, Anpassung der Software für runde berandeter Strömung, strömungsmechanische Messreihe)
7. Datenauswertung und Softwareanpassung (Entstehung und Beeinflussung des Zylindernachlaufes)
8. Tragflügelprofil (Bestimmung des Widerstandes aus dem Nachlauf, Vergleich mit Kraftmessung, Variation des Anstellwinkels und der Anströmgeschwindigkeit)
9. Datenauswertung und Softwareanpassung (Auftriebs- und Widerstandsberechnung aus Geschwindigkeitsdaten)
10. Thermische Konvektionsströmungen (Rayleigh-Bénard-Zelle, Modell KFZ-Scheinwerfer, Modellraum)
11. Datenauswertung und Softwareanpassung (geometrische Vermessung großskaliger Strömungsmuster)
12. Datenauswertung und Aufarbeitung (Vektordarstellung, Export der Ergebnisse)
13. Darstellung von Messdaten, Diskussion und Statistik
14. Abschlussbesprechung und Präsentation der Ergebnisse

### Vermittelte Kernkompetenzen

Während der Laufzeit des Projektes müssen die Studierenden die Inhalte selbständig nacharbeiten und sich für die Entwicklung einzelner Softwaremodule selbständig organisieren. Durch dieses integrierte Konzept sollen die folgenden Kompetenzen vermittelt werden:

- Fähigkeit zur Teamarbeit (Arbeitsverteilung, Zeitplanung, Versuchsplanung)
- Fähigkeit zur Präsentation eigener Ergebnisse und wissenschaftlichen konstruktiven Diskussion vor der Gruppe
- Fähigkeit zur Darstellung eigener Ergebnisse in technischen Berichten
- Erfahrung dabei Algorithmen anhand von Literatur zu erarbeiten und praktisch umzusetzen
- Erfahrung mit dem Einsatz moderner Softwarerepositorysysteme zum verteilten Arbeiten an umfangreichen Projekten
- Fähigkeit Fachliteratur (auch englisch) gezielt suchen, lesen und interpretieren können
- Überblick über wesentliche Strömungsphänomene und deren Messung

### Potentiale

Das Projektziel kann als erreicht gelten, wenn die Studierenden einen anschaulicheren und intuitiveren Zugang zu den eingangs beschriebenen komplexen strömungsmechanischen Phänomenen erhalten und sich für die Fächer Strömungsmechanik und Thermofluiddynamik und Softwareentwicklung interessieren und im besten Fall begeistern. Die entwickelten Versuche sollen zudem im Rahmen der Vorstellung des eigenen Fachs für ein breites Publikum (Tag der offenen Tür, Mädchen machen Technik, etc.) genutzt werden, um hier das Studieninteresse der jungen Schulabsolventen zu steigern und die Studienanfängerzahlen für Ilmenau zu erhöhen.

Neben der Vermittlung der beschriebenen Kernkompetenzen inkl. Softskills ergeben sich positive Effekte für die Industrie. Häufig wurde dem Antragsteller gegenüber von Industrievertretern im Rahmen von Messen, Fachtagungen und Industrieprojekten erklärt, dass die PIV Messtechnik ein hervorragendes Werkzeug sei, die Bedienung jedoch Experten mit einem hohen Erfahrungsschatz erfordert und daher die Messtechnik unpraktikabel sei. Die Studierenden, welche die Veranstaltung besucht haben, kennen sich nicht nur mit der Bedienung eines PIV Messsystems aus, sondern haben durch die eigene Auslegung und

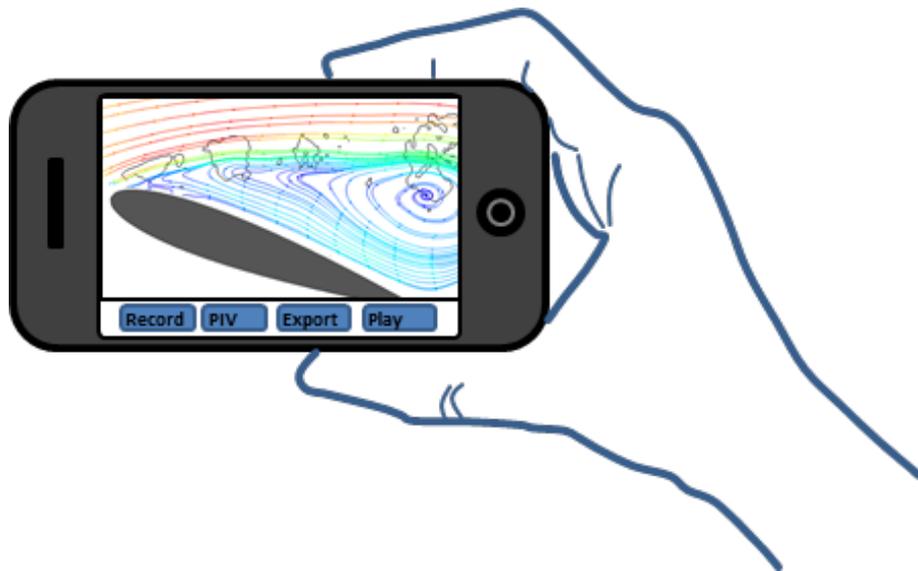
Programmierung der einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel die PIV-Messtechnik soweit verinnerlicht, dass sie dieses Wissen auch in der Industrie (ggf. auch mit dem Smartphone oder einfachen Konsumentenkameras) anwenden können. Somit findet die Messtechnik eine weite Verbreitung und die Berufsaussichten Ilmenauer Studierender können weiter verbessert werden.

Zusätzlich zu der eigentlichen strömungsmechanischen und thermodynamischen Untersuchung werden die Studierenden an das Programmieren herangeführt. Hier bestehen erfahrungsgemäß ebenfalls größere Berührungspunkte. Da die Programmierung hier als Mittel zum Erkenntnisgewinn eingesetzt wird und nicht als Ausbildungsinhalt um ihrer selbst willen, ist zu erwarten, dass die Herangehensweise der Studierenden viel vorurteilsfreier ist und leichter Erfolge erzielt werden können. Zudem wird das Smartphone direkt eingebunden, wodurch die Motivation der Studierenden für die Programmierung gesteigert werden kann.

Nicht zuletzt sollen die im Rahmen des Projektes entwickelten Ansätze und Programme auch anderen Universitäten zur Verfügung gestellt werden, um die Lehre im Bereich Strömungsmechanik und Thermofluidodynamik anschaulicher zu gestalten und die geplante Lehrinnovation nicht nur an der TU Ilmenau zu verstetigen. In persönlichen Gesprächen auf Konferenzen und Fachtagungen wurde dem Antragsteller von mehreren Lehrenden im Bereich Strömungsmechanik ein großes Interesse an den Projektergebnissen bekundet. Daher soll zum Abschluss des Projektes ein Workshop organisiert werden, um das System interessierten Lehrenden vorzustellen und den Transfer an andere Universitäten zu begleiten.

Im Zuge der Nachbearbeitung soll ebenfalls geprüft werden, ob sich die erarbeiteten Programme in eine Software für das Smartphone (App) überführen lassen (siehe Konzept in Abbildung 4), um diese auch für anderen Universitäten für die Lehre bereitstellen zu können. Entsprechende Anfragen aus dem Fachkollegium wurden bereits an den Antragsteller Cierpka herangetragen. Ein zusammenfassender Bericht zum Ergebnistransfer (neben den Lehr-/Lern-Konferenzen) soll bis Ende 2019 auf den Internetseiten der Fachgebiete frei zugänglich sein. Zudem wird erwartet, dass der Austausch mit anderen Fellows im Rahmen der Lehr-/Lern-Konferenzen dazu beitragen wird neue Ansätze in die Lehre der MINT-Fächer zu integrieren, um die Ingenieur- und Informatikausbildung an der TU Ilmenau noch attraktiver zu machen und dem Rückgang der Anfängerzahlen mit innovativen Konzepten entgegenzuwirken.

Da die entwickelten Ansätze auch in anderen Wissensgebieten eingesetzt werden können, wo es um Datenverarbeitung und die Visualisierung komplexer Vorgänge mit Alltagstechnologie geht, wird der Austausch mit anderen Fellows im Bereich der digitalen Lehre in Thüringen neue Ideen generieren, die Studierenden für komplexe Sachverhalte zu interessieren und Brücken zwischen den Ingenieurwissenschaften und anderen Disziplinen zu schlagen.



**Abbildung 3:** Mögliche Software zur einfachen Strömungsvisualisierung mit dem Smartphone im Rahmen der Lehre.

Literatur:

1. C. Cierpka, N. Buchmann, R. Hain (2016) Flow visualization by mobile phone cameras, Experiments in Fluids, 57:108, DOI: 10.1007/s00348-016-2192-y
2. C. Cierpka, N. Buchmann, R. Hain: Strömungsvisualisierung mit dem Smartphone, Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 06.-08.09.2015, Cottbus, Germany
3. R. Hain, N.A. Buchmann, C. Cierpka: On the possibility of using mobile phone cameras for flow visualization, 18th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 04.-07.07.2016, Lisbon, Portugal
4. M. Mosch (2016), Studienarbeit „Untersuchungen zur Anwendung der PIV mit einer Helmkamera“, Universität der Bundeswehr München
5. M. Tuchscherer (2017), Masterarbeit „Stereo-PIV mit zwei Helmkameras“, Technische Universität Ilmenau
6. C. Engelhardt (2018), Masterarbeit „Strömungsvisualisierung“, Technische Universität Ilmenau
7. L. Prandtl und A. Betz (1927), Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen - III. Lieferung, Verlag Oldenbourg