

Komplexe Systeme mit Methoden des Maschinellen Lernens modellieren - KoSyMo

Jan Heiland¹ und Christian Cierpka²

¹Technische Universität Ilmenau, Institut für Mathematik, Weimarer Straße 25, 98693 Ilmenau

²Technische Universität Ilmenau, Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Am Helmholtzring 1, 98693 Ilmenau

Persönliche Motivation

Jan Heiland: In meiner gesamten Laufbahn als Hochschullehrer war es mein Ansatz, die Mathematik als etwas Praktisches darzustellen – sei es die Arbeit mit abstrakten, mathematischen Konzepten oder die Anwendung auf konkrete Fragestellungen. Nicht zuletzt mangels passender Versuchsaufbauten, liegt die konkrete Anwendung typischerweise nur in Form von Daten für die Analyse oder Software für eine Simulation vor. In diesem Projekt sehe ich die Chance auf eine echte Versuchsumgebung die technisch relevant, physikalisch interessant und, vor und trotz allem, mathematisch zugänglich für Student*innen aller Altersstufen ist.

Methodisch sehe ich das Projekt als ein erfolgreiches Lehrbeispiel für das Zusammenspiel von Daten, Algorithmen, Technik und modernen Softwareumgebungen. Liegen Daten in Echtzeit vor, bekommen die Studierenden unmittelbares Feedback über den Erfolg ihrer Modellierungsansätze. Gleichzeitig wird durch den realen Aufwand einer Versuchsdurchführung, ein ressourcenbewusster und effizienter Umgang mit Daten gelernt und durch die direkte Rückkopplung von Modell und Messdaten auch die kritische Auseinandersetzung mit *Maschinellern Lernen* oder *first principles* Modellierungsmethoden geübt. Unabhängig von allem bietet das Projekt unseren Mathematik-Student*innen die einzigartige Erfahrung praktischer Aspekte realer Experimente, wie begrenzte Verfügbarkeit von Daten und Latenz, Fehlerbehaftung und Messunsicherheit oder auch Ausfall in der Übertragung, die das Studium sonst nicht bieten kann.

Insgesamt freue ich mich über die Gelegenheit, ein innovative Lehr- und Lernumgebung zu entwickeln, die aktuellen Herausforderungen im *Zeitalter der Daten* Rechnung trägt. Als Referenz möchte ich meine Tätigkeit im Graduiertenkolleg *MathCoRe* und im NFDI Konsortium *MaRDI*¹, wo wir Mathematik, Daten, Algorithmen und Ausbildung zusammenbringen. Besonders sehe ich der Möglichkeit entgegen, im Rahmen des Projektes, einen interdisziplinären Austausch zu Lehrthemen zu pflegen. Den Erkenntnisgewinn aus fachübergreifenden Diskussion schätze und kenne ich aus Fortbildungen (zu *genderbewusst Lehren*), aus Sommerakademien (während meiner Promotion) und aus aktuellem Austausch über *social media*, woraus, beispielsweise, unser *MathCoRe Writing Camp*² entstand.

¹MaRDI – *Mathematical Research Data Initiative* – www.mardi4nfdi.de

²www.mathcore.ovgu.de/index.php?show=events

Christian Cierpka: Das Thema Lehre und kontinuierliche Entwicklung der Inhalte und Methoden ist mir sehr wichtig, weshalb ich in mehreren Studiengangskommissionen mitgearbeitet habe und unter anderem in der Gründungskommission des Studiengangs „Nachhaltige Energiesysteme“ aktiv bin. Um mir neue Methoden anzueignen, qualifizierte ich mich bereits seit der frühen Postdoktorandenphase mit Fortbildungen zum Thema (bessere und innovative) Lehre an Hochschulen. 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. 2018 konnte ich mit meinem Kollegen Patrick Mäder eine Messtechnik für die Strömungsmechanik als HandyApp (SmartPIV³) im Rahmen des Fellowships entwickeln (Cierpka et al., 2021). Diese App wird mittlerweile insbesondere in Ländern, in denen die experimentelle Infrastruktur nicht gegeben ist zur Lehre eingesetzt und ist damit über unsere Erwartungen hinaus verstetigt wurden. Während der Laufzeit habe ich es als besonders wertvoll empfunden, mich auf den diversen Lehr-/Lernkonferenzen mit anderen Lehrenden über innovative Lehrkonzepte auszutauschen. Insbesondere die verschiedenen Herangehensweisen in anderen Disziplinen (zum Beispiel den Geisteswissenschaften) hat mir vielfach neue Impulse für die Lehre in den Ingenieurwissenschaften gegeben.

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 Student*innen die in den Vorlesungen theoretisch erarbeiteten Grundlagen selbständig anhand eigener Experimente überprüfen konnten. Dies funktionierte selbst bei Schülerinnen und Schülern der fünften Klasse aus dem Gymnasium, die über eigene kleine Versuche während eines Besuchs der TU Ilmenau im Wind- und Wasserkanal die Formel für den Auftrieb bei Flugzeugen und Windturbinen nachvollziehen konnten.

Detaillierte Beschreibung des Vorhabens

In der Strömungsmechanik und Thermodynamik erleben die Student*innen wie fundamentale Vorgänge anhand von komplexen Differentialgleichungen beschrieben werden können. Die Umströmung eines Tragflügelprofils kann hierbei als Beispiel für ein komplexes System herangezogen werden. Mit steigendem Anstellwinkel α steigt der Auftrieb zunächst linear an, wie in Abbildung 1 deutlich zu sehen ist.

Die Strömung liegt dabei an, weshalb die Partikelbahnen (rechts unten) geordnet erscheinen. Bei einem zu großen Anstellwinkel kann die Strömung der Profilkontur nicht mehr folgen und es kommt zu Strömungsablösung und einem deutlichen Anstieg

³<https://smartpiv.app/>

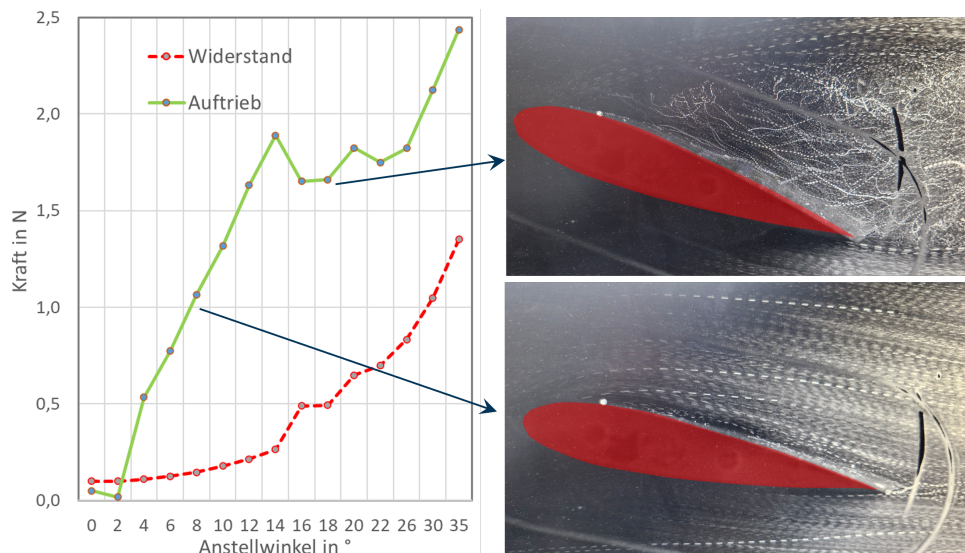


Abbildung 1. Auftrieb und Widerstand bei der Umströmung eines NACA0015 Tragflügelprofils (links). Dazugehöriges Langzeitbelichtung mit Partikelbahnen aus dem Wassenumlaufkanal der TU Ilmenau (rechts).

des Widerstandes. Je nach Strömungsform lösen sich Wirbel ab, die dynamische Lastwechsel verursachen. Methoden der Strömungsbeeinflussung können hier genutzt werden, um die Strömung insgesamt zu verbessern (Cierpka et al., 2010, 2008). Wie häufig in solchen komplexen Systemen ist eine ganzheitliche Beschreibung in Raum und Zeit nicht möglich bzw. zu rechenintensiv. Daher kommen zunehmend datenbasierte Methoden zur Modellbildung und Systemanalyse zum Einsatz.

Generell ist die mathematische Modellierung von Prozessen sowohl Forschungsgegenstand als auch Anwendungsbereich der Mathematik und dementsprechend ein integraler Bestandteil des Mathematikstudiums. Datenbasierte Ansätze werden, beispielsweise in der mathematischen Systemtheorie, seit jeher verfolgt. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Daten und Rechenleistung sowie immer effizienteren Methoden des maschinellen Lernens, nehmen auch Datenanalyse und künstliche Intelligenz (KI) einen immer prominenteren Platz in der mathematischen Ausbildung ein.

Allerdings müssen die Daten auch irgendwo herkommen und das Erfassen von Prozessen wie eine Tragflügelumströmung durch Sensoren und optische Verfahren ist eine Schwierigkeit für sich. Klassischerweise ist die Vermessung von Strömungen mit hohem technischen Aufwand und großen Mengen an Daten und damit einem Anteil an notwendiger Nachbearbeitung verbunden (Cierpka et al., 2010). Moderne Ansätze setzen deshalb auf effiziente Datenerhebung durch günstige und flexible aber vergleichsweise unspezifische Technik in Verbindung mit schnellen Auswertungsalgorithmen wie beispielsweise künstliche Intelligenz (KI).

An beide Aspekte – die low-fidelity aber effiziente Messtechnik und die datenbasierte mathematische Modellierung – knüpft das Projekt an, indem mit relativ einfacher aber moderner Technik die Strömung vermessen werden soll und anschließend ein Modell zur Vorhersage des Systemverhaltens erstellt wird.

Das prinzipielle Vorgehen ist in Abbildung 2 dargestellt. Zugrunde liegt die experimentelle Untersuchung der Umströmung eines Tragflügels. Die Strömung kann über Parameter verändert werden (zum Beispiel Anstellwinkel, Geschwindigkeit, Trag-

flügelgeometrie) und umspannt damit einen hochdimensionalen Ereignisraum.

In den Strömungskanal werden Blasen oder Teilchen gegeben, die der Strömung möglichst ideal folgen und durch bildgebende Verfahren sichtbar gemacht werden. Anhand der zeitlicher Verfolgung der Teilchen lässt sich die Geschwindigkeit abschätzen. Darauf basierende Verfahren sind in der Wissenschaft als Particle Image Velocimetry (PIV) bzw. Particle Tracking Velocimetry (PTV) bekannt (Kähler et al., 2016). Neuartig ist hier, dass wir eine ereignisbasierte Kamera zur Beobachtung verwenden. Solche sogenannten neuromorphen Bildsensoren registrieren ein Ereignis, wenn sich in der beobachteten Szene etwas ändert. Die Datenströme sind daher vergleichsweise gering, weshalb sich diese Art der Sensoren insbesondere für schnelle Algorithmen eignen (zum Beispiel autonomes Fahren bei Autos). Eine Art der Auswertung besteht darin, die aufgezeichneten Ereignisse über einen bestimmten Zeitraum zu Pseudo-Frames zu akkumulieren bzw. mit einem Laserpuls zu synchronisieren. Basierend auf den Pseudo-Frames können konventionelle Bildauswertungsalgorithmen angewendet werden, was z.B. PIV ermöglicht (Willert und Klinger, 2022; Willert, 2023). Obwohl eine schnelle Bildauswertung erreicht wurde, profitierten die Algorithmen nicht von der räumlichen Seltenheit des Ereignisstroms mit hoher zeitlicher Auflösung. Rusch und Rösger (2023) stellten einen klassischen Algorithmus für die PTV vor, der in der Lage ist, den Ereignisstrom schnell zu verarbeiten, wie in der unteren Pipeline von Abbildung 2 dargestellt. Die Verwendung von neuronalen Netzen könnte hier Vorteile bringen. Kürzlich konnte gezeigt werden, dass eine höhere Genauigkeit der detektierten Partikelposition mit deutlich geringerer Inferenzzeit unter Verwendung von framebasierten Partikelbildern erreicht werden kann (Sachs et al., 2023; Ratz et al., 2023). Diese Verfahren versprechen auch für den Ereignisstrom eine deutlich schnellere Verarbeitung und damit die Echtzeitfähigkeit der Geschwindigkeitsmessung. Ein nicht zu unterschätzender Aspekt ist der kostengünstige, einfache, gefahrlose und flexible Einsatz dieser Technik (im Vergleich zu beispielsweise laserbasierten klassischen Methoden), was entscheidend ist für unseren geplanten Einsatz in möglichst eigenständigen studentischen Praktika oder für die agile Generierung und Evaluation von Daten und Modellen.

Damit wird für die Lehrinnovation ein komplett neuer Weg für die Strömungsmessung beschritten und gleichzeitig ein aktuelles Sensor-konzept als Lehrinhalt verwendet.

Gleichzeitig werden über eine Kraftmesseinrichtung *exakte* integrale Messdaten erfasst: nämlich der vom Tragflügel verursachte Auftrieb und Widerstand. Diese Daten nennen wir *high-fidelity* Daten wegen ihrer hohen zeitlichen Auflösung und Genauigkeit, die aus der direkten Messung ohne zusätzlich notwendige Nachbearbeitung resultieren. Solche *high-fidelity* Daten sind im Allgemeinen nur im Experiment verfügbar und können hier zur Synthese und Validierung von Modellen herangezogen werden.

Der mathematische Aspekt des Lehrprojekts liegt in der Aufgabe, ein *low-fidelity* Modell zu generieren, das die *high-fidelity* Daten voraussagen kann. Dazu sollen die Student*innen aufgezeichnete Datenpaare (Parameterwerte und low- und high-fidelity Daten kombiniert) erzeugen und auf diese dann Methoden des Maschinellen Lernens (ML) selbst anwenden um ein Modell des komplexen, dynamischen Systemverhaltens zu erzeugen. Die Verbindung von Maschinellern Lernen und Modellierung von Strömungsphänomenen ist ein aktives Forschungsfeld (siehe, beispielsweise, unsere Arbeiten in Heiland und Kim (2025), Sharifi Ghazijahani und Cierpka (2024) oder Benner et al. (2022) dazu) wobei die ML Komponente dank moderner *Python* Programmbibliotheken allgemein und einfach zugänglich ist. Die besondere Innovation ist dann die Rückkopplung mit dem Experiment über Schnittstellen, die in Echtzeit den *low-fidelity*

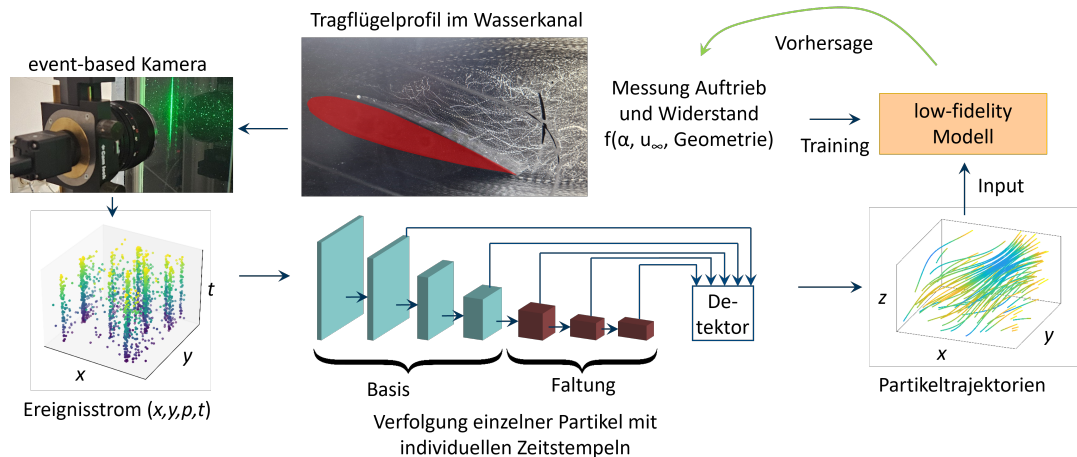


Abbildung 2. Schematische Darstellung der geplanten Lehrinnovation. Im Mittelpunkt steht das Experiment das einerseits über vergleichsweise einfache bildgebende Verfahren *live* beobachtet wird und andererseits über Kraftsensoren präzise vermessen wird. Im Lehrprojekt wird ein *low-fidelity* Modell entwickelt, um aus den Kameradaten die typischerweise nicht verfügbaren Kraftmessungen *live* vorauszusagen.

Ereignisstrom für das Modell verfügbar machen. Ein erfolgreich aufgesetztes und gelerntes Modell soll dann in der Lage sein, *live* aus den *low-fidelity* Daten (Ereignisstrom der Kamera), die integralen Daten und damit das Systemverhalten ausreichend gut vorherzusagen.

Ziele

Aus unserer Erfahrung heraus ist es für Student*innen in der Mathematik trotz der Einbeziehung von *echten* Datensätzen schwierig, die erlernten Methoden auf reale Probleme anzuwenden. Die Anwendungsbeispiele aus den Vorlesungen und Übungen bleiben für sie graue Theorie und Schwierigkeiten, wie das Auslassen oder Verrauschen von Daten, erscheinen konstruiert. Umgekehrt ist es für Student*innen in den Ingenieursdisziplinen oft schwierig und zu abstrakt, Modelle für hochdimensionale reale Systeme zu entwickeln und sie zu nutzen, um einen besseren Zugang zum Verständnis der komplexen Systeme (hier Strömungsvorgänge) zu erlangen oder gar das Systemverhalten zu modellieren. Sie tun sich außerdem schwer, die mathematischen Methoden mit der real beobachteten Welt in Einklang zu bringen, weshalb die Anreize niedrig und die Hürden hoch erscheinen für den Einsatz von mathematischen Algorithmen. Durch den interdisziplinären Ansatz mit theoretisch/numerischen und experimentellen Anteilen ergibt sich ein Mehrwert für beide Gruppen. Weshalb wir die Ziele von KoSyMo wie folgt definieren:

Mathematik: Überzeugung von Student*innen von der Relevanz und dem Potential datenbasierter Modellierung und den neuen Möglichkeiten aber auch Limitierungen von KI Modellen sowie die Sensibilisierung bezüglich technischer Aspekte von Experimenten und Daten. Die Innovation liegt erstens in der Verfügbarkeit *echter* Daten und der zweitens in der unmittelbaren Rückkopplung von Modellierung und Messdaten.

Strömungsmechanik: Verständnis für komplexe Systeme in der Strömungsmechanik und deren Modellierung mittels datenbasierter Methoden. Heranführen von Student*innen

an das Programmieren und den selbstständigen Einsatz von KI Modellen auf Basis der Experimente, sowie Sensibilisierung für das Design von Experimenten, Messunsicherheiten und Schaffung einer statistisch relevanten Datenbasis für komplexe Systeme.

Beide: Die interdisziplinäre Zusammenarbeit und das gegenseitige Verständnis für die Probleme der anderen wird gefördert. Dies ist enorm wichtig, da die derzeitigen Probleme der Menschheit nicht mit einfachen Lösungen angegangen werden können.

Curriculare Einbindung

Die Strömungsdaten, welche in der ersten Hälfte des Projektes erfasst werden, werden in die Module der Mathematik zur Modellbildung einfließen.

- Wissenschaftliches Rechnen (BA, 2. FS) – Pflicht
- Numerik 2 des Maschinellen Lernens (MA, 1. FS) – Wahlpflicht
- Mathematics of Data Science (MA, 1. FS) – Wahlpflicht
- Modellbildung (BA, 6. FS) – Pflicht

Im zweiten Abschnitt werden zwei Praktikumsversuche entwickelt, in welchen zum einen die Messtechnik und Datenauswertung mit der ereignisbasierten Kamera angewandt werden soll und in einem zweiten Versuch ein Modell für das Systemverhalten entwickelt und erprobt wird. Zudem werden die Daten und die Modellbildung in weitere Vorlesungen einfließen.

- Strömungsmesstechnik Vorlesung und Praktikum (MA, 2. FS) – Wahlpflicht
- Kreisprozesse zur Energiewandlung, Wind- und Wasserkraft (BA, 4. FS) – Pflicht

Bei erfolgreicher Umsetzung, werden wir das Projekt für Interessierte über die TU Ilmenau hinaus öffnen. Hierzu bieten sich lokal Veranstaltungen wie der Studieninformationstag, der GirlsDay und weitere Veranstaltungen für Schüler*innen an. Durch die Kombination von einem System, das vom Flugzeug oder Windrad bekannt ist, mit modernen neuartigen Sensoren und Modellen sowie künstlicher Intelligenz, kann die Attraktivität eines Studiums im MINT-Bereich vermittelt werden.

Evaluation und Risikoabschätzung

Während der Bearbeitung der Modellbildung in den einzelnen Veranstaltungen müssen die Student*innen die Inhalte selbständig nacharbeiten und sich für die Entwicklung der Algorithmen selbständig organisieren. Dadurch 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
- Erfahrungen bei der Anwendung von Methoden des Maschinellen Lernens für komplexe Systeme, inklusive deren Umsetzung beispielsweise in der Programmiersprache *Python*

- Erfahrung dabei Algorithmen und Modelle anhand von Literatur zu erarbeiten und praktisch umzusetzen
- Erfahrungen bei der Verwendung aktueller Messtechnik
- Fähigkeit Fachliteratur (auch englisch) gezielt suchen, lesen und interpretieren können
- Überblick über die Strömungsphysik am Tragflügel

Das Projektziel kann als erreicht gelten, wenn die Studierenden Fortschritte bei den aufgeführten Kompetenzen zeigen. KoSyMo soll daher während der Projektlaufzeit in den Lehrveranstaltungen evaluiert werden. Hier erhoffen wir uns insbesondere Anregungen von den Lehr-/Lernkonferenzen zur Durchführung repräsentativer Evaluationen. Ein zusätzliches Erfolgskriterium lässt sich ggf. aus den Abschlussnoten der Klausuren bzw. den erreichten Punkten in spezifischen Teilaufgaben ableiten. Wir gehen davon aus, dass unser Ansatz auf den unterschiedlichen Ebene (real, abstrakt) dazu beitragen wird, das gelehrte Wissen deutlich besser zu verinnerlichen.

Risiken bei der Durchführung bei KoSyMo ergeben sich, wenn die Messtechnik nicht funktioniert wie angedacht (Kraftmesseinrichtung Wasserkanal, ereignisbasierte Kamera). Dieses Risiko wird aber zum einen abgefangen, da bereits studentische Abschlussarbeiten die prinzipielle Eignung der Messtechnik erwiesen haben und notfalls auf einen Windkanal mit funktionierender Kraftmesseinrichtung zurückgegriffen werden kann. Die normierten Kraftwerte bei gleichen Ähnlichkeitskennzahlen der Strömungsmechanik (hier Reynoldszahl) können direkt übertragen werden.

Eine weitere zu meisternde Schwierigkeit ist die *live*-Übertragung der Daten. Hier streben wir eine nachhaltige und einfach zu unterhaltende Implementierung der Schnittstellen an, können aber – um beispielsweise laufende Lernprojekte zu ermöglichen – jederzeit kurzfristig auf unkonventionelle ad-hoc Datenübermittlung umschalten. Im schlimmsten Falle würden wir Daten automatisiert aufzeichnen und *offline* verfügbar machen und so – bis auf die direkte Anwendung der Modelle im Experiment – alle Aspekte der Modellsynthese und –validierung abdecken. Ist die Datenverfügbarkeit gesichert, bestehen auf Seiten der Mathematik keine weiteren kritischen Risiken. Methodisch kann auf den Daten ohnehin immer gearbeitet werden. Unzulänglichkeiten im Ansatz oder der Umsetzung werden sich natürlich quantitativ in fehlerhaften Vorraussagen bemerkbar, das ist aber durchaus auch ein Teil des Lern- und Lehrprozesses.

Verstetigung

Der Endpunkt in der Mathematik (eine Station – geplant als ein dezidierter Server mit direktem Zugang zu den Daten und Beispielrechnungen und einem Bildschirm mit *dashboard* zur Beobachtung des laufenden Experiments und direkten Interaktionsmöglichkeiten) wird Teil des *Data Science Labs* des Fachgebiets *Mathematics of Data Science* werden und so als ein ständiger Demonstrator für den regulären Lehrbetrieb in der Mathematik und für Publikumsveranstaltungen und Schüler*innen-Unis zur Verfügung stehen.

Die Einbindung in *Wissenschaftliches Rechnen* als prüfungsrelevantes Projekt kann die Schnittstelle aktuell halten und weiter entwickeln.

Als Praktikum wird unser Projekt als eigenständiger Abschnitt in die mathematische *Modellbildung* Veranstaltung eingebracht. Mit der einhergehenden notwendigen Mo-

duldefinition wird das Projekt zusätzlich wählbar für fachübergreifende Anerkennung beispielsweise im Rahmen von THInKI⁴.

Die beiden Praktika werden im Modul Strömungsmesstechnik langfristig in den Vorlesungsplan eingebunden und ersetzen das Praktikum (Particle Image Velocimetry 1 und 2).

Transfer

Unser Ansatz ist bei weitem nicht auf die Strömungsmechanik begrenzt und kann prinzipiell überall dort eingesetzt werden, wo komplexe Systeme anhand von Sensoren erfasst und modelliert werden sollen. Dies kann in der Elektrotechnik, der Materialwissenschaft, Chemie, Verfahrenstechnik, Biomedizintechnik oder auch der Mechanik sein. Dies stellt nur einen kleinen Überblick möglicher Anwendungsfelder an der TU Ilmenau dar.

Auf der Seite der Mathematik, werden wir den dezidierten Server mit Demonstrationsbeispielen in *outreach*-Veranstaltungen wie Schüler*innen-Uni oder *Tag der offenen Tür* einsetzen. Da der Wasserkanal ebenfalls bei solchen Veranstaltungen gezeigt wird, wird das ereignisbasierte Messsystem hier ebenfalls vorgeführt.

Ein Report über den Versuchsaufbau und die zugrundeliegenden mathematischen Prinzipien gedenken wir als einen *Oberwolfach-Schnappschuss*⁵ zu veröffentlichen, womit wir schon positive Erfahrungen gesammelt haben; vgl. [Altmann und Heiland \(2015\)](#).

Im Rahmen von *Challenges* werden wir gezielt Forschungsgruppen und Lehrende aus anderen Universitäten gewinnen, ihre Methoden oder Lehrinhalte der Modellbildung mit unseren Setups zu testen und zu vergleichen.

Als eine lebende offene Datenquelle, werden wir den Teil der Schnittstelle, der die Messdaten liefert, jederzeit auf Anfrage frei verfügbar machen. So können die Daten aber auch die Schwierigkeiten, die mit einer Echtzeitübertragung einhergehen, frei genutzt werden.

Zusammen mit Dokumentationen und Beispielrechnungen werden wir Datensätze frei zugänglich und frei verwendbar publizieren und bereit stehen, die Implementierungen als *good practice* im Rahmen von Lehraktivitäten beispielsweise von *MaRDI* zu präsentieren.

Zudem wird das Projekt auf der Fachtagung “Experimentelle Strömungsmechanik” (Cierpka) und auf der Jahrestagung der Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik (Heiland) in der Sektion *Modern Teaching and Didactics* vorgestellt werden. Erfahrungsgemäß ergibt sich dann ein direkter Austausch mit möglichen Anwender*innen anderer Hochschulen und damit die Möglichkeit zu einem direkten Transfer.

Vernetzung und Kooperation

Das Projekt fällt direkt in unsere Forschungs- und Lehrgebiete Strömungsmechanik und Messtechnik (Cierpka) sowie Datenbasierte Modellierung und Wissenschaftliches Rechnen (Heiland). Auf den jeweiligen Gebieten sind wir sehr ausgewiesen mit zahlreichen Publikationen in relevanten Fachzeitschriften. Zudem haben wir beide bereits langjährige Erfahrung aus Forschungsprojekten mit Projektpartnern der jeweiligen anderen Disziplin und haben beide bereits in einem Forschungsprojekt gemeinsam geforscht.

⁴THInKI – Thüringer Hochschulinitiative für KI im Studium: <https://tzlr.de/projects/thinki/>

⁵www.mfo.de/outreach-media/snapshots

Den Mehrwert sehen wir maßgeblich in der interdisziplinären Zusammenarbeit, welche sich auch noch über einen weiten Methodenbereich (experimentell, analytisch, numerisch) erstreckt. Wie bereits beschrieben, gelingt es durch KoSyMo die Theorie der datengetriebenen Modellierung, Reglerentwurf, und Softwareentwicklung (Heiland) anhand eines praktischen Beispiels zu vermitteln. Zusätzlich werden der Umgang mit modernster Messtechnik und das Verständnis für die Strömungsphysik gelernt (Cierpka). Durch diese Kompetenzvermittlung auf mehreren Ebenen ergibt sich der große Mehrwert für die Student*innen. Letztendlich werden durch das Projekt auch Student*innen der Mathematik und des Maschinenbau zusammenarbeiten und dadurch voneinander lernen und eine gemeinsame Sprache entwickeln, was Studierenden beider Disziplinen in der späteren industriellen oder auch akademischen Karriere einen Vorteil verschaffen wird.

LITERATUR

- Altmann, R. und Heiland, J. (2015). Wie steuert man einen Kran? Technischer Bericht, Schnappschüsse moderner Mathematik aus Oberwolfach.
- Benner, P., Goyal, P., Heiland, J., und Pontes Duff, I. (2022). Operator Inference and Physics-Informed Learning of Low-Dimensional Models for Incompressible Flows. *Electron. Trans. Numer. Anal.*, 56:28–51.
- Cierpka, C., Otto, H., Poll, C., Hüther, J., Jeschke, S., und Mäder, P. (2021). SmartPIV: flow velocity estimates by smartphones for education and field studies. *Experiments in Fluids*, 62.
- Cierpka, C., Weier, T., und Gerbeth, G. (2008). Evolution of vortex structures in an electromagnetically excited separated flow. *Experiments in Fluids*, 45:943–953.
- Cierpka, C., Weier, T., und Gerbeth, G. (2010). Synchronized force and particle image velocimetry measurements on a NACA 0015 in poststall under control of time periodic electromagnetic forcing. *Physics of Fluids*, 22.
- Fehr, J., Heiland, J., Himpe, C., und Saak, J. (2016). Best Practices for Replicability, Reproducibility and Reusability of Computer-Based Experiments Exemplified by Model Reduction Software. *AIMS Mathematics*, 1(3):261–281.
- Heiland, J. und Kim, Y. (2025). Polytopic autoencoders with smooth clustering for reduced-order modeling of flows. *Journal of Computational Physics*, 521:113526.
- Kähler, C. J., Astarita, T., Vlachos, P. P., Sakakibara, J., Hain, R., Discetti, S., La Foy, R., und Cierpka, C. (2016). Main results of the 4th International PIV Challenge. *Experiments in Fluids*, 57.
- Ratz, M., Sachs, S., König, J., und Cierpka, C. (2023). A deep neural network architecture for reliable 3D position and size determination for Lagrangian particle tracking using a single camera. *Measurement Science and Technology*, 34:105203.
- Rusch, A. und Rösgen, T. (2023). TrackAER: real-time event-based quantitative flow visualization. *Experiments in Fluids*, 64.
- Sachs, S., Ratz, M., Mäder, P., König, J., und Cierpka, C. (2023). Particle detection and size recognition based on defocused particle images: a comparison of a deterministic algorithm and a deep neural network. *Experiments in Fluids*, 64.
- Sharifi Ghazijahani, M. und Cierpka, C. (2024). Echo state networks for modeling turbulent convection. *Scientific Reports*, 14.
- Willert, C. E. (2023). Event-based imaging velocimetry using pulsed illumination. *Experiments in Fluids*, 64.
- Willert, C. E. und Kliner, J. (2022). Event-based imaging velocimetry: an assessment of event-based cameras for the measurement of fluid flows. *Experiments in Fluids*, 63.