

# Virtuelle Realität des Unsichtbaren: Verständnisfördernde Visualisierung und Interaktivierung strömungsmechanischer Phänomene

KONRAD E. R. BOETTCHER, DANA J. BOETTCHER, ALEXANDER S. BEHR

## Abstract

Obwohl Strömungsmechanik durch die Allgegenwärtigkeit von Strömungen ein anschaulich zu lernendes Gebiet der Physik sein sollte, fällt vielen Studierenden bereits das Verständnis der Grundlagen schwer. Die Anschauung ist nur auf den ersten Blick gegeben, da lediglich Auswirkungen von Strömungen sichtbar sind – nicht sichtbar sind Strömungen selbst und warum diese die Beobachtungen verursachen. Solche Erklärungen sollten in Laborexperimenten visualisiert werden. Dabei kann zwar bspw. der prinzipielle Strömungsverlauf durch verschiedene Visualisierungsmethoden sichtbar gemacht werden, Geschwindigkeitsfelder, Druckfelder oder Schubspannungen als Ursache der beobachteten Auswirkungen einer Strömung aber sind – wenn überhaupt – ungleich schwieriger und aufwändiger zu visualisieren. Der Fokus eines Versuches würde sich von der Strömungsphysik auf die Messtechnik verschieben. Da zudem häufig deutlich über 100 Studierende die Grundlagenveranstaltung besuchen, sind begleitende, thematisch passende Laborpraktika logistisch kaum durchführbar.

In diesem Beitrag wird eine vor diesem Hintergrund entwickelte virtuelle Laborumgebung vorgestellt.<sup>1</sup> Dabei wird auf die Generierung der Strömungsdaten und die Konstruktion des virtuellen Labors eingegangen. An Beispielen werden die Vorteile der Sichtbarmachung bislang kaum oder nicht sichtbarer Sachverhalte, die Integration vorlesungsbegleitenden, forschenden Lernens in eine Großveranstaltung und bisherige Evaluationsergebnisse erläutert.

**Schlüsselwörter:** Strömungsmechanik, Virtual Reality, virtuelles Labor, immersives Lernen

---

<sup>1</sup> Das zugrunde liegende Projekt wurde mit Mitteln für Qualitätsverbesserungsmaßnahmen der Lehre der Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen gefördert.

## Einleitung

Die Strömungsmechanik beschreibt die Physik sich bewegender Fluide, wozu v. a. Flüssigkeiten und Gase zählen. Nach Laurien & Oertel jr. (2011) können dazu drei gängige Methoden verwendet werden: i. Die theoretische Methode beschreibt die Vorgänge auf mathematischer Ebene und liefert die umfassendsten, allgemeingültigen Aussagen. Sie ist jedoch auf einfache Strömungen beschränkt. ii. Die experimentelle Methode verwendet Versuche mit oft aufwändiger Messtechnik. iii. Die CFD-Methode (computational fluid dynamics) verwendet computergestützte Berechnungsverfahren und verdrängt zunehmend die beiden anderen, da sie auch für deutlich kompliziertere Probleme spezielle Lösungen ermöglicht. Sie liefert häufig günstiger und schneller Ergebnisse als Experimente und zusätzlich einen Einblick in messtechnisch kaum zugängliche Strömungsgebiete und physikalische Größen.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, welche Möglichkeiten die Integration der Strömungsmechanik in ein Virtual-Reality-Labor (VRLab) für die Lehre eröffnet. Im nächsten Abschnitt wird dazu auf bislang übliche Lehrformen eingegangen, anschließend auf die Realisierung und allgemeine Vor- und Nachteile. Drei VRLabs werden mitsamt den Ergebnissen des Lehreinsatzes vertieft dargestellt. Das Ende bildet eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

## Lehre der Strömungsmechanik

Die Grundlagen der Strömungsmechanik werden in großen Veranstaltungen auf der mathematisch-physikalischen Ebene gelehrt. Dies stellt viele Studierende vor große Schwierigkeiten, ist aber aufgrund wissenschaftlicher und beruflicher Anforderungen notwendig. Einen anderen Zugang würde die selbstständige Durchführung veranstaltungsbegleitender Experimente bieten, in denen die Studierenden sich forschungsbasierend grundlegende Aspekte der Strömungsmechanik selbst erarbeiten würden. Während sich Laborpraktika nach Jungmann (2011) oft zum forschenden Lernen umgestalten lassen, ist dies bei großen Grundlagenveranstaltungen deutlich schwieriger. So sind nach Tekkaya et al. (2016) Praktika in kleinen Gruppen bei Großveranstaltungen logistisch und finanziell kaum zu bewältigen, was verstärkt gilt, wenn die Veranstaltung wöchentlich begleitet werden soll. Solche Laborpraktika werden kaum, wenn überhaupt, für erfahrungsbasiertes Lernen eingesetzt. Dabei könnten nach Tekkaya et al. (2016) gewonnene Aha-Effekte die Auseinandersetzung mit der Thematik stärken. Eine Verschiebung vom Lehren zum Lernen Barr & Tagg (1995) ist über veranstaltungsbegleitende, forschungsbasierte Laborversuche somit schwierig umzusetzen. Daher werden Experimente, Videos oder CFD-Simulationen meist im Hörsaal vorgeführt.

Studierende führen Experimente üblicherweise erst nach dem Semester der Veranstaltung durch. In semesterbegleitenden Laborpraktika könnten aber theoretische Konstrukte zur Strömungsmechanik erfahren, beobachtet und in eine Hand-

lung überführt werden. Dies wäre nach Reich (2008) vorteilhaft, da möglichst viel konstruktives Lernen im Lehrprozess verwirklicht werden sollte.

Zusätzlich werden in Laborversuchen aufgrund des messtechnischen Aufwands oft nur Gesamtgrößen gemessen, was die physikalische Anschauung nicht verbessert: Werden z. B. die Auftriebs- und Widerstandskraft eines umströmten Körpers gemessen, bleibt deren strömungsmechanische Ursache, nämlich die Verteilung von Druck und Reibung auf der Körperoberfläche, verborgen.

Da Experimente zunehmend durch CFD-Simulationen abgelöst werden, ist die Frage naheliegend, ob eine selbstständige Anwendung dieser Methode dem Lernprozess dienlich ist. Dieser Gedanke scheint konsequent, weil damit alle strömungsmechanischen Größen bestimmbar sind, mit denen die Studierenden physikalische Ursachen erforschen könnten. Für die Lehre bietet sich dieser Ansatz jedoch nicht an, da damit nur eine weitere Lehrform auf mathematisch-physikalischer Ebene bereitgestellt würde. CFD-Simulationen sind nach Laurien & Oertel jr. (2011) von ungeübten Nutzern zudem kaum durchführbar. Kenntnisse in professioneller Software sowie mathematisches und strömungsmechanisches Vorwissen sind zwingend nötig, werden aber erst in Grundlagen- und Vertiefungsveranstaltungen vermittelt. Im nächsten Abschnitt werden technische Aspekte der Erstellung und daraus entstehende Vorteile von VRLabs erläutert, in denen CFD-Ergebnisse für Studierende nutzbar gemacht werden.

## Virtuelle Labore Strömungsmechanik

Dieser Abschnitt behandelt die prinzipielle Erstellung von VRLabs und erörtert prinzipielle Aspekte ihres Einsatzes.

### Erstellung der Virtuellen Labore

Verschiedene Strömungen werden mit der kommerziellen CFD-Software *Ansys CFX* berechnet. Aus den Lösungen werden wichtige Eigenschaften extrahiert, welche die physikalische Grundlage der VRLabs bilden. Um den Aufwand für die Modellierung und den Datenexport zu minimieren, werden die untersuchten Strömungen im stets gleichen Rechengebiet berechnet, wobei undurchströmbare Bereiche durch einen ausreichend hohen Strömungswiderstand realisiert werden (Khadra et al., 2000). Die so bei allen CFD-Simulationen erzielte identische Geometrie vereinfacht den Datenimport durch die Verwendung gleicher Datenübertragungsskripte. Anschließend wird jedes VRLab mit der Software *Unreal Engine 4* von Epic Games als unabhängig lauffähiges Programm erstellt und den Studierenden zur Verfügung gestellt. Die Labore können aus der Ich-Perspektive frei begangen und durchflogen werden. Die Benutzeroberfläche ist vielen Studierenden aus diversen populären Computerspielen bekannt. Dies soll Widerstände bei ihnen reduzieren, was den Lernzugang verbessern kann (Merkel, 2008).

Es befinden sich verschiedene VRLabs in der Entwicklung, die nach Tekkaya et al. (2016) verschiedenen Labortypen zugeordnet werden können:

- Herleitungslabor: Erfahrung typischer Erhaltungsgleichungen als Lehr-/Lernlabor,
- Ähnlichkeitslabor: Entdeckung der Ähnlichkeitsmechanik im Forschungslabor,
- Visualisierungslabor: Typische Visualisierungsmethoden als integriertes Lehr-/Lernlabor,
- Nachvollziehen spezieller Sachverhalte wie Rotation in verschiedenen Wirbelarten als Mini-Lab,
- GS-Labor: Erfahrung und Entdeckung von Phänomenen einer Grenzschichtströmung als integriertes Forschungslabor.

### **Aspekte zum Einsatz virtueller Labore in der Strömungsmechanik**

**Organisatorische Vorteile** entstehen durch eine hohe *Zugänglichkeit*. So ist das Labor auf Rechnern der untersten Leistungsklasse bei installierter Software auch offline stets verwendbar. Damit können Versuche auch zu einem späteren Studienabschnitt beliebig oft wiederholt werden. Während bei Remote-Laboren Probleme durch gleichzeitigen Zugriff durch Massive Open Online Labs gemindert werden müssen (Salzmann et al., 2018), ist bei der dezentralen Ausgestaltung des VRLabs dieses Problem nicht vorhanden, da die Studierenden ausschließlich ihre eigenen Geräte verwenden. Das VRLab ist damit von einer hohen *Ausfallsicherheit* geprägt und völlig losgelöst von physischer Wartung. So sind Versuche im VRLab auch bei geschlossenen Hochschuleinrichtungen, bspw. infolge einer Pandemieeindämmung, durchführbar: Eine Präsenz von Studierenden oder Angestellten an einem bestimmten Ort ist unnötig.

**Experimentelle Vorteile** ergeben sich durch die generelle Einsehbarkeit aller Versuchsstände von jedem Ort aus, da Geometrien (z. B. Rohre) transparent geschaltet werden können und die Bewegung im Labor keinen Beschränkungen unterliegt, was freies Entdecken ermöglicht. Dabei können mitströmende Partikel an *beliebige* Stellen ins Strömungsfeld eingebracht werden. Im VRLab müssen die Physik oder die Kausalität nicht strikt eingehalten werden. So können bspw. im Ähnlichkeitslabor das Fluid oder der gesamte Versuchsstand instantan gewechselt und die a priori bekannten physikalischen Größen ohne Messung und Auswertung sofort dargestellt werden, selbst wenn sie messtechnisch kaum zu erfassen sind. Beeinflussungen und Rückkopplungen, die in der Realität oder in CFD-Software kaum möglich wären, können programmiert werden. So führen Studierende Experimente nicht nur durch, sondern können auch als Probe, d. h. als strömendes Fluid, fungieren. Durch das Mitströmen als Fluidelement werden Phänomene und Kräfte durch programmierte Zwangsbewegungen immersiv erfahren, was bspw. im GS-Labor zum Erfahren der häufig übersehenen Verdrängungswirkung genutzt wird. González et al. (2013) und Price (2008) schreiben immersiven Lernumgebungen ein hohes Potential für die Lehre zu, womit das immersive VRLab die vier Virtualisierungsgrade nach

May (2017) reales Labor, Augmented-Reality-Labor, Remote-Labor und virtuelles Labor ergänzt.

**Didaktische Vorteile** ergeben sich nach Campbell (1999) schon durch den Einsatz neuer Technologie, was durch den Aha-Effekt die *Motivation* steigern und nebenbei nach Terkowsky et al. (2019) auch die *technische Kompetenz* fördern soll. Die Befangenheit einiger Studierender im realen Experiment im Umgang mit Maschinen aufgrund fehlender Hands-on-Erfahrung und einer Furcht vor Beschädigung oder Verletzung (Tekkaya, et al., 2016) dürfte im VRLab durch den gewohnten und gefahrlosen Umgang mit Computern schwächer ausgeprägt sein.

In realen Laborversuchen führen viele nebensächliche, aber notwendige Arbeitsschritte oft zu klar strukturierten, vorgegebenen Arbeitsabläufen. Nach Spath et al. (2013) erschwert das Abarbeiten von Aufgabenstellungen und Arbeitsschritten aber schöpferisches Denken. Die VRLabs sollen solches Denken unterstützen, indem für das Lernziel irrelevante Arbeitsschritte wie Versuchsstandumbauten, Justierungen oder langwierige Auswertungen entfallen und somit bspw. Vergleiche direkt durchgeführt werden können. Diese *didaktische Reduktion* spart begrenzte Versuchszeit ein, womit in den VRLabs den Studierenden mehr Selbstständigkeit zugemutet wird. Stehen nur kurze Zeiträume zur Verfügung, lassen sich virtuelle Labore einfacher erstellen als integrierte Lehr-/Lernlabore oder auch Forschungslabore. Nach Terkowsky & Haertel (2017) können sich selbstständige Lernfähigkeiten durch eigenständige Entwicklung der Fragestellung ausbilden. Dies könne mit der Entwicklung geeigneter Versuchsdurchführungen zur Bildung eines Forschergeists führen, der eine wichtige Voraussetzung für die Schöpfung kreativer Ideen sei. Daher werden im VRLab die Studierenden durch viele entdeckbare Inhalte darin unterstützt, kreative Fragestellungen zu entwickeln. Nach Bauer et al. (2014) ist dabei selbstbestimmte Flexibilität eine wichtige Anforderung an die Mitarbeiter in der Industrie 4.0. Phänomene und Effekte wie etwa die Verdrängungswirkung im GS-Labor können selbstständig entdeckt und ihre physikalische Ursache bereits vor der mathematischen Erklärung in einer späteren Vorlesung erkannt werden, wodurch ein überlagerter Flipped-classroom-Effekt entstehen kann.

Die Studierenden werden bei der Durchführung der virtuellen Laborversuche auf verschiedene Anforderungen der **Industrie 4.0** vorbereitet, indem Erfahrungen mit den maßgeblichen Organisationsgestaltungsprinzipien nach Herrmann et al. (2016), ausgenommen *dezentrale Entscheidungsabläufe*, automatisch adressiert werden:

Alle Parametereinstellungen, die Datenakquise und Einflussmöglichkeiten erfolgen in der virtuellen *Vernetzung* am digitalen Zwilling des Versuchsstandes. Die Erweiterung des digitalen Zwillings um die Messdaten aus der CFD-Simulation (z. B. Geschwindigkeitsfelder) erhöht die *Informationstransparenz*. Durch die Visualisierung und verständliche Darstellung der in der Simulation aggregierten Daten liefert das VRLab eine *Technische Assistenz* (z. B. Überführung der Geschwindigkeitsfelder in Stromlinien). Entscheidungen sollen so fundiert getroffen und Probleme schneller gelöst werden können, da bspw. der Strömungsverlauf direkt ersichtlich ist. Eine physische Unterstützung findet durch den vermiedenen Umgang mit gefährlichen Stoffen und Geräten statt.

**Nachteile** des VRLabs sind, wie bei Remote-Laboren, das Fehlen haptischer Erlebnisse und direkter Arbeit an typischen Gerätschaften. Das eigenständig lauffähige VRLab-Programm ermöglicht zwar, dass jeder Studierende Versuche allein durchführen kann. Dies vermindert das in der Praxis häufig beobachtete Verstecken leistungsschwächerer hinter leistungsstärkeren Studierenden. Damit einhergehend aber führen fehlende soziale Interaktionen innerhalb einer Praktikumsgruppe nicht zur Stärkung der Sozialkompetenz. Die didaktische Reduktion verhindert zudem die Erfahrung, dass nebensächlich strukturierte Arbeitsabläufe und Auswertungen zu wissenschaftlichen Laborversuchen gehören und sorgfältig durchgeführt werden müssen, um nicht das Gesamtergebnis zu gefährden.

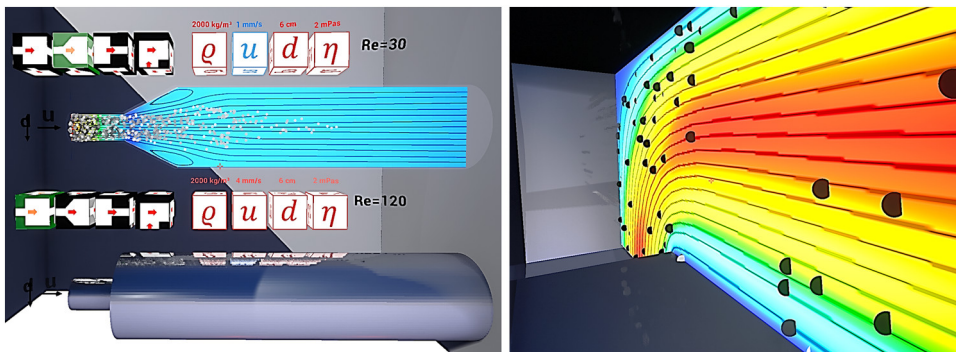
## Gestaltung und Einsatz spezieller VRLabs

Im Folgenden werden drei weitentwickelte VRLabs vorgestellt. Spezifisch werden die Vorteile gegenüber realen Laboren und die bisherigen Ergebnisse beim Lehrein-satz diskutiert.

### Ähnlichkeitslabor

Das Lernziel ist hier die Analyse des Einflusses der vier Parameter Dichte, Viskosität, Einströmgeschwindigkeit und Geometriegröße auf das Strömungsfeld. Es soll entdeckt werden, dass nur das Zusammenwirken der Parameter in der Reynolds-Zahl, die das Verhältnis von Trägheits- zur Reibungskraft widerspiegelt, die Strömung bestimmt. Ursächlich für dieses Verhalten ist die Ähnlichkeitsmechanik, ein Grundpfeiler für Experimente, CFD-Simulationen und die mathematische Modellierung (Zierep, 1991), was aktive Bezüge zum Berufsleben herstellt. Die Studierenden können die von ihnen aufzustellende Hypothese mit in der Vorlesung aktuell behandelten Methoden mathematisch zeigen und erhalten damit über einen experimentellen Zugang Kenntnisse auf der mathematischen Ebene.

Das VRLab ist in zwei getrennt steuerbare Versuchsstände angeordnet, s. Abb. 1, links. Jeder Versuchsstand kann zwischen vier Standardformen wie Rohrerweiterungen oder Kanalumlenkung umgeschaltet werden. Dabei können die vier o. g. Parameter jeweils verdoppelt oder halbiert werden, wobei die Werte der Parameter und der Reynolds-Zahl stets sichtbar sind. Die dreidimensionale Strömung kann anhand strömender Partikel und darstellbarer Stromlinien sichtbar gemacht werden, Druck und Geschwindigkeit können als Farbverläufe angezeigt werden. Für forschendes Lernen wird keine Aufgabenstellung vorgegeben.



**Abbildung 1:** Gleichzeitige Darstellung beider Versuchsstände, hier oben mit transparenter und unten mit opaker Geometrie (links) und Entdeckungstour *im* Kanal (rechts)

### Vorteile

In der Realität sind Druckfelder, Geschwindigkeitsfelder und Stromlinien nur aufwendig bestimmbar. Die Parameter sind nicht ohne Weiteres so änderbar, dass gleiche Reynolds-Zahlen vorliegen. Dichte und Viskosität sind nur begrenzt variierbar, eine Änderung der Versuchsstandsgröße nur durch weitere Versuchsstände mit teurer Messtechnik und Platzbedarf realisierbar. Dies alles aber ist für Vergleiche und das Aufstellen der Hypothese maßgeblich. Die technische Assistenz durch Angabe der Reynolds-Zahl und den direkten Vergleich der Strömung im zweiten Versuchsstand unterstützt weiterhin die Hypothesenfindung, da identische Strömungen bei gleicher Reynolds-Zahl direkt sichtbar sind.

Der Zeitgewinn der didaktischen Reduktion durch fehlende Umbauarbeiten, die direkte Visualisierung und Auswertung der Strömungen wird genutzt, um sich mit dem Versuch forschend auseinanderzusetzen zu können: Die durchströmten Geometrien können virtuell betreten und mitströmende Partikel händisch eingebracht werden, um die lokale Auswirkung von Trägheits- und Reibungskraft zu erforschen, ohne die Strömung durch die physische Anwesenheit zu beeinflussen. Bei Variation der Versuchsstandsgröße wird nur die angegebene Längenskala variiert. Die Partikel bewegen sich darin bei gleicher Geschwindigkeit langsamer wie in Abb. 2 an unterschiedlich weit vorangekommenen Partikeln ersichtlich. Derartiges unerwartetes Verhalten soll nach Terkowsky & Haertel (2017) das kritische Bewusstsein und damit das selbstreflektive, kritische Lernen stärken. Der Einfluss einer Parameteränderung auf die Trägheit kann durch die in Stufen exakt wählbaren anderen Parameter kompensiert werden. Die lebensalterabhängige Farbe der strömenden Partikel stellt die Ursache der sog. Verweilzeitverteilung dar, die für Verfahrenstechniker ein wesentlicher Aspekt in der Reaktorauslegung ist und eine Verbindung zu anderen Kerndisziplinen schafft. Eine Überprüfung der Hypothese an anderen Standardformen ist ebenfalls möglich. Derartige Erforschungsmöglichkeiten wären in einem realen Laborversuch kaum durchführbar oder aus finanziellen Gründen nicht realisierbar.

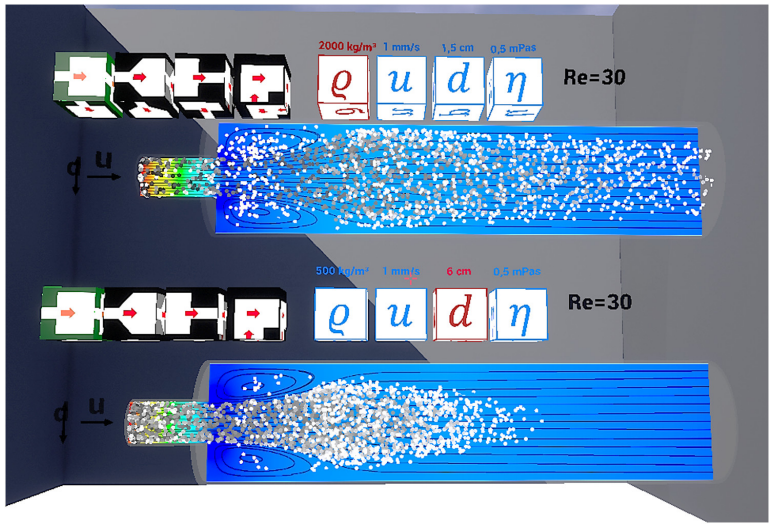


Abbildung 2: Scheinbar unterschiedlich schnelle Partikel bei dennoch gleichem Strömungsverlauf

### Umsetzung

Im WS19/20 wurde in der zum Themengebiet in der Veranstaltung passenden Woche im Tutorium mit bis zu 25 Studierenden an einer vorläufigen Version die Untersuchung der Einflüsse von Trägheits- und Reibungskraft ermöglicht. Das Ergebnis einer freiwilligen anonymen Selbstauskunft zum Nutzen des VRLabs für das Verständnis ist in (Abb. 3) dargestellt. In mehreren Tutorien wurde die Strömung selbst erforscht (blaue Balken, N = 57), in einer Gruppe stellten die Tutoren das VRLab mit Erklärungen vor (grau, N = 19). Bei eigenem Erforschen beurteilten 82 % der Studierenden den Nutzen als gut oder sehr gut; bei reiner Vorstellung durch die Tutoren waren es nur 35%, wohingegen 58% nur etwas Nutzen sahen. Diese deutlich schlechtere Bewertung wäre mit der Verhinderung des selbstständigen Erforschens erklärbar.

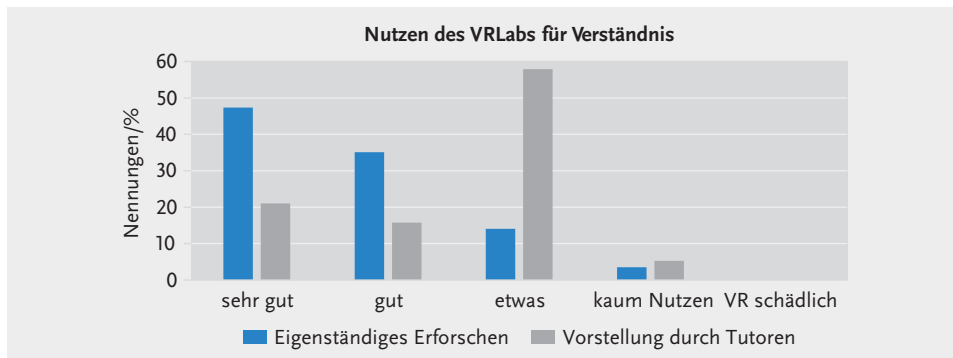


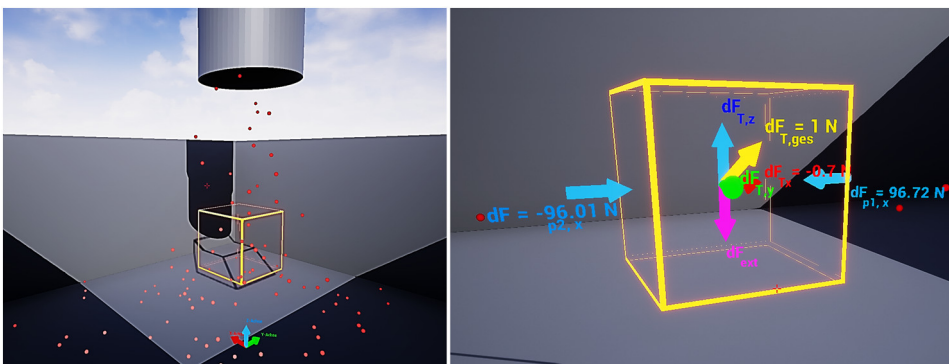
Abbildung 3: Einschätzter Nutzen für Verständnis von Trägheits- und Reibungseinfluss



## Herleitungslabor

Im Ingenieurwesen sind Erhaltungsgleichungen allgegenwärtig. Diese werden an dem theoretischen Konstrukt eines differentiellen Volumenelements ( $dV$ ) hergeleitet, das quasi unendlich klein ist. Vielen Studierenden fällt die Verbindung mit der Realität schwer, was an der Komplexität durch eine teilweise große Anzahl angreifender Kräfte mit verwirrender Zuordnung und auf den ersten Blick undurchsichtigen mathematischen Kniffen liegen kann. Als Lernziel sollen dieses Konstrukt und die zugehörige Mathematik mit Strömungen verbunden werden. Dieses Erkenntnis soll Hemmungen der Studierenden abbauen, um weitere differentielle Bilanzierungen selbst durchführen zu können.

Im VRLab sind verschiedene Strömungsformen implementiert, in die ein  $dV$  platziert werden kann. Zu Beginn wird ein  $dV$  auf sichtbare Größe vergrößert, s. Abb. 4, links. Eine Sequenz stellt die Herleitung stückweise vor, wobei die freie Bewegung des Studierenden die Übersicht verbessert und damit das Verständnis erleichtert. Die wirkenden Kräfte können in die einzelnen Raumrichtungen beliebig an- und abgeschaltet werden, wobei eine farbliche Zuordnung der Kräfte zu den entsprechenden Flächen oder Volumina die intuitive Zuordnung der bis zu 36 Kräfte an bis zu 6 Flächen unterstützt. Das  $dV$  kann im Strömungsfeld bewegt werden, wobei die entsprechenden Zahlenwerte der Kräfte angegeben werden, s. Abb. 4, rechts. Die Bewegungen roter, kugelförmiger Partikel betten das  $dV$  sichtbar in die Strömung ein. Mit diesen technischen Assistenzen kann das Kräftegleichgewicht am  $dV$  in der Strömung untersucht werden.



**Abbildung 4:** Differenzielles Volumenelement (gelb) zur Herleitung von Erhaltungsgleichungen in einer Strömung (links), mit zugeschalteten Kräften und Zahlenwerten (rechts)

## Vorteile

Reale Versuche sind am theoretischen Konstrukt nicht durchführbar, da weder quasi unendlich kleine  $dV$  noch daran wirkende Kräfte experimentell zugänglich sind. Um die Übersichtlichkeit in Lehrbüchern zu erhöhen, wird ein  $dV$  in Oertel jr. et al. (2015) sechsfach dargestellt. Dies ist im VRLab nicht notwendig, da die Kräfte nach Belieben ausgeblendet werden können und die Position gewechselt werden kann.

### Umsetzung

Im WS19/20 wurde die Herleitung der Bernoulligleichung mit Unterstützung des VRLabs durchgeführt. Die in eine Richtung fast gleichen Werte gleichartiger Kräfte zeigen anschaulich den Sinn abstrakter mathematischer Operationen wie der Taylorreihenentwicklung. Der empfundene Nutzen zum Verständnis wurde evaluiert und ist in (Tab.1) dargestellt. Quasi alle Studierenden empfanden den Zusatznutzen als sehr gut oder gut. Ein Tutor berichtete, er selbst hätte das Prinzip erst mit dem VRLab verstanden.

**Tabelle 1:** Schulnoten für Verständnisförderung von Herleitungen an differenziellen Volumenelementen

Einsatz VRLab/x	Ich habe alle Visualisierungsformen verstanden und kann x erklären			Ich habe x Visualisierungsformen verstanden				Stimmen
	3	2	1	3	2	1	0	
Vorher (Übung)/%	33	18	3	18	20	3	5	95
Nachher (Übung)/%	61	4	4	28	2	2	0	54
Nachher (Tutorium)/%	34	46	18	0	1	0	0	76

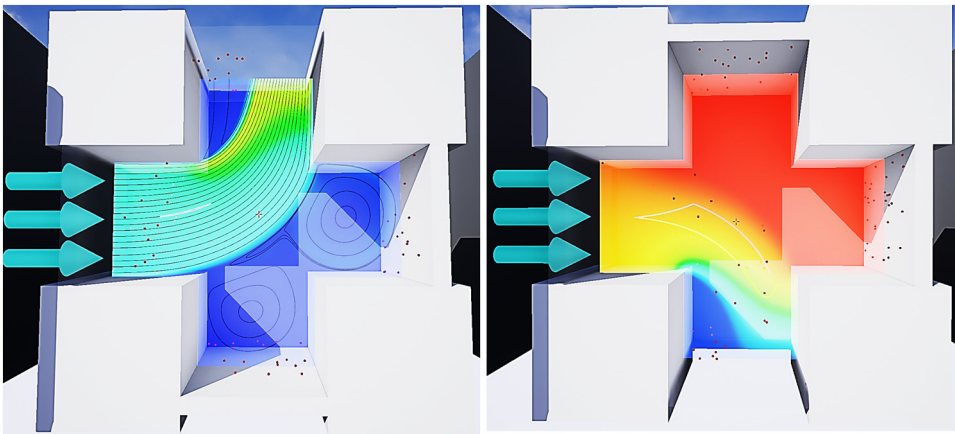
### Visualisierungslabor

Dieses Labor behandelt die drei typischen Visualisierungsformen: Bahn-, Strom- und Streichlinien, die nur bei zeitabhängigen Strömungen unterschiedlich sind. Als Lernziel sollen diese für ein gegebenes Strömungsfeld skizziert werden, und bei Kenntnis der Linien soll auf die zeitliche Änderung der Strömung geschlossen werden können. Abb. 5 zeigt den Versuchsstand im VRLab mit vier Zugängen. Deren beliebig einstellbare Funktion Eingang, Ausgang und Wand sind intuitiv erfassbar dargestellt. Einblicke in die Strömung liefern mitströmende Partikel, die qualitative Darstellung der Geschwindigkeit (Abb. 5, links) und des Drucks (Abb. 5, rechts) in einer Farbskala. Stromlinien können im gesamten Strömungsgebiet dargestellt werden, Bahn- und Streichlinien entstehen aus einem beliebig ausgewählten Startpunkt.

### Vorteile

Zur Sichtbarmachung realer Strömungen müssen Fluide mit kleinen Partikeln wie Aluminiumflocken oder Farbe geimpft werden (Oertel jr., Böhle, & Reviol, 2015). Dabei folgen nur genügend kleine Partikel der Strömung gut. Da sie gleichzeitig groß genug zur einfachen Detektion sein sollen, sind Kompromisse erforderlich. Gleichzeitig sichtbar sind bei einem einfachen Aufbau zudem Partikel im schnellen, kanalmittigen und im langsamen Bereich nahe der dem Beobachter zugewandten durchsichtigen Wand, womit keine klare Geschwindigkeit erkennbar wird. Die Visualisierungsformen müssen für ein intuitives Erfassen ihrer Unterschiede gleichzeitig in einer zeitabhängigen Strömung dargestellt werden, wozu unterschiedliche Bedingungen zur Partikelanzahl und Belichtungszeit gleichzeitig erfüllt sein müssten.

Im VRLab existiert keines dieser Probleme, da alle Strömungsfelder a priori bekannt sind und die Visualisierungsformen damit erstellt werden. Real notwendige, aufwendige Messtechniken und Auswertungen sind nicht erforderlich, die Studierende in der Grundlagenveranstaltung zudem überfordern würden. Eine didaktische Reduktion erfolgt zusätzlich durch einen einfachen Versuchsumbau ohne Pumpen, Anschlüsse und die klare Visualisierung vorliegender Einstellungen, womit in Übungen und Tutorien Experimente selbstständig durchgeführt werden können. Durch Ändern der Zugangsfunktion sind die Unterschiede der drei Visualisierungsformen im direkten Vergleich erkennbar, was durch viele Zugangskombinationen das Überprüfen des bisher erlangten Verständnisses ermöglicht. Weitere Entdeckungsmöglichkeiten wie das Zusammenspiel von Trägheits- und Reibungskräften sowie die Auswirkungen auf das Geschwindigkeits- und Druckfeld sind ebenfalls in diesem VRLab integriert.



**Abbildung 5:** Versuchstand mit Strom- (schwarz), Bahn- (pink) und Streichlinien (gelb) sowie Geschwindigkeits- (links) und Druckfeld (rechts)

### Umsetzung

Das VRLab wurde als integriertes Lehr-/Lernlabor im WS19/20 erstmalig durchgeführt. Die drei Visualisierungsformen wurden in der Übung zunächst klassisch mithilfe von Videos, CFD-Simulationen, Beispielströmungen und Analogien zu Natur und Fußball erklärt. Anschließend wurde in einer kreuzförmigen Strömungsgeometrie, also wie im VRLab, eine stationäre Strömung vorgestellt und wurden drei völlig verschiedene Antwortkombinationen für die sich ausbildende Bahn-, Strom- und Streichlinie vorgegeben. Obwohl die Linienformen durch die stationäre Strömung identisch sein müssten und dies nur bei einer Kombination der Fall war, gaben im Mittel nur 37% der Studierenden die richtige Antwort ( $N = 82$ ). Dies liegt nur knapp über der Gleichverteilung, die ahnungslosem Raten entspricht. Die Visualisierungsformen konnten also nicht auf die vorgegebene Strömung übertragen werden. Anschließend wurden die Visualisierungsformen im VRLab vorgestellt und

beeinflusst. Es wurde eine ähnliche Frage gestellt, deren Schwierigkeitsgrad durch eine zeitabhängige Strömung mit sechs ähnlicheren Antwortmöglichkeiten deutlich erhöht wurde. Trotzdem waren im Mittel 53 % (Gleichverteilung: 16,6 %) der Antworten korrekt, bei gleichzeitig gesteigerter Teilnahme (N = 93). Dies zeigt die Vorteile des VRLabs zur Visualisierung und Unterstützung des Verständnisses. Im folgenden Tutorium konnten die Studierenden selbst Entdeckungstouren im VRLab durchführen. Eine anonyme Selbsteinschätzung zur Kompetenz bzgl. der Visualisierungsformen wurde erbeten und mit den Werten vorangegangenen Übung verglichen, s. Tab. 2. Vor dem Übungseinsatz des VRLabs dachte etwa die Hälfte der Studierenden, keine Visualisierungsform erklären zu können. Nach dem Einsatz des VRLabs waren es nur noch 32 %, wobei sich zusätzlich deutlich eine Verschiebung hin zur Erklärung oder zum Verständnis aller drei Visualisierungsformen erkennen lässt. Der ungünstige Zeitpunkt der zweiten Abstimmungsrunde am Ende der bereits abendlichen Übungszeit um 19:20 Uhr sorgte für eine geringere Teilnahme durch bereits einsetzenden Aufbruch. Die selbstständige Beschäftigung im Tutorium führte dazu, dass 99 % der Studierenden meinten, alle Visualisierungsformen erklären zu können. Im Vergleich zur Übung trauen sich weniger Studierende die höchste Kompetenzstufe zu, was durch eine unterschiedliche Formulierung der Frage erklärt werden kann: In der Übung wurde gefragt, ob die Visualisierungsformen grob, im Tutorium, ob die Visualisierungsformen erklärt werden könne. Die im Tutorium erfolgte Verbesserung wäre auch durch die längere Zeit erklärbar, die sich die Studierenden mit den Sachverhalten bereits auseinandergesetzt hatten. Dies erscheint unwahrscheinlich, da die konventionellen Erklärungen in Vorlesung (ca. 30 Minuten) und Übung (ca. 40 Minuten) deutlich länger waren als der VRLab-Einsatz mit ca. 10 Minuten in der Übung und ca. 20 Minuten im Tutorium.

**Tabelle 2:** Selbsteinschätzung der erlangten Kompetenz zu Visualisierungsformen

Einsatz VRLab / x	Ich habe alle Visualisierungsformen verstanden und kann x erklären			Ich habe x Visualisierungsformen verstanden				Stimmen
	3	2	1	3	2	1	0	
Vorher (Übung) / %	33	18	3	18	20	3	5	95
Nachher (Übung) / %	61	4	4	28	2	2	0	54
Nachher (Tutorium) / %	34	46	18	0	1	0	0	76

## Zusammenfassung und Ausblick

Unterschiedliche Strömungen wurden mit der CFD-Software *Ansys CFX* berechnet und die Ergebnisse in die VR-Software *Unreal Engine* importiert. Damit wurden virtuelle Labore zur Unterstützung der Lehre der Strömungsmechanik erstellt, die aus der Ich-Perspektive begangen und beeinflusst werden können. Vorteile gegenüber realen Versuchen sind eine einfache Ermöglichung explorativen, forschenden Lernens durch didaktische Reduktion auf wesentliche Bestandteile der Experimente und die Sichtbarmachung im realen Experiment unsichtbarer physikalischer Größen wie kaum messbarer Druck- und Geschwindigkeitsfelder. Da in virtuellen Laboren die Physik und Kausalität umgangen werden kann, können in der Realität unmögliche Versuche erstellt werden – etwa die Untersuchung differentieller Volumenelemente bei der Herleitung von Bilanzgleichungen oder die gleichzeitige Darstellung verschiedener Visualisierungsformen. Das Handeln in der virtuellen Realität erlaubt es dabei, Effekte immersiv zu erfahren.

Das Arbeiten am digitalen Zwilling mit der technischen Assistenz und die durch didaktische Reduktion ermöglichte Erforschung von Strömungsvorgängen, bei denen Studierende auch selbst Teil des strömenden Fluides sein können, soll die Kreativität und digitale Kompetenz für das Arbeitsleben in der Industrie 4.0 fördern. Die Laborversuche können in die Grundveranstaltung integriert werden, da keine Geräteeinweisung oder messtechnische Vorkenntnisse nötig sind und jeder Studierende ein eigenes Labor auf seinem Rechner installieren kann. Die vorläufige Evaluation erfolgte durch Befragung der Studierenden bezüglich der selbsteingeschätzten Kompetenz und durch Fragen vor und nach Nutzung eines virtuellen Labors. Dabei scheinen VRLabs sich positiv auszuwirken. Aussagekräftigere Klausurergebnisse und weitere Evaluationsergebnisse stehen noch aus. Letztendlich sollte geprüft werden, ob die positiven Aspekte der einfacheren Darstellung und des leichteren Zugangs auch zu negativen Auswirkungen bei der Kompetenzentwicklung führen. So könnte sich die Fähigkeit, unanschauliche Sachverhalte zu interpretieren und physikalisch zu durchdringen, weniger entwickeln.

Zukünftig sollen weitere Versuche erstellt und in den bestehenden die immersiven Bestandteile erhöht werden. Für umfangreichere Versuche können auszuwertende, verrauschte Messwerte integriert und dazu unerwartete Situationen oder ethische Abwägungen programmiert werden. Dazu gehören bspw. defekte Messgeräte mit großer systematischer Abweichung oder ein für den letzten Datenpunkt nötiges Leerpumpen eines Wassertanks mit darin lebenden virtuellen Fischen. Ferner könnten bisherige Nachteile angegangen werden, indem in einer Multiplayerversion mehrere Studierende gleichzeitig kooperativ experimentieren. Mithilfe eines haptischen Handschuhs könnten in fernerer Zukunft fühlbare Rückkopplung und die illusionsgestützte Erfahrung des Arbeitens an typischen Geräten eines Labors integriert werden.

## Literaturverzeichnis

- Barr, R. B., & Tagg, J. (1995). From Teaching to Learning –A New Paradigm For Undergraduate Education. *Change: The Magazine of Higher Learning*, 12–26.
- Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D. & Ganscher, O. (2014). *Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*. Berlin-Mitte; Stuttgart: BITKOM; Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.
- Campbell, M. E. (1999). Oh, Now I Get it! *Journal of Engineering Education* 88(4), 381–383.
- González, M. M.; Santos, B. S.; Vargas, A. R.; Jorge, M.-G. & Orihuela, A. R. (2013). Virtual Worlds. Opportunities and Challenges in the 21st Century. *Procedia Computer Science* 25, 330–337.
- Hermann, M.; Pentek, T. & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, S. 1530–1605.
- Jungmann, T. (2011). Forschendes Lernen in der Ingenieurausbildung. In U. Bach, K. Müller & T. Jungmann (Hrsg.), *Praxiseinblicke – Forschendes Lernen in den Ingenieurwissenschaften* (S. 4–11). Aachen, Bochum, Dortmund: TeachING-LearnING.EU.
- Khadra, K.; Angot, P.; Parneix, S. & Caltagirone, J.-P. (2000). Fictitious domain approach for numerical modelling of Navier-Stokes equations. *Numerical Methods In Fluids*, 651–684.
- Laurien, E. & Oertel jr., H. (2011). *Numerische Strömungsmechanik*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- May, D. (2017). *Globally Competent Engineers. Internationalisierung der Ingenieurausbildung am Beispiel der Produktionstechnik*. Aachen: Shaker.
- Merkel, H. (2008). Lernstrategien und Arbeitstechniken. In G. Bovet, & V. Huwendiek, *Leitfaden Schulpraxis – Pädagogik und Psychologie für den Lehrberuf* (S. 256–257). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor.
- Oertel jr.; H., Böhle, M. & Reviol, T. (2015). *Strömungsmechanik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Price, C. B. (2008). The usability of a commercial game physics engine to develop physics educational materials: An investigation. *Simulation & Gaming* 39(3), 319–337.
- Reich, K. (2008). Konstruktivistische Didaktik. In G. Bovet & V. Huwendiek, *Leitfaden Schulpraxis – Pädagogik und Psychologie für den Lehrberuf* (S. 56–64). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor.
- Salzmann, C.; Halimi, W.; Gillet, D. & Govaerts, S. (2018). Deploying Large-Scale Online Labs with Smart Devices. In M. Auer et al., *Cyber-Physical Laboratories in Engineering and Science Education* (S. 43–78). Cham: Springer.
- Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Kruse, T. & Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Tekkaya, A. E.; Wilkesmann, U.; Terkowsky, C.; Pleul, C.; Monika, R. & Maevus, F. (2016). *Das Labor in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung*. München, Berlin, Brüssel: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

- Terkowsky, C. & Haertel, T. (2017). On Learning Objectives and Learning Activities to Foster Creativity in the Engineering Lab. In S. Frerich; T. Meisen; A. Richert; M. Petermann; S. Jeschke; U. Wilkesmann & A. E. Tekkaya (Hrsg.), *Engineering Education 4.0. Excellent Teaching and Learning in ENgineering Sciences* (S. 923–935). Springer, Cham.
- Terkowsky, C.; Frye, S. & May, D. (06 2019). Is a Remote Laboratory a Means to Develop Competences for the ‘Working World 4.0’? A Brief Tentative Reality Check of Learning Objectives. *IEEE exp.at’19*, 118–122.
- Zierep, J. (1991). *Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln der Strömungslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1</b>	Gleichzeitige Darstellung beider Versuchsstände, hier oben mit transparenter und unten mit opaker Geometrie (links) und Entdeckungstour <i>im</i> Kanal (rechts) .....	165
<b>Abb. 2</b>	Scheinbar unterschiedlich schnelle Partikel bei dennoch gleichem Strömungsverlauf .....	166
<b>Abb. 3</b>	Eingeschätzter Nutzen für Verständnis von Trägheits- und Reibungseinfluss .	166
<b>Abb. 4</b>	Differentielles Volumenelement (gelb) zur Herleitung von Erhaltungsgleichungen in einer Strömung (links), mit zugeschalteten Kräften und Zahlenwerten (rechts) .....	167
<b>Abb. 5</b>	Versuchsstand mit Strom- (schwarz), Bahn- (pink) und Streichlinien (gelb) sowie Geschwindigkeits- (links) und Druckfeld (rechts) .....	169

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1</b>	Schulnoten für Verständnisförderung von Herleitungen an differenziellen Volumenelementen .....	168
<b>Tab. 2</b>	Selbsteinschätzung der erlangten Kompetenz zu Visualisierungsformen .....	170