

ELISABETH SPRENGER

STRÖMUNGSVISUALISIERUN-
GEN VON UND NACH LUDWIG
PRANDTL

VERFAHREN DER SICHTBARMA-
CHUNG IN DER FLUIDDYNAMIK

DER VORLIEGENDE TEXT BASIERT AUF EINEM LEKTÜREESSAY, DEN DIE AUTORIN
IM MÄRZ 2026 BEI PROF DR. DAVID GUGERLI, TECHNIKGESCHICHTE,
ETH ZÜRICH EINGEREICHT HAT.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 2

Verfahren der Visualisierung 5

Fotografische Aufnahmen 6

Die Grenzschicht vorführen 8

Filmische Aufnahmen 9

Die zeitliche Aufeinanderfolge des Strömungsgeschehens erkennbar machen 11

Particle Image Velocimetry PIV 13

Das sich über die Zeit verändernde Wirbelfeld visualisieren 14

Simulation des Laseyer Windes 15

Die Voraussage des Laseyer grafisch darstellen 17

Zusammenfassung 18

Literaturverzeichnis 19

Abbildungsverzeichnis 20

Einleitung

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist der Strömungsfilm *Entstehung von Wirbeln bei in Wasser bewegten Körpern*. Er spielte eine wichtige Rolle bei der Etablierung der bahnbrechenden sogenannten Grenzschichttheorie¹, die von Ludwig Prandtl 1904 vorgestellt wurde. Die Theorie revolutionierte das Verständnis und die Berechnungsmöglichkeiten in der Fluidodynamik und gab wichtige Impulse für Strömungsmechanik und Aerodynamik. Mit den Visualisierungen begann Prandtl zur selben Zeit. Eine Fotografie von 1903/04 zeigt den 29-jährigen Professor für Technische Mechanik an seinem ersten Wasserkanal mit installierter Kamera. Mithilfe dieser und späterer technisch-apparativer Anlagen entstanden zunächst fotografische Aufnahmen von Wasserströmungen um Hindernisse herum, dann einzelne Sequenzen filmischer Bewegtbilder, schliesslich ein immer wieder umgeschnittener und ergänzter Film. Er machte eine bemerkenswerte Karriere, wurde auf Konferenzen

¹ Grenzschichttheorie siehe S. 7.

rund um die Welt gezeigt, im Nationalsozialismus zum Modellfilm der Hochschulbildung erkoren und tauchte in den 1960er Jahren in der US-amerikanischen Wissenschaftsvermittlung auf. Das 2026 erschienene Buch *Fließend* von Mario Schulze und Sarine Waltenspül² zeichnet die Geschichte von Prandtls Strömungsaufnahmen nach und kontextualisiert materielle und mediale Verortungen dieses visuellen Wissens von Strömungen. Diese umfassende Darstellung macht auch bereits deutlich, dass es sich dabei nicht um den einen berühmten Film handelt, sondern dass es vom Bildmaterial von Prandtl eine Vielzahl von Fassungen und Formaten gibt, die auf verschiedener Weise versuchten, Strömungsphänomene zu visualisieren und zu veranschaulichen.

Die leitende Frage dieser Arbeit ist, mit welchen Verfahren historisch verschiedene Medienformate Sichtbarkeit in der Fluidodynamik hergestellt haben und noch herstellen. Dafür betrachtet sie markante Momente aus der Geschichte von Prandtls Aufnahmen und erweitert sie um eine aktuelle Simulation. Es werden vier mediale Etappen dargestellt:

1. Fotografische Aufnahmen, 1904 gezeigt auf dem Dritten Internationalen Mathematikerkongress in Heidelberg
2. Filmische Aufnahmen, 1927 präsentiert vor der Royal Aeronautical Society in London
3. Particle Image Velocimetry PIV-Analyse des digitalisierten Strömungsfilmes, 2009
4. Simulation, 2025: Strömungsverhältnisse des Laseyer Windes.

Während Ludwig Prandtl sowohl die fotografischen Aufnahmen wie auch den Strömungsfilm *Entstehung von Wirbeln bei in Wasser bewegten Körpern* selbst erstellte, geht die PIV-Analyse auf eine spätere, digitalisierte Fassung seines Films zurück. Die Simulation schliesslich hat gar nichts mehr mit den Aufnahmen von Prandtl zu tun, schliesst aber historisch an die Reihe von Visualisierungen von Strömungs- und Grenzschichtphänomenen an. Weil sie sich aus dem Material in der Nachfolge von Prandtl nicht abbilden lässt, wird hier eine Simulation eines aktuellen Projektes vom IAC Institut für Atmosphären- und Klimawissenschaften der ETH vorgestellt. Sie untersucht ebenfalls Strömungsverhältnisse eines linear-viskosen Fluides – hier Luft statt Wasser –, konkret ein Windphänomen im Schwende-Tal im Kanton Appenzell Innerrhoden.

Die Strömungsbilder von Prandtl stellen auch den Beginn einer Art Mustergeschichte des Medialen in den Naturwissenschaften des 20. Jahrhunderts dar. Sie hört nicht wie bei Prandtl mit dem Film auf, sondern findet eine Fortsetzung durch Digitalisierung und einer damit realisierbaren PIV-Analyse, einem optischen, berührungslosen Messverfahren zur Erfassung und Sichtbarmachung von

2 Schulze, Mario und Sarine Waltenspül. *Fließend. Geschichte, Ästhetik und Politik des wissenschaftlichen Films*. Göttingen: Wallstein Verlag, 2026. DOI <https://doi.org/10.46500/83539191>. (Letzter Zugriff: 30.03.2026).

Geschwindigkeitsfeldern in Strömungen. Computerbasierte Strömungssimulationen schliesslich ermöglichen nicht nur die Analyse, sondern auch die Darstellung einer errechneten Voraussage von Strömungsverhalten.

Die Sichtbarmachung von Strömungsphänomenen, und ganz besonders die der Grenzschicht, für deren Begründung Prandtl in der Strömungsphysik steht, war alles andere als trivial: Strömung ist nicht gut zu erkennen, Strömung im Wasser ist schnell, die Grenzschicht ist bloss eine dünne Schicht. Bildliche Wissenserzeugung ist damit kaum je nur ein Abbilden, sondern viel eher eine produktive Sichtbarmachung. Die Unterscheidung ist deswegen bedeutsam, weil man vielleicht im Fall von Fotografie und Film voreilig davon ausgehen könnte, dass Abbilden *gleichbedeutend* ist mit Sichtbarmachen. Tatsächlich zeigt sich bei genauerer Betrachtung der Bemühungen, Strömungsphänomene sichtbar zu machen, dass Sichtbarmachen noch anderes umfasst als Abbilden und sich im Abbilden nicht erschöpft. Vielmehr umfasst das Sichtbarmachen ganz verschiedene Operationen, die in der Hoffnung getätigt werden, dass sich in den resultierenden Darstellungen etwas zeigt. «Solches Sichtbarmachen ist immer schon mit mannigfachen Formen des Eingreifens in das Darzustellende und der Manipulation seiner Bestandteile verbunden.»³ Diese Arbeit beschäftigt sich mit diesen Operationen der Sichtbarmachung in der Fluidodynamik.

Jeder der vier Abschnitte der Arbeit beschreibt zuerst das entsprechende Medienformat, um dann auf seine spezifischen Operationen der Sichtbarmachung einzugehen. Für die Beschreibung der Verfahren der Visualisierung liefern Hans-Jürg Rheinberger mit «Sichtbar Machen. Visualisierung in den Naturwissenschaften»⁴ und Dieter Mersch mit «Wissen in Bildern. Zur visuellen Epistemik in Naturwissenschaft und Mathematik»⁵ den theoretischen Hintergrund.

3 Rheinberger, Hans-Jürg. «Sichtbar Machen. Visualisierung in den Naturwissenschaften», in: Sachs-Hombach, Klaus. *Bildtheorien. Anthropologische und kulturelle Grundlagen des Visualistic Turn*. Frankfurt a. M: Suhrkamp, 2009, S. 127.

4 Rheinberger «Sichtbar Machen» (Anm. 2), S. 127–145.

5 Mersch, Dieter: «Wissen in Bildern. Zur visuellen Epistemik in Naturwissenschaft und Mathematik», in: Bernd Hüppauf, Peter Weingart (Hg.): *Frosch und Frankenstein – Bilder als Medium der Popularisierung von Wissenschaft*. Bielefeld: transcript, 2009, S. 107–134. DOI: <https://doi.org/10.25969/mediarep/12179>. (Letzter Zugriff: 30.03.2026).

Verfahren der Visualisierung

Wissenschaftliche Bilder sind «erkenntnisfördernde Instrumente des Denkens, des Veranschaulichens, des Darstellens und des Beweisens»⁶ und werden für Präsentation und Vermittlung von Wissen an Expertinnen und Laien genutzt. Visualisierungen sind entsprechend essentiell. Hans-Jürg Rheinberger erkennt in der engen Verbindung Sichtbarmachen und Wissenserzeugung sogar einen Grundzug der modernen Wissenschaft: «Es ist wohl nicht zu weit hergeholt, wenn man behauptet, daß das Sichtbarmachen von etwas, das sich nicht von sich aus zeigt, das also nicht unmittelbar evident ist und vor Augen liegt, den Grundriß und Grundgestus der modernen Wissenschaft überhaupt ausmacht.»⁷

Es stellt sich also die Frage, *wie* Wissen in Bildern sichtbar gemacht wird. Als Verfahren der Visualisierung in den Naturwissenschaften, gleichsam wie «eine Skizze einer Typologie wissenschaftlicher Visualisierung» beschreibt Rheinberger in «Sichtbar Machen. Visualisierung in den Naturwissenschaften» drei prinzipielle Verfahren: erstens **Kompression** bzw. **Dilatation**, die er **zusammen auch unter dem Begriff der Konfigurierung** fasst, zweitens **Verstärkung** und drittens **Schematisierung**.⁸ Man wird in der Folge sehen, dass sich diese Verfahren in den medialen Etappen von Strömungsvisualisierungen alle wiederfinden.

Dieter Mersch trifft in «Wissen in Bildern. Zur visuellen Epistemik in Naturwissenschaft und Mathematik» eine andere Unterscheidung. Er sieht ebenfalls verschiedene «Strategien der Sichtbarmachung und Sichtbarkeit», Bildpraktiken, die er prinzipiell in drei Klassen einteilt:

Erstens solche Darstellungsweisen, deren wesentliche Funktion die Zeugenschaft ist und die das Visuelle als Beleg benutzen, zweitens solche, die das Wissen auf abstrakten Tableaus anordnen und als solches allererst generieren, mithin es in Bezug auf eine zugrunde liegende Datenmenge in logische oder berechenbare Figuren verwandeln, schließlich drittens Dinge und ihre Oberflächen wie Präparate und dergleichen.⁹

Die verschiedenen Bildpraktiken erfüllen jeweils andere Zwecke und rufen andere «Logiken» und Argumentationsweisen auf, nämlich **Referenzialität**, **Konstruktivität** und **Deixis**.¹⁰ So würden

6 Geise, Stephanie: «Wissenschaftliche Bilder und die Visualisierung komplexer Daten in der Kommunikationsforschung», in: Lobinger, Katharina (Hg.): *Handbuch Visuelle Kommunikationsforschung*. Springer Nature, 2013, S. 2. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-06738-0_21-1. (Letzter Zugriff: 30.03.2026).

7 Rheinberger «Sichtbar Machen» (Anm. 2), S. 127.

8 Rheinberger «Sichtbar Machen» (Anm. 2), S. 128.

9 Mersch «Wissen in Bildern» (Anm. 4), S. 109.

10 Mersch «Wissen in Bildern» (Anm. 4), S. 109.

referenzielle Bildpraktiken einen Existenzbeweis führen; sie dienten dazu, die Existenz eines Objekts oder Phänomens zu beweisen oder dessen Spur zu verfolgen. **Konstruktive Bildpraktiken** erstellten nach Mersch komplexe Strukturen oder Relationsverhältnisse, wie zum Beispiel Tabellen, Pläne oder skizzenhafte Modellbildungen komplexer Prozesse. **Deiktische Bildpraktiken** dienten der Demonstration und Deixis, also der Anzeige oder Vorführung eines singulären Ereignisses oder Effekts.¹¹ Jede dieser Methoden hat ihre eigenen Zwecke und Logiken und ruft unterschiedliche Argumentationsweisen auf. Sie ermöglichen es, Wissen auf verschiedene Weisen zu strukturieren, zu demonstrieren und zu vermitteln. Auch diese Übersicht hilft bei der Beschreibung und Klärung dessen, was die Operationen der Sichtbarmachung der verschiedenen medialen Etappen der Strömungsaufnahmen jeweils kennzeichnet.

Fotografische Aufnahmen

Techniken zur Sichtbarmachung verborgener Prozesse haben in den Naturwissenschaften eine lange Tradition. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts und zu Beginn des 20. Jahrhunderts verstärkten sich die Bemühungen, solche Techniken im Bereich der Strömungsdynamik zu entwickeln.¹² Verborgene und flüchtige Prozesse wurden sichtbar gemacht und die Ergebnisse fotografisch festgehalten. Etienne Marey in Frankreich beispielsweise verwendete in einer frühen Form eines Windkanals Rauch, um die Luftströmung sichtbar zu machen. In Deutschland war es zunächst Friedrich Ahlborn, der 1902 Fotografien der Oberfläche fließender Flüssigkeiten erstellte, die mit einem feinen Pulver aus den Sporen der Lycopodium-Pflanze bestreut waren.¹³ In diese Bestrebungen der Sichtbarmachung von Strömungsphänomenen reißen sich die Fotografien von Ludwig Prandtl ein, die die Grenzschicht und ihre Ablösung zeigen sollen.

Im Jahr 1904 hielt Prandtl auf dem Dritten Internationalen Mathematikerkongress in Heidelberg einen berühmt gewordenen Vortrag. Es war ihm gelungen, einen neuen Weg zur Vereinfachung der komplexen Navier-Stokes-Gleichungen zu finden, die Strömungen viskoser Fluide mathematisch beschreiben, der sie behandelbar machte, ohne ihre wesentlichen Eigenschaften zu verlieren.¹⁴ Damit war eine Brücke zwischen Mathematik und Anwendung, zwischen mathematischer

11 Mersch «Wissen in Bildern» (Anm. 4), S. 109.

12 Bloor, David: «Sichtbarmachung, common sense and construction in fluid mechanics: the cases of Hele-Shaw and Ludwig Prandtl», in: *Studies in History and Philosophy of Science* 39, 2008, S. 349.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2008.06.006>. (Letzter Zugriff: 30.03.2026).

13 Bloor «Sichtbarmachung ...» (Anm. 11), S. 349.

14 Großmann, Siegfried, Eckhardt Bruno, Lohse Detlef: «100 Jahre Grenzschichtphysik», in: *Physik Journal* (2004) Nr. 10, Weinheim: Wiley-VCH, S. 34.

Hydrodynamik und praktischer Hydraulik geschlagen, und mit ihr wurde es möglich, sich mathematisch mit dem (beträchtlichen) Teil der Strömungen zu befassen, der von technologischem Interesse war, nämlich diejenigen in Luft und Wasser. Prandtl teilte theoretisch Strömung rund um einen Körper in zwei Bereiche ein: In einen Strömungsbereich, in dem die Reibung vernachlässigbar ist, und in eine sehr dünne Schicht direkt am Körper, in der Reibung eine wesentliche Rolle spielt. Die von Prandtl in diesem Vortrag präsentierte Grenzschicht ist die dünne Übergangsschicht des strömenden Fluids an der Oberfläche des umströmten Körpers, wo die Reibungskräfte dominieren. Sie löst sich ab, wenn sie aufgrund eines zu hohen Druckanstiegs in Strömungsrichtung der Kontur des Hindernisses nicht mehr folgen kann und in der Folge Wirbel und Rückströme bildet. Sie ist entscheidend für den Widerstand, oder auch den Auftrieb bei Tragflügeln.

Die Ablösung der Grenzschicht konnte Prandtl mathematisch noch nicht fassen; seinem Heidelberger Publikum führt er sie stattdessen mit Bildern aus seinem Labor vor. In einer 1,5 m langen Wanne mit Zwischenboden konnte Prandtl mithilfe einer Handkurbel Strömung erzeugen. Er zeigte Strömungsvorgänge um verschiedene Hindernisse herum, beispielsweise eine in die Strömung hineinragende Wand oder einen Zylinder (Abb. 1), und demonstrierte überdies, was bei der Entfernung der supponierten Grenzschicht passiert (Abb. 2). Dafür verwendete einen Hohlzylinder mit einem Schlitz an einer Seite. Das Wasser, das um die Oberfläche des Zylinders fließt und durch den Schlitz in den Hohlraum eindringt, wird durch ein Rohr abgesaugt. Die Absaugung hat den Effekt, dass sich die Strömung nun nicht mehr abtrennt, sondern weiterhin der gekrümmten Oberfläche des Zylinders folgt: Die Bildung von Wirbeln wird unterdrückt.

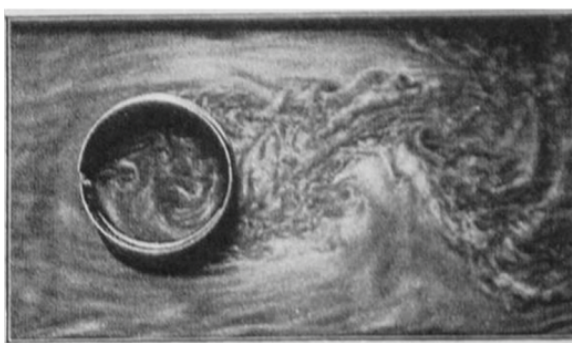


Abb. 1: Strömungsablösung, die hinter einem Rundzylinder Wirbel erzeugt.

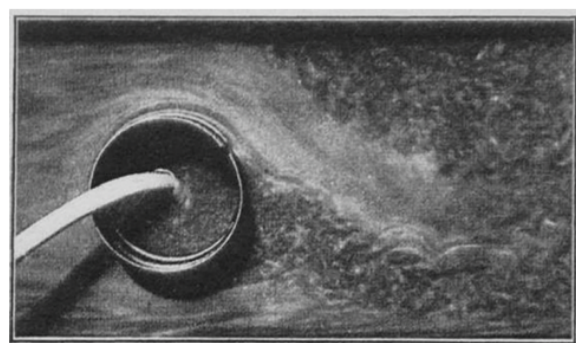


Abb. 2: Verzögerte Ablösung und unterdrückte Wirbelbildung durch Absaugen der Grenzschicht.

Die Grenzschicht vorführen

Obwohl seine Abhandlung nur gerade knappe acht Seiten lang war, beschränkte sich Ludwig Prandtl nicht darauf, seine neuen Gleichungen zur Grenzschicht herzuleiten. Er zeigte bei seinem Vortrag Bilder, die er mithilfe seines Wasserversuchskanals gemacht hatte, «to exhibit the visible reality of the boundary layer»¹⁵. Es ging darum, die Grenzschicht vorzuführen und damit ihre Realität visuell zu beweisen.

Bei genauer Betrachtung wird deutlich, dass es sich um eine Kombination von Bildpraktiken handelt. In den Kategorien von Dieter Mersch gesprochen, hat man es hier als erstes mit einer *referenziellen Bildpraktik* zu tun, die einen Existenzbeweis für die Grenzschicht führen soll. Es geht um Zeugenschaft: das Visuelle ist der Beleg und ein Abbild des phänomenologischen Wissens, das unmittelbar aus Beobachtungen am Strömungskanal gewonnen werden konnte. Elemente einer *deiktischen Bildpraktik* kommen als zweites dazu: Es wird nämlich auch ein Effekt vorgeführt, der als indirekter Beweis gelten kann, nämlich die Möglichkeit der Manipulation der Grenzschicht: Ihre Kontrolle sollte die Strömung ebenfalls kontrollieren. Und tatsächlich hat die Absaugung der Grenzschicht zur Folge, dass hinter dem Zylinder weniger Wirbel erzeugt werden. «For an engineer this would remove any lingering doubt about the veridical character of the visual experience. If the boundary layer was real then controlling the layer would control the flow».¹⁶ Als Element einer *konstruktiven Bildpraktik* kommen als drittes von Prandtl selber angefertigte Zeichnungen von Stromlinienfiguren hinzu, die den Vorgang verfolgbar machen, aber auf «quantitative Richtigkeit keinen Anspruch»¹⁷ erheben. In der Ausstellungspublikation lassen sich Prandtls Stromlinienzeichnungen «direkt mit den fotografischen Aufnahmen vergleichen und beide wechselseitig aufeinander beziehen».¹⁸ Das Verhältnis von demonstrierter Beobachtung und Theorie ist dabei unklar. Schulze/Waltenspül merken an, dass es Hinweise darauf gebe, dass die Bilder nicht «nachträglicher empirischer Test der vorab entwickelten theoretischen Argumentation» waren und die Verhältnisse zwischen Formelsprache, Beschreibung und Bildern «weitaus komplizierter».¹⁹ Was die epistemische Arbeit der Bilder für Prandtl selber war, ob und wie diese Bilder an der Konstitution oder doch wenigstens an der Entdeckung des naturwissenschaftlichen Phänomens beteiligt waren, bleibt damit offen.

15 Bloor «Sichtbarmachung ...» (Anm. 11), S. 352.

16 Bloor «Sichtbarmachung ...» (Anm. 11), S. 352.

17 Prandtl, Ludwig, «Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung», in: *Verhandlungen des III. Internationalen Mathematiker-Kongresses Heidelberg 1904*, Leipzig: Teubner, 1905, S. 489.

18 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 43.

19 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 42.

Karen Barad machte darauf aufmerksam, dass «Images or representations are not snapshots or depictions of what awaits us but rather condensations or traces of multiple practices of engagement.»²⁰ Fotografische Repräsentationen bestehen nicht nur in dem, was dargestellt wird, sondern werden durch die Praktiken, die dabei zum Einsatz kommen, auch erst erzeugt. Die Herstellung der Sichtbarkeit der Grenzschicht und ihre Fixierung im Bild waren alles andere als trivial: Der Wasserkanal musste hergestellt, kreisförmige Zylinder und andere Objekte in den Tank gesetzt, Strömung mit einer Kurbel erzeugt und die Wasseroberfläche mit Eisenglimmer bestreut werden, um sie sichtbar zu machen.²¹ Der Eisenglimmer ist bei diesem Vorgang nicht nur Mittel der *Verstärkung* (Rheinberger), sondern die Partikel werden selbst zu einem Bestandteil des Dargestellten. Dazu kam beim fluiddynamischen Experimentalssetting notwendig ein fotografischer Aufbau; die Wiedergabe als Projektion erfolgte wiederum auf einem technisch avancierten Abspielgerät, einem Epidiaskop der Firma Zeiss.²² Die Aufwände lassen erkennen, dass diese Repräsentationen der frühen Strömungsgeschehen bei Prandtl von den Menschen und Systemen, die sie erstellen, deutlich beeinflusst waren. «Es [Das wissenschaftliche Bild, ES] ist nicht etwas, was einfach da ist und darauf wartet, so oder anders interpretiert zu werden. Es wird unter Aufwendung enormer Ressourcen und mit sich wandelnden Apparaten und Techniken produziert».²³

Die an die Wand projizierten Bilder spielten medial wie argumentativ für den Vortrag eine zentrale Rolle. Prandtl entwickelte eine Text-Bild-Argumentation, die sich über mehr als die Hälfte des abgedruckten Vortrages in der Konferenzpublikation hinzieht.²⁴ Sie kombinierte im Text eingefügte Zeichnungen, die die Fließvorgänge der Stromlinien schematisch zeigen, mit Fotografien vom Wasserkanal auf einer ausklappbaren Bildtafel und ermöglichte ein synchrones Lesen von Text und Bild.

Filmische Aufnahmen

Ludwig Prandtl begann um 1912 mit Film zu experimentieren²⁵ und produzierte ab 1925 mit verschiedenen Assistenten und Kollegen zahlreiche Filmaufnahmen²⁶, die den Prozess der unregel-

20 Barad, Karen: *Meeting the Universe Halfway. Quantum Physics and the Entanglement of Matter and Meaning*. Durham, NC: Duke University Press, 2007, S. 53.

21 Bloor «Sichtbarmachung ...» (Anm. 11), S. 353.

22 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 39.

23 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 55.

24 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 41.

25 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 56.

26 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 71.

mässigen Strömungsablösung an und Wirbelbildung hinter Objekten wie Tragflächen oder Zylindern zeigen. Es werden verschiedene Strömungsfälle vorgestellt: die Anströmung eines Zylinders, die Strömung um einen Tragflügel herum, der impulsartig verschoben wird, sowie die abgelöste Strömung durch eine scharfkantige Platte, die senkrecht zur Strömungsrichtung angeordnet ist.

Die Erstaufführung des Strömungsfilms *Entstehung von Wirbeln bei in Wasser bewegten Körpern* fand 1927 in London vor der Royal Aeronautical Society statt. Die damals gezeigten Aufnahmen wurden seitdem in Wissenschaft, Wirtschaft und Bildung vielfach umformatiert und rekontextualisiert.²⁷

Ein Aufsatz, den Prandtl zusammen mit Oskar Tietjens verfasst hat, thematisiert 1925 die Möglichkeit kinematografischer Aufnahmen von Strömungen um rotierende Zylinder im Wasserkanal.²⁸ Sie nennen als Ziel dieser Aufnahmen, «die zeitliche Aufeinanderfolge» der Vorgänge sichtbar zu machen.²⁹ Dabei zielten Prandtl und Tietjens vorerst nicht auf eine Vorführung als Film, sondern auf die Einzelbilder: «Der Zweck solcher Aufnahmen ist auch gar nicht, sie im Laufbild vorzuführen, sondern sie Bild für Bild einzeln zu betrachten.»³⁰

Der Experimentalaufbau wurde komplizierter, beispielsweise mit einem Wagen, der einen Zylinder, die Kamera und die installierten Lampen durch das Wasser ziehen konnte. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Belichtungszeiten gemacht: Kurze Belichtungszeiten, wie sie für Filmaufnahmen typisch sind, ergaben Punktbilder der Strömung, längere dagegen Linien (Abb. 3). Dafür wurde eine Filmkamera umgebaut, die nicht nur unterschiedliche Belichtungszeiten zuließ, sondern ausserdem unterschiedliche Tempi bei der Weiterbewegung des Zelluloids: ein Hybrid zwischen Foto und Film, eine Art 35mm-Serienfotoapparat³¹. Nicht nur der Apparat war in diesen frühen Experimenten ein Mittelding zwischen Foto und Film, sondern ebenso die daraus resultierenden Ergebnisse. So gab es neben der gedruckten seriellen Darstellung von Einzelbildern auch beispielsweise eine Vorführung eines «Films», bestehend aus einer Reihe von Serienbildern, der, einem Trickfilm ähnlich, einen Bewegungseindruck mit kleinen Sprüngen darbot.³²

27 Schulze/ Waltenspül liefern neben einer detaillierten Historiografie der Aufnahmen auch eine Liste der Versionen: Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 350.

28 Prandtl, Ludwig und Oskar Tietjens, «Kinematographische Strömungsbilder», in: *Die Naturwissenschaften* 13 (1925), S. 1050–1053, zit. nach Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 83.

29 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 28), S. 83.

30 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 28), S. 85.

31 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 85–86.

32 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 95.

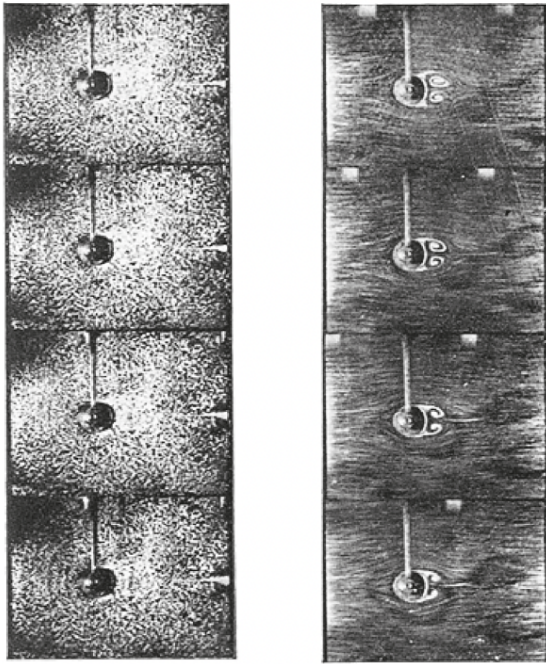


Abb. 3: Rotierender Zylinder im Strömungskanal. Vergleich von Aufnahmen mit normaler (links) und umgebauter Filmkamera mit längerer Belichtungszeit (rechts).

Für einen Eindruck der Filmaufnahmen, siehe eine spätere Version des Films (1936): <https://doi.org/10.3203/IWF/C-1> (Letzter Zugriff: 30.03.2026).

Der Film löste die Fotografie in den fluiddynamischen Versuchen von Prandtl und seinen frühen Mitexperimentatoren nicht automatisch ab, vielmehr erfolgte die Entwicklung diskontinuierlich und intermittierend. Bewegtbilder waren keineswegs vom Zeitpunkt ihres Auftretens an ein «selbstverständlichen Teil des Denkens und Handelns innerhalb der Strömungsforschung»³³, und Überlegungen, die das Einzelbild dem Laufbild gegenüberstellten, sahen Vorteile für das Sichtbarmachen von Strömungsereignissen zunächst nicht in der Kinematografie: Nicht nur war die Publizierbarkeit und Handhabung von Filmen erschwert, sondern die mit den Bewegtbildern und der kürzeren Belichtungszeit verbundene Punktdarstellung widersprachen «dem gängigen Sehstil der Strömungsforschung jener Zeit.» «Das zentrale visuelle Dispositiv der Strömungslehre basierte bis dato auf der Linie»³⁴, und die fotografischen Aufnahmen mit ihrer längeren Belichtungszeit und den Linien entsprachen der gängigen Abbildungstradition weitaus besser. Zudem gäben sie, so Tietjens, mehr Informationen über «den gerade herrschenden Strömungszustand», über einen längeren Zeitraum als das Einzelbild mit Punkten, das «nichts weiter erkennen läßt als den augenblicklichen Zustand der Bestreuung».³⁵

Die zeitliche Aufeinanderfolge des Strömungsgeschehens erkennbar machen

Eine ganze Reihe von Verfahren der Sichtbarmachung entspricht bei filmischen Aufnahmen denjenigen der Fotografie: Vor den eigentlichen Aufnahmen als Verfahren der *Verstärkung* das

33 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 93.

34 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 96.

35 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 96.

Aufstreuen von Partikeln wie Aluminiumpulver, Eisenglimmer oder Lycopodiumsporen und die Beleuchtung von oben, um kontrastreichere Bilder der Partikelverteilung zu erhalten. Dann die *Schematisierung* durch Ergänzung mit Skizzen, eingeschoben zwischen oder vor den Realaufnahmen, damit Zuschauerinnen in den Aufnahmen die Begriffe und Ansätze sahen, die sie sehen sollten.

Für das Sichtbarmachen von Strömungsereignissen und zur Gewinnung fluiddynamischer Erkenntnisse ergaben sich durch die Verwendung des Mediums Film dennoch neue Möglichkeiten. Hans-Jürg Rheinberger nennt als Verfahren der Visualisierung in den Naturwissenschaften die Visualisierungsmodi der *Konfigurierung* und *Verstärkung* von Phänomenen. Beim ersten handelt es sich darum, das untersuchte Phänomen überhaupt in den Bereich des Sichtbaren zu bringen, beim zweiten um seine Verdeutlichung und Verstärkung. Das Medium Film bietet hierfür hervorragende Möglichkeiten.

Um Phänomene in den Bereich des Sichtbaren zu konfigurieren gibt es verschiedene Operationen; grundlegend nennt Rheinberger hierfür Kompression und *Dilatation*, die genuinen Möglichkeiten des Mediums Film entsprechen. Zur Skalierung von Raum und Zeit kamen in der Geschichte des wissenschaftlichen Films diverse filmische Techniken zur Anwendung, bezogen auf Zeit beispielsweise Zeitlupe oder Zeitraffer, bezogen auf Raum etwa Mikrokinematografie. Strömungsphänomene würden sich «der direkten Beobachtung» entziehen, «weil die Vorgänge viel zu rasch vor sich gehen.»³⁶ So weckte die natürliche Fließgeschwindigkeit des Wassers den Wunsch nach Verlangsamung. Prandtl schreibt 1920: «Man sieht sehr viel [bei der Strömung im Wasserkanal, ES], aber klug bin ich nicht daraus geworden, was eigentlich los ist. Man müsste die Sache mit der Zeitlupe photographieren.»³⁷

Neben den bereits genannten Verfahren der *Verstärkung* in der Produktion gibt es auch solche in der Präsentation; beim Medium Film etwa die Möglichkeit, Sequenzen zu wiederholen, entweder im Laufe einer Vorführung oder im geschnittenen Film. Dabei wurde entweder die genau gleiche Sequenz wiederholt: «Erst im zweiten Durchgang kann man sehen, was man im ersten Durchgang glaubt, erkannt zu haben»³⁸ oder es folgt auf eine Sequenz, die eine Übersicht des Geschehens zeigt, eine, die auf das Geschehen in der Grenzschicht fokussiert und damit so etwas wie einen Zoom-Effekt hervorruft. Um den schnellen und instabilen Prozess der Strömungsablösung besser sichtbar zu machen, konnte bei einer Vorführung auch zwischen Laufbild und Standbild gewechselt

36 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 77.

37 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 76.

38 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 118.

werden. So lag für Tjetjens der «große Vorzug dieses Zeitfilms gegenüber dem gewöhnlichen Film» darin,

daß ein beliebiges Stadium des Strömungsvorganges festgehalten werden kann einfach dadurch, daß man den Zeitfilm im Wiedergabeapparat stehen läßt; das dabei auf der Leinwand erscheinende Stromlinienbild gibt dann einen guten Einblick in den gerade herrschenden Strömungszustand [...] ³⁹

Auch wenn der Film, genau wie die Fotografie, als Lichtspur und Existenzbeweis natürlich eine Abbildung des Experimentalgeschehens darstellt, umfassen die Strategien der Sichtbarmachung auch die *Demonstration*, die *Deixis*, das Zur-Schau-Stellen (Mersch), das über die bloße Beobachtung des Phänomens hinausgeht. So stützen sich die Abbildungen der Oberflächen zwar auf Vorfindbares, ihre bildliche Verwendung erlaubt aber, Effekte wie Zeitlupe, Heranzoomen oder Stillstellen vorzuführen.

Particle Image Velocimetry PIV

Digitale Bildverfahren stellen einen stetig anwachsenden Bestandteil naturwissenschaftlicher Bilderzeugnisse dar.⁴⁰ Dabei leisten sie ganz Verschiedenes: «Sie bilden Sichtbares ab oder machen Unsichtbares sichtbar, sie visualisieren Datensätze, dynamische Prozesse und Datenstrukturen, simulieren Physiken, kartieren Messdaten, tabellieren, verrechnen, werten statistisch aus.»⁴¹ In der Strömungsvisualisierung eröffnet die Particle Image Velocimetry PIV erweiterte Möglichkeiten: von der analogen filmischen Darstellung hin zur quantitativen Messmethode.

PIV ist ein computergestütztes optisches Verfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in der Strömungsmechanik. Während es Prandtl noch aussichtslos erschien, im Laufbild den aufgestreuten Partikeln Frame für Frame zu folgen,⁴² können in der Verarbeitung der digitalisierten Bildsequenzen mit modernen PIV-Algorithmen Stärken und Geschwindigkeiten der Wirbel bestimmt werden. 2009 erstellten Chris Willert und Jürgen Kompenhans vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR eine PIV-Analyse des Strömungsfilms von Prandtl. Ausgewählte

39 Tietjens, «Kinematographische Strömungsaufnahmen» (1926), S. 102, zit. nach Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 95.

40 Schneider, Birgit: «Wissenschaftsbilder zwischen digitaler Transformation und Manipulation. Einige Anmerkungen zur Diskussion des „digitalen Bildes“», in: Heßler, Martina, Mersch, Dieter (Hg.): *Logik des Bildlichen: Zur Kritik der ikonischen Vernunft*. Bielefeld: transcript, 2009, S. 188.

41 Schneider «Wissenschaftsbilder» (Anm. 40), S. 194.

42 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 87.

Originalfilmsequenzen wurden mit Visualisierungen überlagert, die durch PIV-Verarbeitung gewonnen wurden (Abb. 4).

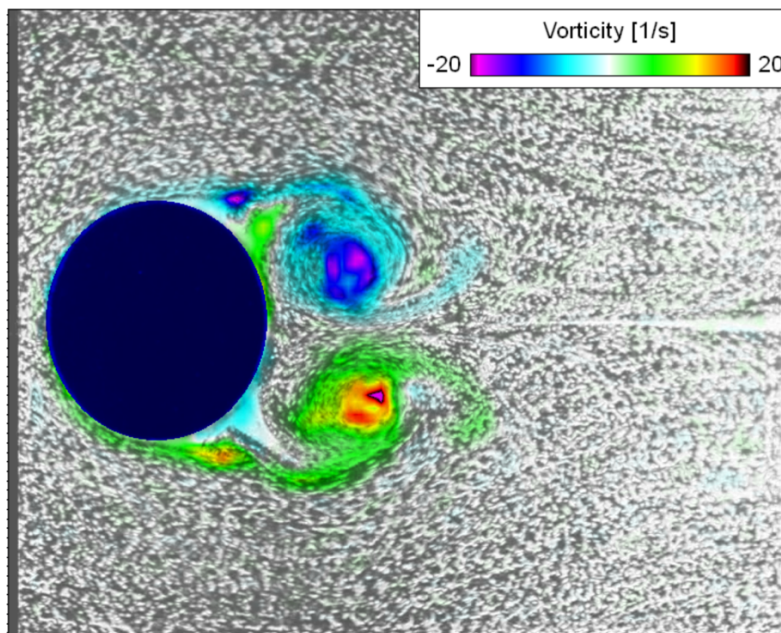


Abb. 4: Videostill der PIV-Visualisierung.

Die farbigen Bereiche liefern Informationen zur *vorticity*, einem Mass für den Drehsinn und die Stärke von Wirbeln. Im positiven *vorticity*-Bereich, den roten bis grünen Tönen der Skala, dreht sich das Fluid im Gegenuhrzeigersinn, im negativen, blauvioletten Bereich im Uhrzeigersinn. Die Farben visualisieren Messdaten, die aus dem digitalisierten Filmmaterial gewonnen wurden. Durch die Einfärbung mit Falschfarben, die sich am Spektrum des sichtbaren Lichts orientieren, tritt die Wirbelbildung optisch stärker hervor, und die schwer erkennbaren Rückströmungen werden deutlicher erkennbar. Willert und Kompenhans erhielten für ihren Beitrag *PIV Analysis of Ludwig Prandtl's Historic Flow Visualization Films* den Best Movie Award beim 14. Internationalen Symposium zur Strömungsvisualisierung in Daegu, Südkorea.

Das sich über die Zeit verändernde Wirbelfeld visualisieren

Die PIV-Analyse lässt sich mit den Kategorien von Dieter Mersch ebenfalls gut analysieren. Das Spezifische dieser fluiddynamischen digitalen Bilder ist, dass sie zusätzlich zum Oberflächenströmungsfeld auch das sich zeitlich verändernde Wirbelfeld visualisieren. Zum einen gibt es hier die Schwarz-Weiss Filmaufnahmen des Oberflächenströmungsfeldes und zum andern die Einfärbung mit den Fehl- oder Falschfarben für Stärke und Drehsinn der Wirbel. Die Darstellung hat damit neben der *Referenzialität* auf ein tatsächliches Geschehen mit den Originalfilmsequenzen auch ein *konstruktives Moment* mit der farbigen Umsetzung der Strömungs-Verhältnisse. Dabei entsteht eine

hybride Darstellung, die explizit Abbildung mit produktiver Sichtbarmachung kombiniert. Ferner gibt es – analog wie beim Film mit Zeitlupe oder dem Heranzoomen – ein Element und einen Effekt der *Demonstration*, die über die bloße Beobachtung des abgebildeten Phänomens hinausgeht.

Mit den Kategorien von Hans-Jürg Rheinberger lässt sich die Visualisierung so beschreiben: Während die Einfärbung mit Fehlfarben im Film eine *Verstärkung* dessen darstellt, was im Prinzip auch ohne Farbeingriff zu sehen ist, nimmt sie als Standbild aus dem Video, wie es hier abgebildet ist, eine *Kompression* vor: Sie bringt das untersuchte Phänomen, nämlich Stärke und Drehsinn der Wirbel, durch die Fehlfarbeneinfärbung überhaupt erst in den Bereich des Sichtbaren. Die Einfärbung schafft eine Kompression der Informationen über einen bestimmten Zeitraum, etwas, das historisch bei Prandtl und Tietjens durch längere Verschlusszeiten versucht wurde, um einen «Einblick in den gerade herrschenden Strömungszustand»⁴³ zu bekommen.

Simulation des Laseyer Windes

Es gibt keine wissenschaftliche Simulation in der direkten Nachfolge von Prandtls Strömungsabbildungen. Zu den linear-viskosen Fluiden, deren Bewegung durch die Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben wird, gehört neben Wasser aber auch Luft; in dieser Arbeit wird daher eine Windsimulation eines aktuellen Projektes der ETH Zürich aufgenommen. Es handelt sich um eine Kooperation des Instituts für Atmosphären- und Klimawissenschaften IAC mit dem Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen, das Windverhältnisse im Schwende-Tal im Kanton Appenzell Inneroden untersucht hat.⁴⁴

Der Laseyer-Wind zwingt die Appenzeller Bahnen jeden Winter 10- bis 15-mal dazu, auf Busverkehr umzustellen. Angesichts der Heftigkeit des Windes und möglicher Folgen – der Laseyer hatte 2007 bereits zu einer Zugentgleisung geführt – bestand ein Interesse daran, die Dynamik des lokalen Alpensturms besser zu verstehen. Er tritt bei starken nordwestlichen Umgebungsströmungen auf und zeichnet sich durch heftige Südostwinde aus, die senkrecht zur Talachse wehen. Obwohl der Laseyer und seine Klimatologie in Vorgängerprojekten bereits erforscht wurden, war der spezifische Mechanismus, der zu den starken Böen in der Nähe des Talbodens führt, noch nicht verstanden. Ziel der Simulation war, den Mechanismus zu identifizieren, der zur Strömungsumkehr und

43 Vergl. Anm. 39.

44 Krieger, N., Wernli, H., Sprenger, M., and Kühnlein, C.: «Revealing the dynamics of a local Alpine windstorm using large-eddy simulations», in: *Weather Clim. Dynam.*, 6, 447–469, DOI: <https://doi.org/10.5194/wcd-6-447-2025> (Letzter Zugriff: 30.03.2026).

zu den Böen führt.⁴⁵ Um ein komplexes System besser zu verstehen und seine Reaktionen auf bestimmte Einflüsse vorhersagen zu können, setzt man es im Experiment verschiedenen Bedingungen aus. Ist eine physikalische Modellierung nicht möglich, werden die Verhältnisse in einem Computer-Modell nachgebildet. Hier wurden der Mechanismus dieses lokalen Windes und seine Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Umgebungswindverhältnisse untersucht.

Die Dynamik des Laseyers wurde mithilfe von Large-Eddy-Simulation (LES) ermittelt, eine Technik der numerischen Strömungsmechanik (computational fluid dynamics), die sich für atmosphärische Grenzschichtströmungen eignet und quantitativ korrekte Simulationen von turbulenten Strömungen in komplexem Gelände erlaubt. Dazu wurden die Umgebungswindbedingungen in Simulationen modifiziert und die Resultate mit Messdaten aus früheren Studien verglichen. Es zeigte sich, dass die starken Böen nur in einem engen Fenster der Umgebungswindrichtungen und ab einer bestimmten Geschwindigkeit auftreten.⁴⁶ Die Simulation kann das komplexe Windphänomen korrekt vorhersagen.

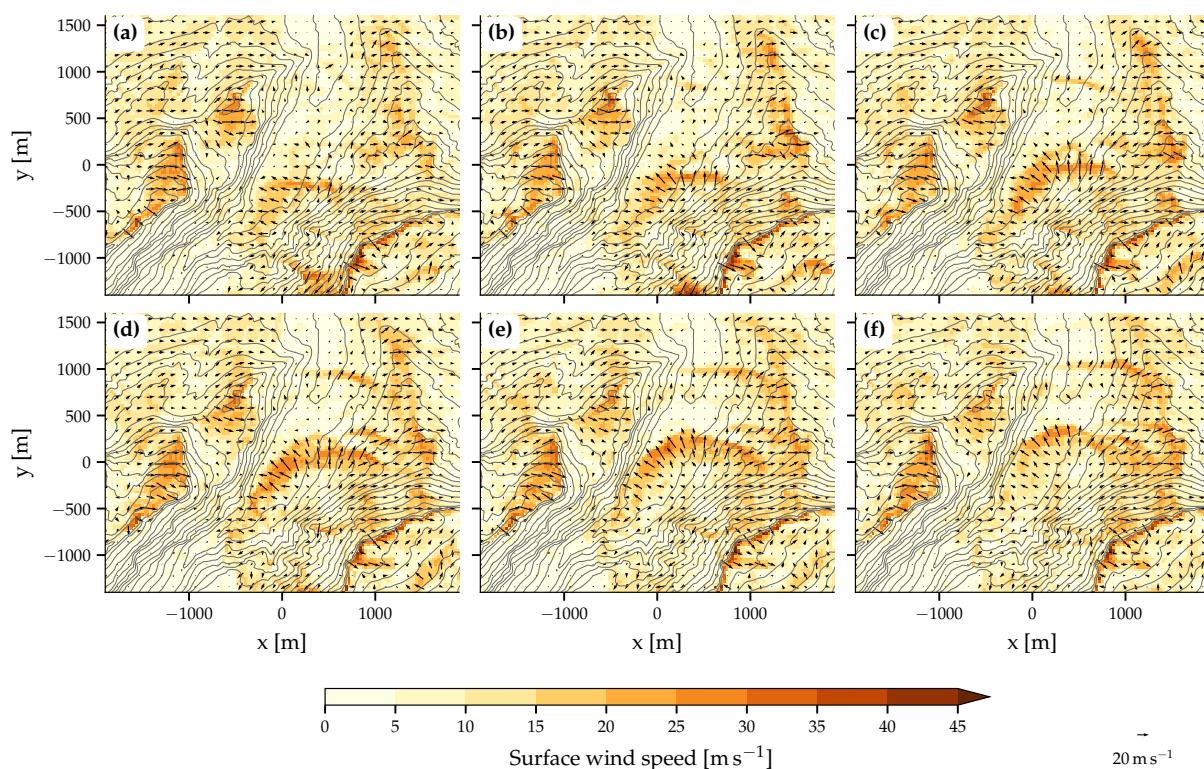


Abb. 5: Einzelbilder der Strömungssimulation im Schwende-Tal und seiner Umgebung.

45 Krieger et al. «Revealing the dynamics» (Anm. 44), S. 449.

46 Krieger et al. «Revealing the dynamics» (Anm. 44), S. 447.

Die hier in Einzelbildern im Intervall von zehn Sekunden abgebildete Simulationszeit beträgt insgesamt 50 Sekunden. Zu sehen ist eine Karte des Schwende-Tals und seiner Umgebung in einem Ausschnitt von drei mal vier Kilometern; das Tal ist an den grauen, topografischen Linien erkennbar. Die Pfeile geben Windrichtung und -geschwindigkeit wieder, die Farben verdeutlichen die Windgeschwindigkeit. Die Simulation zeigt – auch wenn es hier in der Verkleinerung der Einzelbilder nur mässig gut zu erkennen ist –, dass sich der Wind im Tal umkehrt und dabei immer wieder kurze, starke Böen auftreten. Diese erreichen meist über 20 m/s (72 km/h) und in seltenen Fällen sogar über 35 m/s (126 km/h).

Die Voraussage des Laseyer grafisch darstellen

Die digitale Simulation des Laseyer unterscheidet sich in zweierlei Hinsicht von den anderen Strömungsvisualisierungen dieser Arbeit. Nicht nur lässt sie sich nicht auf Phänomene im Wassertank von Prandtl zurückführen, sondern sie stellt überhaupt keine «tatsächlichen Objekte» dar: Die Simulation des Laseyer ist nicht die Abbildung eines bestimmten Sturmgesehens an einem bestimmten Tag, sondern modelliert die Dynamik des lokalen Alpensturms. Die Simulation bildet nichts Sichtbares ab, macht auch nichts Unsichtbares sichtbar. Sie ist vielmehr eine Visualisierung von Datenstrukturen, die wiederum dynamische Prozesse abbilden. Das Sichtbarmachen besteht in diesem Fall darin, dass die Simulation und hier die Bilderzeitreihe Windstärken und -richtungen visualisieren, die in den errechneten Daten zwar vorhanden sind, dem menschlichen Auge aber erst in dieser Form zugänglich werden. Dafür kommen verschiedene grafische Elemente zum Einsatz: Die grauen Linien verbinden Punkte gleicher Höhe über dem Meeresspiegel und bilden das Relief mit Tal und Steilhang ab; damit nehmen sie eine Darstellungskonvention auf, wie sie von topografischen Landkarten bekannt ist. Die Pfeile geben neben der Windrichtung auch die Windgeschwindigkeit wieder – längere Pfeile bedeuten stärkere Winde – und die für die Fragestellung zentrale Windgeschwindigkeit wird durch den Einsatz von Farbe verstärkt. Wie bei der Einfärbung bei der PIV-Analyse hat die Farbskala nichts mit realen Umgebungsfarben zu tun; ihre Bedeutung muss aus der Legende abgelesen werden.

Hans-Jürg Rheinberger nennt für Modellierungen als Visualisierungsmodus die *Schematisierung* und bringt diesen Modus mit einer eigenen Klasse epistemischer Objekte in Verbindung: Modelle als Visualisierungen, die sich in einem anderen Medium abspielen. Die Schematisierung des Strömungsgesehens nimmt hier nicht die Form von Schemaskizzen an, etwa wie sie Prandtl für seine Filmdidaktik benutzt hat, sondern diejenige der numerischen Modellierung *in silico*. Innerhalb der schematischen Darstellung finden sich Elemente der Verstärkung in der Verdopplung der Mittel zur Anzeige der Windstärke: Pfeillänge und Farbe sind zur Verdeutlichung redundant eingesetzt.

Bei Dieter Mersch weist die Modellbildung wiederum auf die *Konstruktivität* hin, die er ganz allgemein schematischen Darstellungen und Modellbildungen zuordnet, welche logische Strukturen und Verhältnisse sichtbar machen.

Zusammenfassung

Die von Hans-Jürg Rheinberger und Dieter Mersch allgemein beschriebenen Verfahren der Visualisierung beschreiben auch diejenigen in der Fluidodynamik. Dabei unterscheiden sich die vier Stufen Fotografie, Film, PIV-Analyse mit Einfärbung und Simulation in den Operationen der Sichtbarmachung deutlich. Dass bildliche Wissenserzeugung nicht nur ein Abbilden ist, sondern eine produktive Sichtbarmachung, zeigt sich in jeder Etappe.

Bereits bei den Fotografien wird klar, dass sie zwar eine Abbildung des phänomenologischen Wissens darstellen, das unmittelbar aus Beobachtungen am Strömungskanal gewonnen werden konnte, dass ihnen aber zugleich die aufwändigen Manipulationen ihrer Herstellung eingeschrieben sind. Auch die Praktiken ihrer Präsentation zeigen – etwa mit den beigefügten Schemaskizzen – Merkmale des Konstruktiven. Das Medium des frühen Films bot für die Visualisierung von Strömungsphänomenen spezifische Möglichkeiten zur Manipulation des zeitlichen Ablaufs: Dehnung der Zeit in Form von Zeitlupe, Stillstand, Wiederholung von Vorgängen und Zwischenformen von stehendem und bewegtem Bild. Die ›Gemachtheit‹ der Aufnahmen mit den vielfältigen Formen des Eingreifens widerspiegelt sich im Film in einer aufwändiger gewordenen Apparatur; es ist nicht einfach mehr nur die gleichsam unschuldige Wiedergabe dessen, was eine Beobachterin im Labor selber beobachtet hätte, sondern seine Ersetzung: «Der technische Blick der optischen Apparatur ersetzte hier die direkte Beobachtung am Kanal.»⁴⁷ Rund 70 Jahre später erzeugt die PIV-Verarbeitung der frühen Aufnahmen von Prandtl zwar nicht eine neue, aber eine verdeutlichte Sicht auf die Wirbelereignisse. Die hybride Darstellung – zwischen historischer Anlehnung und zeitgenössischer Technik, zwischen Abbildung und produktiver Sichtbarmachung – zehrt auch vom Nimbus der alten Aufnahmen. Mit der Kompression der Informationen über einen, wenngleich kurzen Zeitabschnitt, wiederholt sie ein historisches Verfahren, nämlich den Versuch, über die Visualisierung einen «Einblick in den gerade herrschenden Strömungszustand»⁴⁸ zu bekommen. Die Simulation des Laseyer-Windes stellt einen weiteren Typ von Visualisierung dar, nämlich die numerische Modellierung, die mithilfe von grafischen Darstellungskonventionen die Dynamik des lokalen Alpensturms für das menschliche Auge erst ablesbar macht.

47 Schulze/ Waltenspül *Fließend* (Anm. 1), S. 70.

48 Vergl. Anm. 39.

Es zeigt sich, dass Visualisierungen eine Vielzahl von Praktiken, Modi und Strategien der Sichtbarmachung umfasst. In einer Gegenüberstellung der Kategorien von Mersch (*Referenzialität, Konstruktivität* und *Demonstration*) und von Rheinberger (*Kompression/Dilatation, Verstärkung, Schematisierung*) liesse sich vielleicht grob festhalten, dass die Beschreibungen von Mersch sich eher auf die Funktion von Darstellungen zu beziehen scheinen, während diejenigen von Rheinberger eher Prinzipien und Prozesse der Bilderzeugung beschreiben. Die Praktiken und Strategien der Sichtbarmachung sind in den einzelnen Darstellungen tatsächlich aber kaum zu isolieren; das hat hier die Beschreibung der Verfahren der Visualisierung für die Medienformate erschwert. Um richtig verstanden zu werden, ist die einzelne Darstellung zudem immer auch im Kontext anderer Darstellungen und einem argumentativen Zusammenhang zu betrachten. «Die [...] Verfahren der Visualisierung in den Naturwissenschaften kommen in der Regel nicht isoliert voneinander, sondern in einem gegebenen Experimentalzusammenhang aufeinander bezogen und sich gegenseitig stützend vor.»⁴⁹ Bei den Visualisierungsverfahren für fluiddynamische Phänomene handelte es sich immer um eine Kombination von vorführen, Unsichtbares – oder schlecht Erkennbares – erkennbar machen, demonstrieren und grafisch präsentieren. Die Ausdifferenzierung der Verfahren und Strategien macht aber deutlich, dass es dabei Unterschiede gibt und in einen argumentativen Zusammenhang jeweils das eine oder andere im Vordergrund steht.

Literaturverzeichnis

Barad, Karen: *Meeting the Universe Halfway. Quantum Physics and the Entanglement of Matter and Meaning*. Durham, NC: Duke University Press, 2007.

Bloor, David: «Sichtbarmachung, common sense and construction in fluid mechanics: the cases of Hele-Shaw and Ludwig Prandtl», in: *Studies in History and Philosophy of Science* 39, 2008, S. 349–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2008.06.006>. (Alle Onlinequellen: 30.03.2026).

Geise, Stephanie: «Wissenschaftliche Bilder und die Visualisierung komplexer Daten in der Kommunikationsforschung», in: Lobinger, Katharina (Hg.): *Handbuch Visuelle Kommunikationsforschung*. Springer Nature, 2013, S. 1–21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-06738-0_21-1.

Großmann, Siegfried, Eckhardt Bruno, Lohse Detlef: «100 Jahre Grenzschichtphysik», in: *Physik Journal* 3 (2004) Nr. 10, S. 31–37.

Krieger, N., Wernli, H., Sprenger, M., and Kühnlein, C.: «Revealing the dynamics of a local Alpine windstorm using large-eddy simulations», in: *Weather Clim. Dynam.*, 6, 2025, S. 447–469. DOI: <https://doi.org/10.5194/wcd-6-447-2025>.

Mersch, Dieter: «Wissen in Bildern. Zur visuellen Epistemik in Naturwissenschaft und Mathematik», in: Bernd Hüppauf, Peter Weingart (Hg.): *Frosch und Frankenstein – Bilder als Medium der Popularisierung von Wissenschaft*. Bielefeld: transcript, 2009, S. 107–134. DOI: <https://doi.org/10.25969/mediarep/12179>.

Prandtl, Ludwig, «Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung», in: *Verhandlungen des III. Internationalen Mathematiker-Kongresses Heidelberg 1904*, Leipzig: Teubner, 1905, S. 484–491.

49 Rheinberger «Sichtbar Machen» (Anm. 2), S. 143.

Prandtl, Ludwig und Oskar Tietjens, »Kinematographische Strömungsbilder«, in: *Die Naturwissenschaften* 13 (1925), S. 1050–1053.

Rheinberger, Hans-Jürg. »Sichtbar Machen. Visualisierung in den Naturwissenschaften«, in: Sachs-Hombach, Klaus. *Bildtheorien. Anthropologische und kulturelle Grundlagen des Visualistic Turn*. Frankfurt a. M: Suhrkamp, 2009, S. 127–145.

Schneider, Birgit: »Wissenschaftsbilder zwischen digitaler Transformation und Manipulation. Einige Anmerkungen zur Diskussion des „digitalen Bildes“«, in: Heßler, Martina, Mersch, Dieter (Hg.): *Logik des Bildlichen: Zur Kritik der ikonischen Vernunft*. Bielefeld: transcript, 2009, S. 188–200.

Schulze, Mario und Sarine Waltenspül. *Fließend. Geschichte, Ästhetik und Politik des wissenschaftlichen Films*. Göttingen: Wallstein Verlag, 2026. DOI: <https://doi.org/10.46500/83539191>.

Tietjens, Oskar, »Kinematographische Strömungsaufnahmen von rotierenden und nicht rotierenden Zylindern«, in: *Jahrbuch der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Luftfahrt* 1925 13 (1926), S. 100–102.

Abbildungsnachweise

Abb. 1: Strömungsablösung, die hinter einem Rundzylinder Wirbel erzeugt.
Quelle: Bloor 2008, S. 353.

Abb. 2: Verzögerte Ablösung und unterdrückte Wirbelbildung durch Absaugen der Grenzschicht.
Quelle: Bloor 2008, S. 353.

Abb. 3: Rotierender Zylinder im Strömungskanal. Vergleich von Aufnahmen mit normaler und umgebauter Filmkamera mit längerer Belichtungszeit.
Quelle: Schulze/ Waltenspül 2026, S. 85.

Abb. 4: Videostill der PIV-Visualisierung.
Quelle: https://www.dlr.de/en/media/videos/2010/particle-image-velocimetry-piv-analysis-of-ludwig-prandtl-s-historic-flow-visualisation-films_17464. (Letzter Zugriff: 30.03.2026).

Abb. 5: Einzelbilder der Strömungssimulation im Schwende-Tal und seiner Umgebung.
Quelle: Krieger et al. 2025. DOI: <https://doi.org/10.5194/wcd-6-447-2025>.